

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина»

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Кузнецов Алексей Евгеньевич

Рязань — 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Обработка изображений земной поверхности, получаемых при площадной съёмке	10
1.1 Организация площадной съёмки в высокодетальных системах ДЗЗ	10
1.2 Анализ моделей формирования мозаичных снимков	17
1.3 Задачи диссертационного исследования	32
Выводы по главе 1	35
Глава 2. Модели и алгоритмы геометрической обработки материалов площадной съёмки	36
2.1 Представление строгой модели съёмки в унифицированном виде .	36
2.2 Алгоритм фильтрации одноимённых точек на основе предобработки их областей с использованием методов искусственного интеллекта	43
2.3 Математическая модель блочного уравнивания групп снимков с использованием RPC-модели	64
2.4 Алгоритмы оптимизации параметров модели блочного уравнивания	73
Выводы по главе 2	86
Глава 3. Алгоритмы синтеза и оценки качества мозаичных снимков . .	88
3.1 Синтез непрерывного мозаичного снимка	88
3.2 Алгоритм проведения линии пореза мозаичных изображений	93
3.3 Алгоритм оценки качества линии пореза мозаичных изображений .	108
3.4 Методика оценки точности геопривязки мозаичных снимков на основе статистических показателей	118
Выводы по главе 3	124
Глава 4. Практическая реализация алгоритмов обработки данных площадной съёмки	126
4.1 Структура программного комплекса обработки	126

	Стр.
4.2 Инструменты выполнения и контроля геометрической обработки .	137
4.3 Средства автоматизированной оценки качества мозаичных изображений	145
4.4 Результаты экспериментальной апробации	152
Выводы по главе 4	158
Заключение	161
Список сокращений и условных обозначений	163
Список литературы	164
Приложение А. Акты об использовании результатов диссертационной работы	180
Приложение Б. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ	184

Введение

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. Особенности 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 съём-

ки 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 объективном 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. [1—20]. 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 [21—24]. Аппроксимация строгой модели RPC-моделью исследовалась С. Тао, Y. Hu, C. Fraser, H. Hanley, H. Pan, D. Greslou и др. [25—28], 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 клас-

сическими методами — SIFT (D. G. Lowe), SURF (H. Bay), FAST (E. Rosten), BRIEF (M. Calonder) [29—32]; методы сопоставления и фильтрации разработаны М. Muja, М. А. Fischler, К. Lebeda и др. [29; 31; 33—35], 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 М. Tawfeik, Y. Dong, P. d'Angelo, X. Tong и др. [36—40], 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. Sudorin), методы разреза графа (L. Li), метод морфологической композиции (P. Soille, S. Bielski), а также методы на основе нейронных сетей (S. Saito, S. Yuan) [18; 41—52]. 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 [53; 54], отдельные критерии предложены Н. Yin и R. Giudici [55; 56], 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 натуральных 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 сопостав-

ления 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 натуральных 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 натуральных 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 натуральных 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.

Глава 1. Обработка изображений земной поверхности, получаемых при площадной съёмке

1.1 Организация площадной съёмки в высокодетальных системах ДЗЗ

1.1.1. В настоящее время космическая съёмка Земли является ключевым источником данных для решения задач картографии, мониторинга территорий и чрезвычайных ситуаций, градостроительства и природопользования, сельского хозяйства, обеспечения безопасности. Современной тенденцией развития космических систем наблюдения в оптическом диапазоне является увеличение детальности материалов съёмки и повышение оперативности получения данных. Космические аппараты высокого и сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне ввиду ограничений бортовых оптико-электронных комплексов имеют узкую полосу захвата [1]. В этой связи для решения тематических задач, требующих оперативного получения актуальных данных, покрытие регионов интереса осуществляется несколькими перекрывающимися изображениями в режиме площадной съёмки [57] (рис. 1.1). В части наземных комплексов КС ставится задача полностью автоматической и оперативной обработки данных площадной съёмки без участия оператора и без привлечения опорной информации.

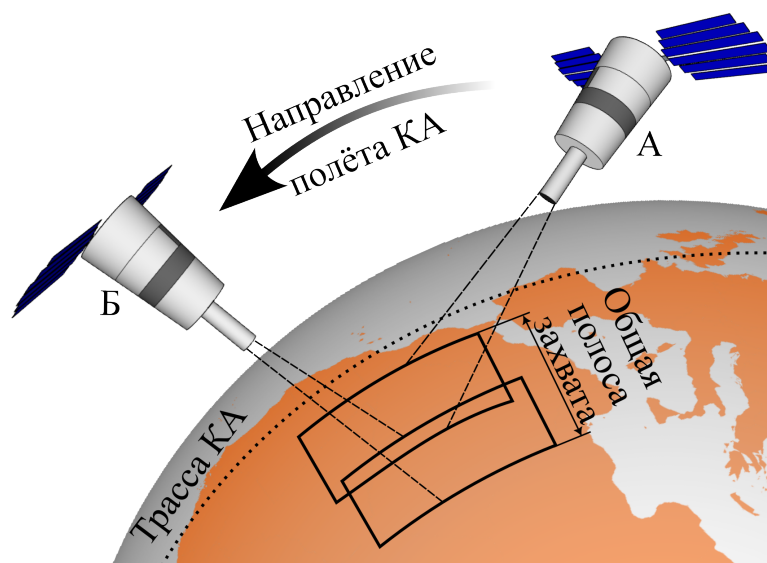


Рисунок 1.1 — Съёмка целевой территории одним космическим аппаратом при площадной съёмке

Результатом объединения материалов площадной съёмки земной поверхности являются мозаичные изображения с расширенной полосой захвата. Мозаичное изображение (мозаика) — изображение, полученное путём совмещения снимков [1; 5; 58]. Сложность синтеза мозаичных снимков заключается в процедуре их получения при площадной съёмке и обработке без опорной информации. На одном витке полёта КА совершает сложное угловое движение для съёмки перекрывающихся областей земной поверхности. В результате наблюдение осуществляется со значительно отличающимися углами визирования, что приводит к геометрическим искажениям земных объектов при совмещении материалов съёмки в единое изображение.

К современным КА высокодетального наблюдения Земли, поддерживающим режим площадной съёмки, относятся отечественные спутники серии «Ресурс»; зарубежные «GeoEye-1», серии «WorldView», серии «Pleiades», серии «SPOT», серии «KOMPSAT», «IKONOS», серии «Gaofen», «SuperView-1» (таблица 1). В этой связи актуально развитие унифицированных технологий обработки материалов площадной съёмки от различных КА. При этом на практике для аппаратов, входящих в состав серии, значения параметров геометрической модели оптической системы различаются, несмотря на идентичную конструкцию и технологический цикл изготовления [28]. В частности, на значения параметров геометрической модели съёмочной аппаратуры конкретного КА влияют: наземная юстировка оптической системы, установка камеры относительно корпуса, изменения после выведения на орбиту, изменения температурного режима в процессе эксплуатации и др. Вследствие этого требуется проведение процедур калибровки параметров моделей съёмки для каждого КА на орбите, а в ряде случаев — коррекция моделей с течением времени [59; 60]. Ввиду многообразия КА, поддерживающих режим площадной съёмки, и уникальности оптических съёмочных систем разрабатываемые алгоритмы должны быть унифицированными и принимать на вход информационные продукты стандартных уровней обработки.

1.1.2. На основе полученных данных съёмки формируются информационные продукты, классифицируемые в соответствии с уровнем обработки, формализуемым стандартом [65]. Стандарт определяет формы представления целевых данных, необходимый состав измерительной и сопроводительной информации. Использование унифицированных информационных продуктов позволяет разрабатывать технологические схемы без учёта специфики функционирования конкретного КА. Рассмотрим общую технологическую схему

Таблица 1 — Характеристики современных КА, поддерживающих режим площадной съёмки (в панхроматическом диапазоне)

КА	Производитель, страна	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы захвата, км
«Ресурс-П» [61]	АО «РКЦ «Прогресс», РФ	0,70	38,00
«GeoEye-1» [62]	GeoEye / Maxar, США	0,50	15,20
«Pléiades-1A/1B» [63]	Airbus, Франция/ЕС	0,50	20,00
«WorldView-1» [64]	Maxar, США	0,50	17,90
«WorldView-2» [64]	Maxar, США	0,46	16,40
«WorldView-3» [64]	Maxar, США	0,31	13,10
«WorldView-4» [64]	Maxar, США	0,31	13,10
«SPOT-6» [64]	Airbus, Франция/ЕС	1,50	60,00
«SPOT-7» [64]	Airbus, Франция/ЕС	1,50	60,00
«KOMPSAT-3» [64]	KARI, Южная Корея	0,70	15,00
«KOMPSAT-3A» [64]	KARI, Южная Корея	0,50	12,00
«IKONOS» [64]	Lockheed Martin, США	0,80	11,30
«GF-1» [64]	CNSA, Китай	2,00	69,00
«GF-2» [64]	CNSA, Китай	0,80	45,00
«SuperView-1» [64]	SpaceWill, Китай	0,50	12,00

получения и обработки данных площадной съёмки от современных высокодетальных систем дистанционного зондирования Земли сканерного типа (рис. 1.2). Оператор КС ДЗЗ определяет регион интереса, превышающий полосу захвата КА. На одном витке КА выполняет съёмку K изображений I_k в моменты времени t_k ($k = \overline{1, K}$), покрывающих необходимый регион интереса. В рамках первичной обработки при приёме данных в наземный комплекс приёма, обработки и распространения (НКПОР) данные из файла-потока распаковываются в продукты уровня обработки L0 [65], представляемые в виде файлов маршрута, включающие видеоданные (растровые данные), измерительную и сопроводительную информацию. Для получения мозаичного изображения уровня обработки L3 выполняются процедуры стандартной обработки, а именно геометрическая и радиометрическая коррекции изображений (уровень L1), ортотрансформирование в картографическую проекцию (уровень L2). В рамках базовой обработки формируется единое непрерывное мозаичное изображение уровня L3 [1; 5; 58].

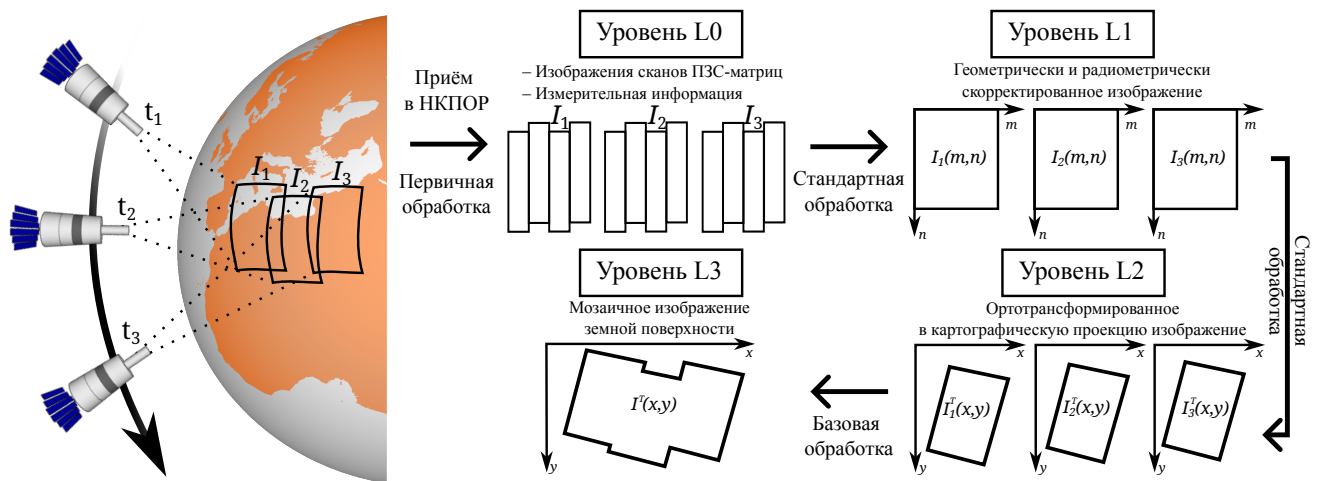


Рисунок 1.2 — Технологическая схема получения и обработки данных площадной съёмки

Формирование высокодетальных спутниковых изображений осуществляется оптико-электронной аппаратурой, преобразующей отражённое от поверхности Земли оптическое излучение в цифровой сигнал [66]. В состав такой аппаратуры входят приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), функционирующие в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Режим ВЗН компенсирует потерю освещённости, обусловленную высокой скоростью движения КА, и обеспечивает пространственное разрешение, достигающее 0,4 м [67]. Ввиду конструктивных ограничений отдельная ПЗС-матрица не покрывает проектную полосу захвата, поэтому несколько ПЗС-матриц размещаются в шахматном порядке перпендикулярно направлению орбитального движения КА. Изображение формируется построчно в режиме сканирования (pushbroom): каждая ПЗС-матрица последовательно регистрирует отдельный участок местности, образуя скан.

Изображения $I_k(m,n)$ уровня обработки L1 представляются в системе координат виртуального или реального сканирующего устройства, после выполнения радиометрической коррекции и «сшивки» данных от отдельных ПЗС-матриц. Так как расположение матриц известно с большой точностью, а промежуток времени, в течение которого выполняется съёмка земной поверхности, достаточно мал, существующие методы позволяют произвести геометрическую сшивку сканов с ошибкой порядка 0,3 пикс. [68]. Такие снимки характеризуются геометрическими искажениями, вызванными рельефом местности, элементами внутреннего ориентирования и угловым движением камеры во время съёмки.

Изображение $I_k(m, n)$ определяется как двумерная дискретная функция яркости, заданная в точках с растровыми координатами (m, n) , $m = \overline{1, M}$ и $n = \overline{1, N}$, где M — число столбцов изображения; N — число строк изображения.

Для геокодирования высокодетальных изображений земной поверхности используется строгая модель сканерной съёмки [21; 65]. Строгая модель, задаваемая расчётными отношениями Φ и Λ , устанавливает соответствие между растровыми (m, n) и геодезическими (B, L) координатами пикселей снимка в зависимости от высоты местности относительно земного эллипсоида H . Входными данными для модели съёмки изображения $I_k(m, n)$ являются измерительная информация, содержащая параметры линейного, углового движения спутника, элементы внутреннего ориентирования камеры и конструктивные углы астродатчиков [21; 24],

$$\begin{aligned} B &= \Phi_k(m, n, H, \Omega_k(t), \theta_k, \mathbf{q}_k), \\ L &= \Lambda_k(m, n, H, \Omega_k(t), \theta_k, \mathbf{q}_k), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $\Omega_k(t)$ — вектор-функция, описывающая линейные и угловые элементы внешнего ориентирования камеры изображения $I_k(m, n)$ в зависимости от времени съёмки t ; θ_k, \mathbf{q}_k — векторы, описывающие элементы внутреннего ориентирования камеры и конструктивные углы астродатчиков для изображения $I_k(m, n)$.

Продукты уровня обработки L2 получают в результате геометрической коррекции (трансформирования) продуктов уровня обработки L1 в заданную картографическую проекцию в виде изображений $I_k^T(x, y)$. При этом продукты уровня обработки L2 подразделяются на уровень L2A и L2B: L2A если в процессе преобразования в картографическую проекцию применялись только орбитальные данные (средняя высота маршрута); L2B если выполнено ортотрансформирование — преобразование с привлечением топогеодезических данных (цифровая модель рельефа, опорная информация). Ортотрансформирование снимка — процесс преобразования исходного спутникового изображения в ортогональную проекцию с устранением искажений, вызванных орбитальным и угловым движением КА, кривизной и вращением Земли, снимаемым рельефом. Для высокодетальных систем ДЗЗ трансформирование осуществляется с использованием картпроекции Гаусса-Крюгера или универсальной поперечной проекции Меркатора.

Изображения уровня обработки L2 формируются на основе строгой модели съёмки и представляются в картографической проекции в результате геометриче-

ского трансформирования,

$$I_k(m, n) \rightarrow I_k^T(x, y) : \quad x = F_x[\Phi(\cdot), \Lambda(\cdot)], \quad y = F_y[\Phi(\cdot), \Lambda(\cdot)], \quad (1.2)$$

где $I_k^T(x, y)$ — изображение $I_k(m, n)$ в картографической системе координат; (x, y) — координаты в картографической проекции; F_x, F_y — уравнения картографического проектирования.

Использование строгой модели съёмки позволяет получать прецизионные информационные продукты при своевременном выполнении процедур калибровки [21; 24; 59]. Однако такой подход крайне затруднителен для использования в унифицированных алгоритмах обработки материалов съёмки от КА различных группировок, поскольку требуется глубокое понимание принципов работы измерительных систем спутника и устройства съёмочной камеры. В связи с этим на практике используются модели съёмки на основе коэффициентов рациональных полиномов (Rational Polynomial Coefficients, RPC) [25; 26; 28; 36—38; 60]. RPC-модель камеры является обобщённой моделью фотограмметрической камеры с узкой полосой захвата и откалиброванными элементами внутреннего ориентирования. Использование такой модели позволяет разрабатывать универсальные алгоритмы обработки спутниковых изображений, не зависящие от физических особенностей процесса съёмки конкретного КА. Поэтому в соответствии со стандартом [65] вместо параметров строгой модели съёмки изображения уровней обработки L1 и L2A сопровождаются коэффициентами RPC-модели, аппроксимирующими строгую модель, и определёнными в геодезической СК.

1.1.3. RPC-модель аппроксимирует строгую модель съёмки при помощи 78 коэффициентов кубических полиномиальных функций. Для возможности дальнейшей фотограмметрической обработки RPC-модель изображения $I_k(m, n)$ представляется в виде обратных функций координатного соответствия, устанавливающих связь между геодезическими и планарными координатами снимка для уровней обработки L1 или L2A,

$$\begin{aligned} m &= P_k(B, L, H) = m_k^{(\text{scale})} \frac{\mathbf{c}_k^T \mathbf{u}}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{u}} + m_k^{(\text{off})}, \\ n &= R_k(B, L, H) = n_k^{(\text{scale})} \frac{\mathbf{e}_k^T \mathbf{u}}{\mathbf{f}_k^T \mathbf{u}} + n_k^{(\text{off})}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $(m_k^{(\text{off})}, n_k^{(\text{off})})$ — растровые координаты центра изображения $I_k(m, n)$; $m_k^{(\text{scale})}$, $n_k^{(\text{scale})}$ — нормализующие множители преобразования координат из диапазона

$[-1; 1]$ в растровые координаты изображения. Вектор нормализованных координат \mathbf{u} определяется как

$$\mathbf{u} = \left[1 \tilde{L} \tilde{B} \tilde{H} \tilde{L}\tilde{B} \tilde{L}\tilde{H} \tilde{B}\tilde{H} \tilde{L}^2 \tilde{B}^2 \tilde{H}^2 \tilde{B}\tilde{L}\tilde{H} \tilde{L}^3 \tilde{L}\tilde{B}^2 \tilde{L}\tilde{H}^2 \tilde{L}^2 \tilde{B} \tilde{B}^3 \tilde{B}\tilde{H}^2 \tilde{L}^2 \tilde{H} \tilde{B}^2 \tilde{H} \tilde{H}^3 \right], \quad (1.4)$$

где \tilde{B} , \tilde{L} , \tilde{H} — нормализованные к диапазону $[-1; 1]$ для улучшения численной устойчивости геодезические координаты, вычисляемые по формулам:

$$\tilde{B} = \frac{B - B_k^{(\text{off})}}{B_k^{(\text{scale})}}, \quad \tilde{L} = \frac{L - L_k^{(\text{off})}}{L_k^{(\text{scale})}}, \quad \tilde{H} = \frac{H - H_k^{(\text{off})}}{H_k^{(\text{scale})}}, \quad (1.5)$$

где $(B_k^{(\text{off})}, L_k^{(\text{off})}, H_k^{(\text{off})})$ — геодезические координаты центра области определения изображения $I_k(m, n)$; $B_k^{(\text{scale})}, L_k^{(\text{scale})}, H_k^{(\text{scale})}$ — нормализующие множители геодезических координат изображения $I_k(m, n)$. Здесь 78 коэффициентов RPC-модели $\{c_1, c_2, \dots, c_{20}, d_2, d_3, \dots, d_{20}, e_1, e_2, \dots, e_{20}, f_2, f_3, \dots, f_{20}\}$ представлены в виде соответствующих векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_k &= \begin{bmatrix} c_{k,1} & c_{k,2} & \dots & c_{k,20} \end{bmatrix}^\top, & \mathbf{d}_k &= \begin{bmatrix} 1 & d_{k,2} & \dots & d_{k,20} \end{bmatrix}^\top, \\ \mathbf{e}_k &= \begin{bmatrix} e_{k,1} & e_{k,2} & \dots & e_{k,20} \end{bmatrix}^\top, & \mathbf{f}_k &= \begin{bmatrix} 1 & f_{k,2} & \dots & f_{k,20} \end{bmatrix}^\top. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Коэффициенты изображения $I_k(m, n)$ при нормализованных координатах $(\tilde{B}, \tilde{L}, \tilde{H})$ нулевой и первой степени $(c_{k,1}, \dots, c_{k,4}, d_{k,2}, \dots, d_{k,4}, e_{k,1}, \dots, e_{k,4}, f_{k,2}, \dots, f_{k,4})$ учитывают параметры оптического проектирования; второй степени $(c_{k,5}, \dots, c_{k,10}, d_{k,5}, \dots, d_{k,10}, e_{k,5}, \dots, e_{k,10}, f_{k,5}, \dots, f_{k,10})$ — искажения, вызванные влиянием кривизны Земли, атмосферной рефракции и дисторсии объектива; третьей степени $(c_{k,11}, \dots, c_{k,20}, d_{k,11}, \dots, d_{k,20}, e_{k,11}, \dots, e_{k,20}, f_{k,11}, \dots, f_{k,20})$ — более сложные искажения.

Таким образом, возможно два варианта организации процесса унифицированной обработки с использованием RPC-модели — по уровню L1 и по уровню L2A.

1.1.4. При наземной обработке материалов съёмки формируются информационные продукты уровней обработки L1 и L2, характеризующиеся определённой точностью геопривязки, которая обусловлена точностью работы измерительных систем спутника и цифровой модели рельефа (ЦМР). Точность геопривязки $\bar{\sigma}_k$ изображения $I_k(m, n)$ оценивается по невязкам между опорными точками и координатами объектов, вычисленными по модели съёмки,

$$\bar{\sigma}_k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{\mathcal{J}} [\Delta x_{k,j}^2 + \Delta y_{k,j}^2]}{\mathcal{J}_k}}, \quad (1.7)$$

где $\Delta x_{k,j}$, $\Delta y_{k,j}$ — невязки в плане для j -го объекта земной поверхности; \mathcal{J}_k — число объектов земной поверхности, идентифицированных на изображении $I_k(m,n)$.

Для повышения точности определения координат объектов уточнение значений параметров модели съёмки выполняется в трёх случаях: 1) калибровка — уточнение элементов внутреннего ориентирования камеры и конструктивных углов приборов астроориентации и съёмочного устройства по данным высокоточных геометрических полигонов; 2) одиночное ориентирование маршрута — введение поправок в модель съёмки на основе опорной информации; 3) блочное уравнивание набора маршрутов — введение поправок в модель съёмки на основе ОИТ и, в общем случае, опорной информации. В настоящей работе рассматривается случай блочного уравнивания материалов площадной съёмки без привлечения опорной информации. В результате выполнения указанных процедур формируется скорректированная модель съёмки, представляемая в виде функций Φ' и Λ' .

1.1.5. Для решения задач оперативного высокодетального мониторинга земной поверхности на современных КА оптического наблюдения предусмотрен режим площадной съёмки. Получаемые изображения характеризуются значительным изменением угла визирования, в связи с чем для их высокоточного совмещения необходима разработка специального математического и алгоритмического обеспечения. Ввиду многообразия КС ДЗЗ текущего состава и появления перспективных аппаратов (например, «Ресурс-ПМ» [69], российско-белорусский космический аппарат [70]) целесообразна разработка унифицированных алгоритмов обработки материалов съёмки от различных съёмочных систем, входными данными которых являются информационные продукты уровней обработки L1 или L2A, геопривязанных по RPC-модели съёмки.

1.2 Анализ моделей формирования мозаичных снимков

1.2.1. Формирование мозаичных изображений связано с рядом научно-технических задач, возникающих вследствие сложности получения и обработки материалов съёмки; для их решения разработаны различные модели и технологии синтеза мозаик. Существенное количество работ в современной отече-

ственной [12; 14—16] и зарубежной [17; 18; 20; 71; 72] литературе посвящено объединению материалов разновитковой съёмки с привлечением опорной информации, в связи с чем актуальны исследования по разработке алгоритмов обработки данных, полученных в результате одновитковой площадной съёмки. Технологии обработки данных ДЗЗ и формирования мозаичных (композитных) покрытий рассмотрены, в частности, в работах специалистов Института космических исследований РАН [8—11]; при этом совмещение разновременных и разновитковых материалов в указанных работах строится на основе опорной информации либо эталонных изображений.

При синтезе мозаичных покрытий изображения отбираются по ряду характеристик, например, диапазон дат, сезонность, процент облачности, угол отклонения от надира КА в момент съёмки, отсутствие дефектов съёмки, сбоев при передаче на наземный сегмент и т. д. [8]. По результатам объединения материалов маршрутной съёмки формируются сплошные мозаичные покрытия земной поверхности [8; 12; 16]. Такие покрытия, в частности, используются в качестве опорных для уточнения моделей геодезической привязки КС, валидации точности геодезической привязки [9; 10]. К наиболее известным глобальным покрытиям относятся (таблица 2) Planet Basemaps [73], Copernicus [74], NASA Blue Marble [75], USGS Landsat [76], бесшовные сплошные покрытия Банка базовых продуктов [77], Геопортал Роскосмоса [78] и др. При этом для высокодетальных систем ДЗЗ время, необходимое для покрытия одним КА заданной территории, зависит от площади, геометрии региона интереса, сезонности, облачности, приоритета съёмки, и может составлять порядка нескольких месяцев, в течение которого могут произойти значительные изменения объектов земной поверхности [8].

При площадной съёмке осуществляется наблюдение целевой территории в пределах одного витка полёта в течение небольшого промежутка времени. Одинаковые условия наблюдения (освещённость, близкое время съёмки, состояние съёмочного устройства КА) и минимальные изменения объектов земной поверхности позволяют получить радиометрически единую сцену. При этом динамически изменяемые измерения бортовой аппаратуры и значительное отклонение КА от надира при съёмке каждого изображения усложняют процедуру объединения. Возникает задача автоматического формирования мозаичных изображений по материалам площадной съёмки без использования опорной информации, учитывающего принципы получения объединяемых изображений.

Таблица 2 — Характеристики сплошных мозаичных покрытий, сформированных по спутниковым снимкам

Мозаичное покрытие	Организация, страна	КА	Покрытие	Пространственное разрешение, м
Planet Basemaps	Planet Labs, США	«PlanetScope» (Dove)	Весь мир	4,7
Copernicus Data Space	Copernicus, ЕС	«Sentinel»-2A/2B	Весь мир	10,0
NASA Blue Marble	NASA, США	«Terra», «Aqua»	Весь мир	500,0
USGS Landsat Mosaic	USGS/NASA, США	«Landsat» 7/8/9	Весь мир	30,0
Банк базовых продуктов	ИЦ ОМЗ, РФ	серий «Канопус-В», «Метеор-М», «Ресурс-П»	Регионы РФ	различное
Геопортал Роскосмоса	ГК Роскосмос, РФ	серий «Канопус-В», «Метеор-М», «Ресурс-П»	Регионы РФ	различное
ESA WorldCover	ESA, ЕС	серий «Sentinel»	Весь мир	10,0
Esri World Imagery	Esri, США	множество источников	Весь мир	переменное
Google Earth	Google, США	множество источников	Весь мир	переменное
Microsoft Bing Maps Aerial	Microsoft, США	множество источников	Весь мир	переменное
Mapbox Satellite	Mapbox, США	множество источников	Весь мир	переменное
Maxar SecureWatch (Vivid)	Maxar, США	серий «WorldView», «GeoEye»	Весь мир	1,0

1.2.2. Пусть даны два изображения I_1 и I_2 , полученные в результате площадной съёмки, и подлежащие синтезу в единый мозаичный снимок уровня обработки L3. Рассмотрим два подхода (рис. 1.3) к получению исходных данных для синтеза, а именно изображений уровня обработки L2B.

При непосредственном совмещении независимо обработанных маршрутов уровня обработки L2B на мозаичном изображении будут наблюдаться рассогласования одноимённых объектов на линии стыка маршрутов. Рассогласования обусловлены погрешностями измерений пространственного и углового положения КА, а также ошибками цифровой модели рельефа, проявляющимися при различных углах визирования соседних маршрутов. На рис. 1.3а показаны деформации высотных объектов на линии стыка. При этом важно отметить, что подобные деформации возможны и при одиночном ориентировании маршрутов по опорной информации: даже если каждый маршрут хорошо привязан относительно опоры, погрешности привязки соседних маршрутов независимы

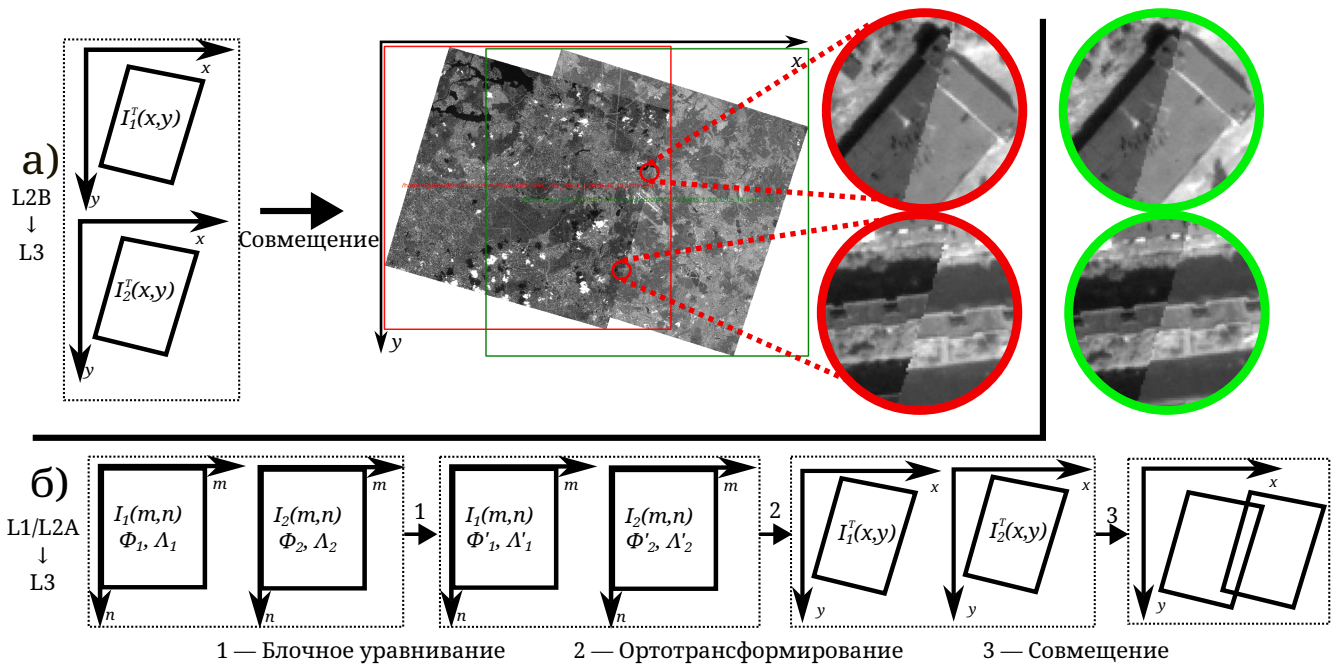


Рисунок 1.3 — Подходы к объединению изображений мозаики: а — непосредственное совмещение независимо обработанных маршрутов; б — выполнение процедуры блочного уравнивания

и разнонаправлены, вследствие чего на линии стыка они не взаимно компенсируются, а суммируются. В общем случае, если изображение $I_1(m,n)$ имеет точность привязки $\bar{\sigma}_1$, изображение $I_2(m,n)$ — $\bar{\sigma}_2$, то при условии независимости погрешностей геопривязки ожидаемое рассогласование на линии стыка не превысит $\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2}$.

Для организации совмещения одноимённых объектов с субпиксельной точностью выполняется процедура блочного уравнивания [79]. Входными данными для процедуры являются маршруты уровня обработки L1 или L2A и набор ОИТ; в общем случае дополнительно привлекается опорная информация. В настоящей работе рассматривается вариант блочного уравнивания без привлечения опорной информации. В рамках процедуры находятся поправки к параметрам исходной модели съёмки для получения скорректированных соотношений Φ'_k и Λ'_k . Поправки находятся при условии минимизации невязок в ОИТ. В результате ортотрансформирования с учётом найденных поправок при объединении изображений в единый растр обеспечивается высокоточное совмещение одноимённых объектов в области линии стыка мозаики (рис. 1.3б).

Остаточные геометрические искажения объектов в области наложения обусловлены двумя основными факторами: 1) значительной разницей углов съёмки; 2) изменением сюжета за время перенацеливания съёмочной аппаратуры.

Эти факторы приводят к появлению на изображениях как значимых дефектов высотных объектов, так и визуально заметному переходу сюжета (рис. 1.4). Для их устранения используются линии пореза [54], задающие входящую в мозаичный снимок область исходного изображения.

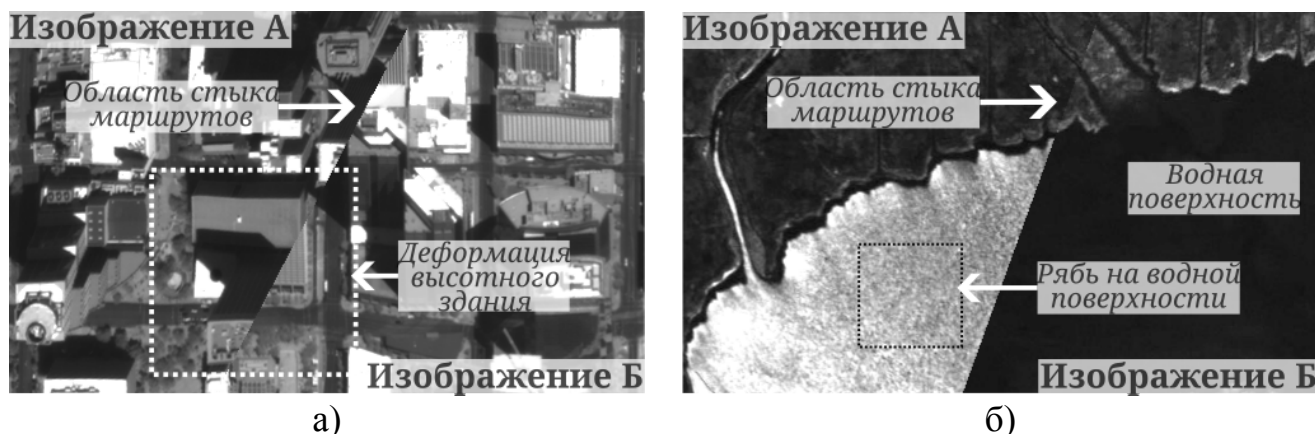


Рисунок 1.4 — Искажения в области линии стыка, обусловленные площадной съёмкой: а) влияние угла наблюдения на высотные здания; б) появление ряби на водной поверхности в процессе перенацеливания

1.2.3. В области отечественного дистанционного зондирования Земли широко распространена идея унификации технологий наземного сегмента для минимизации финансовых и трудовых расходов на проектирование, разработку и сопровождения отдельных наземных комплексов приёма, обработки и распространения информации от космических систем [13; 80—82]. В рамках унификации целью становится преобразование имеющегося опыта обработки в обобщённые алгоритмы. При этом с учётом растущих объёмов поступающей информации от спутниковых группировок перспективными считаются исследования, направленные на разработку полностью автоматических и оперативных технологий обработки [83]. Формирование мозаичных изображений из разновременных маршрутов от одного или нескольких КА также выполняется для формирования единого сплошного покрытия на территории отдельных регионов и субъектов [14; 15].

Опыт обработки мозаичных изображений земной поверхности [5; 19; 84] показывает, что основными этапами выполнения задачи синтеза из продуктов уровня обработки L1 или L2A являются:

- 1) поиск ОИТ;
- 2) выполнение блочного уравнивания;

- 3) ортотрансформирование маршрутов в картографическую проекцию с учётом найденных поправок в результате блочного уравнивания;
- 4) расчёт параметров фотометрического выравнивания;
- 5) поиск линии пореза мозаичного изображения;
- 6) оценка качества найденной линии пореза;
- 7) оценка точности геопривязки итогового мозаичного изображения.

1.2.4. RPC-модель съёмки широко применяется при фотограмметрической обработке данных ДЗЗ в качестве обобщённой модели камеры, использование которой упрощает унификацию алгоритмов обработки и обеспечивает совместимость данных от различных аэрокосмических систем. При этом её адекватность не гарантирована для произвольного КА: в ряде работ [26; 27; 85] показано, что RPC-модель не всегда обеспечивает высокоточную аппроксимацию строгой модели съёмки, особенно при обработке протяжённых маршрутов, снимков с большим отклонением от надира и при наличии локальных ошибок ориентации.

Точность аппроксимации зависит от пространственного охвата сцены, диапазона высот и алгоритма расчёта коэффициентов, а систематические и пространственно неоднородные ошибки аппроксимации могут накапливаться на последующих этапах обработки. Поэтому для конкретного КА необходима экспериментальная оценка точности аппроксимации по реальным данным съёмки, позволяющая выявить устойчивые составляющие погрешностей, оценить их влияние на блочное уравнивание и ортотрансформирование и сделать вывод о достаточности RPC-модели либо о необходимости дополнительных поправок.

1.2.5. Задача поиска опорных и одноимённых точек для дальнейшего использования в блочном уравнивании в общем случае является задачей поиска общих точек на двух изображениях. Количество, равномерность распределения по растру и корректность найденных точек играют важную роль в качестве информационных продуктов. При поиске опорных точек (ОТ) привлекается опорное покрытие [7] или абрисы [86]. В задаче поиска одноимённых точек осуществляется детектирование и сопоставление точек на паре изображений площадной съёмки.

Задача поиска общих точек может быть сведена к следующей последовательности действий [87; 88]: 1) обнаружение ключевых точек и вычисление их дескрипторов [29—32; 89; 90]; 2) сопоставление дескрипторов [33]; 3) фильтрация ложных сопоставлений [34; 35]. Ключевая точка удовлетворяет следующим требованиям [91]: устойчивость — инвариантность к геометрическим преобра-

зованиям; локальность — точка «самодостаточна» в небольшой окрестности; отличимость — уникальное окружение точки. Точка сопровождается дескриптором — числовым вектором, описывающим локальные характеристики области вокруг ключевой точки. С усложнением алгоритмов поиска и ростом объёма данных возникает задача ускорения процесса поиска точек [92], одним из способов решения которой является использование специализированных графических ускорителей [93].

Применение известных алгоритмов поиска к материалам площадной съёмки в условиях значительного изменения угла съёмки приводит к ложно сопоставленным общим точкам. Рассмотрим примеры выполнения следующей последовательности алгоритмов (рис. 1.5) на изображениях, полученных в площадном режиме: 1) дескриптор Scale Invariant Feature Transform (SIFT, инвариантное к масштабу преобразование признаков) [29]; 2) сопоставление методом Fast Approximate Nearest Neighbors (FANN, быстрый приближённый метод ближайших соседей) [33]; 3) отбраковка алгоритмом Random Sample Consensus (RANSAC, консенсус на случайной выборке) [34]. В результате применения алгоритмов найден ряд некорректно сопоставленных ключевых точек. Это связано с тем, что широко применяемые алгоритмы обеспечивают инвариантность дескрипторов к повороту и масштабированию, однако в меньшей степени учитывают особенности площадной съёмки: изменение угла наблюдения и точечное изменение сюжета наблюдаемых регионов. Наиболее выражено указанные ограничения проявляются в плотной городской застройке. При изменении угла наблюдения на изображении наблюдается систематическое смещение проекций элементов зданий (например, крыш), изменяется видимость фасадов и конфигурация теней. В результате этого часть ключевых точек, устойчиво выявляемых на изображениях, могут быть смещены за пределы допустимых областей сопоставления.

В этих условиях возникает необходимость разработки алгоритмов фильтрации ОИТ, ориентированных на работу в сценариях выраженной геометрической неоднородности на снимках площадной съёмки.

1.2.6. В работе [36] представлен алгоритм блочного уравнивания спутниковых снимков, геодезическая привязка которых определена при помощи RPC-модели. С использованием ОТ и ОИТ выполняется процедура блочного уравнивания, связанная с решением задачи нелинейного метода наименьших квадратов линеаризацией уравнений невязок в окрестности начальных оце-

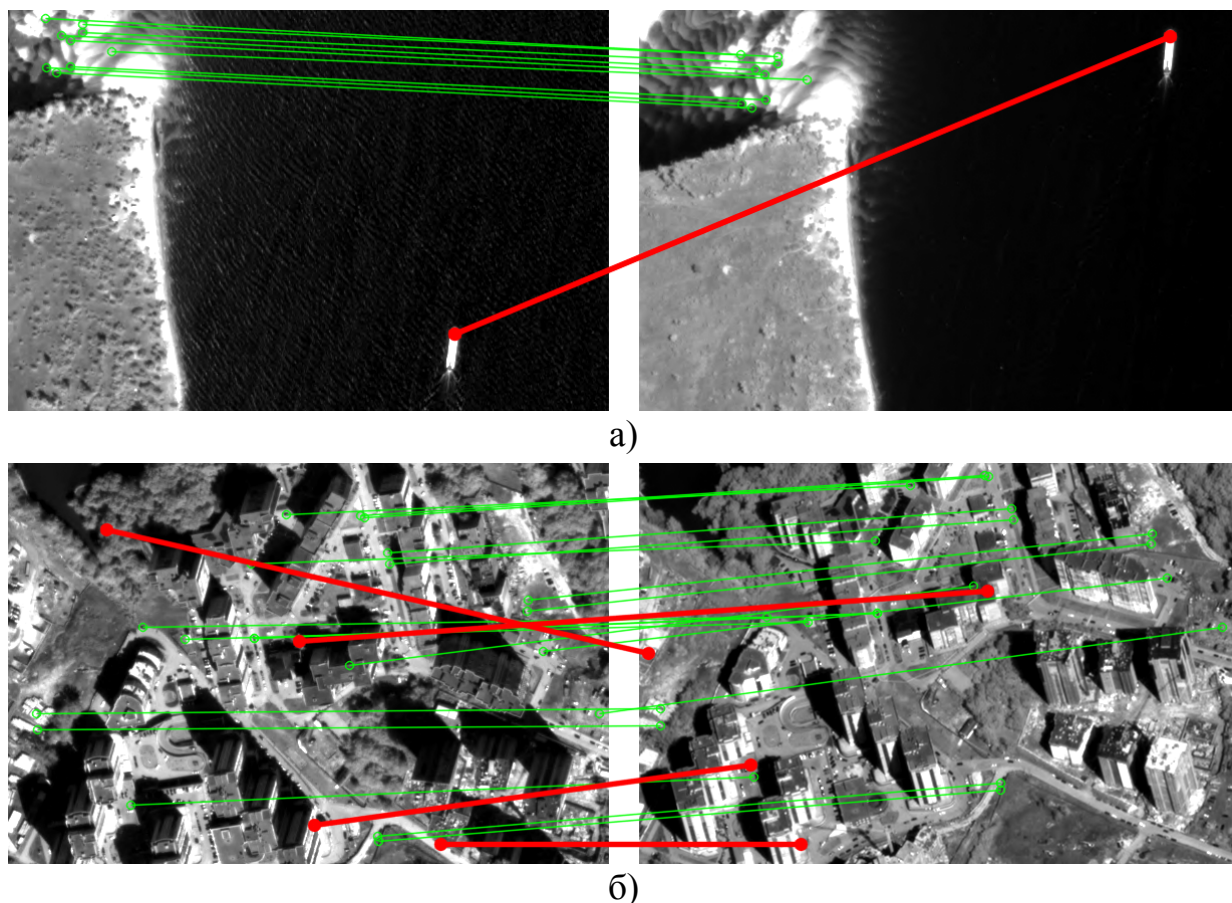


Рисунок 1.5 — Неверно идентифицированные ОИТ на изображениях площадной съёмки (некорректно сопоставленные точки выделены красной линией) в результате применения SIFT [29], FANN [33] и RANSAC [34]: а) сюжет «береговая линия» — некорректно сопоставленная точка найдена на речном баркасе; б) сюжет «городская застройка» — некорректно сопоставленные точки найдены на высотном здании, деревьях, заборе

нок параметров. К параметрам уравнивания относятся: коэффициенты модели уравнивания каждого снимка, истинные геодезические координаты опорных и одноимённых точек. В качестве моделей уравнивания авторами предлагаются модели, определённые в пространстве объекта и в пространстве изображения. Поправки в пространстве объекта подразумевают внесение поправок к геодезическим координатам перед выполнением преобразования в планарные координаты снимка по RPC-модели, поправки пространства изображения — внесение поправок к уже рассчитанным планарным координатам. В работе показана корреляция между величинами ошибок процесса съёмки и параметрами модели пространства изображения. В результате экспериментов на модельных данных доказана целесообразность использования модели пространства изображения. Автора-

ми и рядом других исследователей [37; 39] выполнена апробация алгоритма на снимках высокого разрешения, полученных с КА «IKONOS» и «Cartosat-1».

Модифицированная модель поправок с использованием ОИТ к исходной RPC-модели камеры была предложена в работе [38], в частности модель пространства изображения комбинируется с моделью пространства объекта. В результате на снимках среднего разрешения с КА «Tianhui-1» на 1 пикс. была повышена точность по сравнению с немодифицированной моделью в пространстве изображения.

Последние исследования в области блочного уравнивания по RPC-модели [40] посвящены использованию виртуальных контрольных точек в задаче масштабного блочного уравнивания. Эта задача заключается в устранении несостыковок одновременных результатов съёмки от различных спутников для формирования мозаичных изображений на обширные территории. В состав блока подобных задач входит от 100 маршрутов. Использование опорной информации в процессе уравнивания блока является затратной с точки зрения времени и ресурсов операцией. Для решения указанной проблемы авторами предлагается не использовать ОТ, а использовать вместо них виртуальные контрольные точки. Виртуальная контрольная точка — это точка объекта на изображении, геодезические координаты которой вычислены по модели камеры (с использованием обратного преобразования), а высота взята из ЦМР. Назначение виртуальной контрольной точки заключается в введении ограничений для параметров уравнивания. При этом предлагаемый авторами алгоритм требует наличия ЦМР в процессе уравнивания блока для контроля высоты объектов.

1.2.7. Задача поиска линии пореза является актуальной задачей [19; 56], варианты решения которой предлагаются различными авторами с использованием методов морфологической обработки изображений [94], теории графов [95; 96], искусственных нейронных сетей [41—43] и др. В работе [97], посвящённой автоматическому созданию фотомозаик, введено понятие линии пореза, подчеркнута важность коррекции яркости снимков и последующей обработки изображений в зоне линии пореза. Согласно работе, координаты линии пореза для каждой строки изображения определяются независимо, с целью уменьшения различий между пикселями в окне заданного размера. Среди преимуществ метода указано отсутствие зависимости положения линии пореза в горизонтальном направлении от положения линии в соседних строках, что предотвращает визуальное выделе-

ние линии за счёт выбора оптимального положения в зоне минимальной разницы яркости.

В работе [19] выполнен глубокий анализ состояния развития алгоритмов, подходов и перспективы развития задачи автоматического создания спутниковых мозаичных изображений от различных КА высокого разрешения без рассмотрения задач коррекции геопривязки для улучшения совмещения. Авторами приводятся основные шаги создания мозаичного изображения в соответствии с зарубежными стандартами:

- 1) регистрация изображений — преобразования между системами координат, в том числе ортотрансформирование;
- 2) извлечение областей пересечения — получение растров в области пересечения в соответствии с областью определения снимков;
- 3) радиометрическая нормализация — яркостное выравнивание снимков между собой для получения радиометрически непрерывного кадра;
- 4) формирование линии пореза;
- 5) создание мозаичного изображения в соответствии с найденной линией пореза.

В работе предлагается следующая классификация алгоритмов проведения линии пореза: алгоритмы, привлекающие внешнюю информацию (лидарные данные, ЦМР, цифровую модель поверхности и др.); алгоритмы, основанные на внутренней информации объединяемых изображений.

Рассмотренные методы в общем случае предполагают выполнение следующих действий:

- 1) определение функции целесообразности проведения линии пореза в элементе изображения — стоимостной функции [95];
- 2) поиск линии пореза на основе стоимостной функции.

Стоимостная функция рассчитывается в области пересечения фрагментов мозаики и принимает малые значения в пикселях, через которые линия может быть проведена, и большие — через которые прохождение линии пореза нежелательно. Проведение линии пореза может быть сведено к задаче маркированной сегментации стоимостной функции — разбиению области определения стоимостной функции на сегменты, вдоль границ которых определена линия пореза.

Модель узкого места [98] представляет собой базовый подход к определению линии пореза. Стоимостная функция вычисляется как разница яркостей. Для компенсации значительных различий яркости в пересекающихся областях

модель применяет жадный, случайный и адаптивный алгоритм поиска [52]. Однако модель узкого места не обеспечивает достаточной точности в регионах с высокой сложностью текстуры изображений высокого пространственного разрешения.

Модель змеи [51] предназначена для поиска линии пореза с наименьшей энергетической стоимостью, подверженной внешним и внутренним воздействиям. Энергетическая стоимость определяется как сумма значений стоимостной функции, через которые проходит линия пореза. «Змея» представляет собой активный контур, «перемещающийся» по изображению и изменяющий форму до достижения минимума энергетической стоимости, в результате чего фиксируется на границе изображений в виде линии пореза. Энергетическая функция, отражающая несоответствия пикселей в пересекающихся областях, включает внутреннюю энергию изображения, фотометрические параметры и внешние ограничения. Линия, соответствующая минимуму стоимостной функции, считается оптимальной авторами. Однако алгоритм часто сходится к локальному минимуму. В исследованиях [49; 50] предложены улучшения модели змеи, частично решающие проблему локального оптимума в фотометрической области.

Алгоритмы, применяющие метод Дейкстры [45—48] и динамическое программирование [44; 99] для обработки стоимостной функции, демонстрируют приемлемое качество формируемого мозаичного изображения. Однако их эффективность основана на допущении о низких значениях несоответствий в зоне наложения изображений.

Методы разреза графа [95; 96; 100] применяют стоимостные функции, учитывающие текстуру изображений в зоне пересечения, что позволяет линии пореза обходить однородные области, где другие подходы демонстрируют нестабильность. Для обработки стоимостной функции используется разрез графа, что обеспечивает получение линии пореза минимальной длины. Недостаток алгоритма проявляется при наличии в зоне пересечения нескольких фрагментов. В таких случаях применяется нестандартная стоимостная функция, представленная в виде изображения с количеством каналов, равным количеству фрагментов.

Методы морфологической композиции изображений [17; 71; 94] демонстрируют приемлемые результаты при обработке изображений со средним пространственным разрешением. Стоимостная функция определяется как поэлементный минимум значений морфологических градиентов фрагментов. Далее стоимостная функция подвергается обработке с использованием морфологического водораз-

дела. Морфологический водораздел представляет собой относительно простой метод сегментации по сравнению с разрезом графа. Недостатком подхода является длина получаемой линии пореза при наличии шума в функции стоимости.

Использование представленных алгоритмов при значительно различающихся углах визирования ограничено (рис. 1.6) ввиду следующих факторов:

- 1) параллакс, приводящий к ошибкам идентификации одноимённых контуров;
- 2) окклюзии и смены видимости объектов, при которых объекты земной поверхности, наблюдаемые на одном изображении, могут отсутствовать на другом.

В этой связи актуальной является разработка алгоритма проведения линии пореза, позволяющего учитывать геометрию съёмки объединяемых изображений.

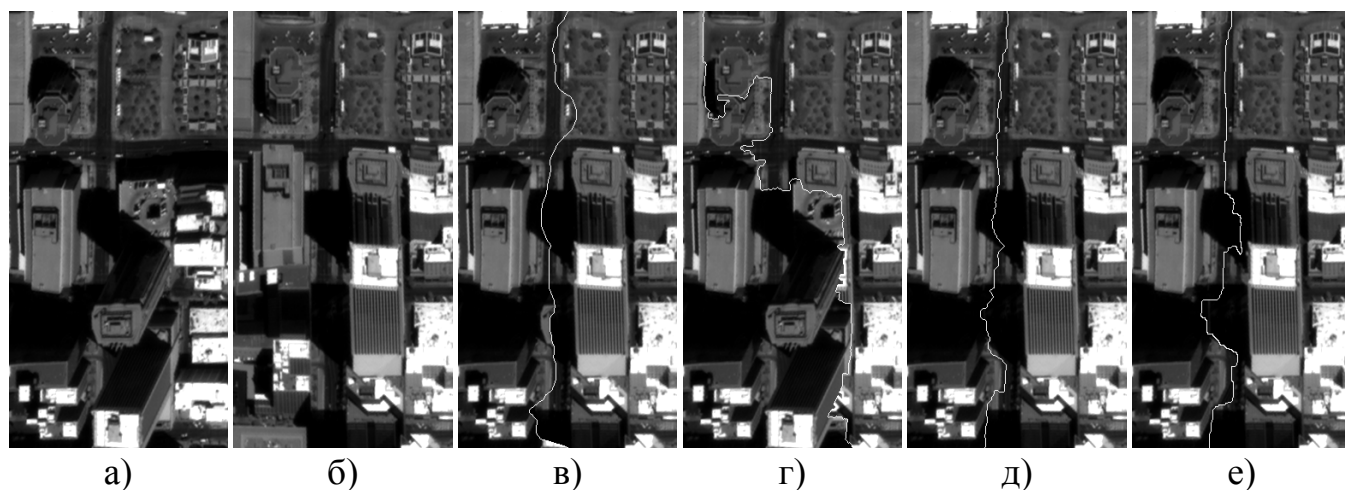


Рисунок 1.6 — Результаты применения алгоритмов проведения линии пореза при значительно различающихся углах визирования в условиях высокой городской застройки: а) фрагмент изображения I_1 ; б) фрагмент изображения I_2 ; в) модель змеи [49]; г) морфологическая композиция изображений [94]; д) метод поиска кратчайшего пути графа [45]; е) метод разреза графа [95]

1.2.8. Алгоритмы автоматического проведения линии пореза позволяют избежать дефектов в области наложения снимков, однако при этом могут вносить собственные дефекты (рис. 1.7). Не определён единый подход к автоматической оценке качества проводимых линий пореза мозаики. В связи с этим ставится задача автоматической оценки качества линии пореза, проведённой автоматическим алгоритмом.

Как было показано ранее, в современной литературе приведён широкий спектр подходов к задаче проведения субоптимальной линии пореза. При прак-

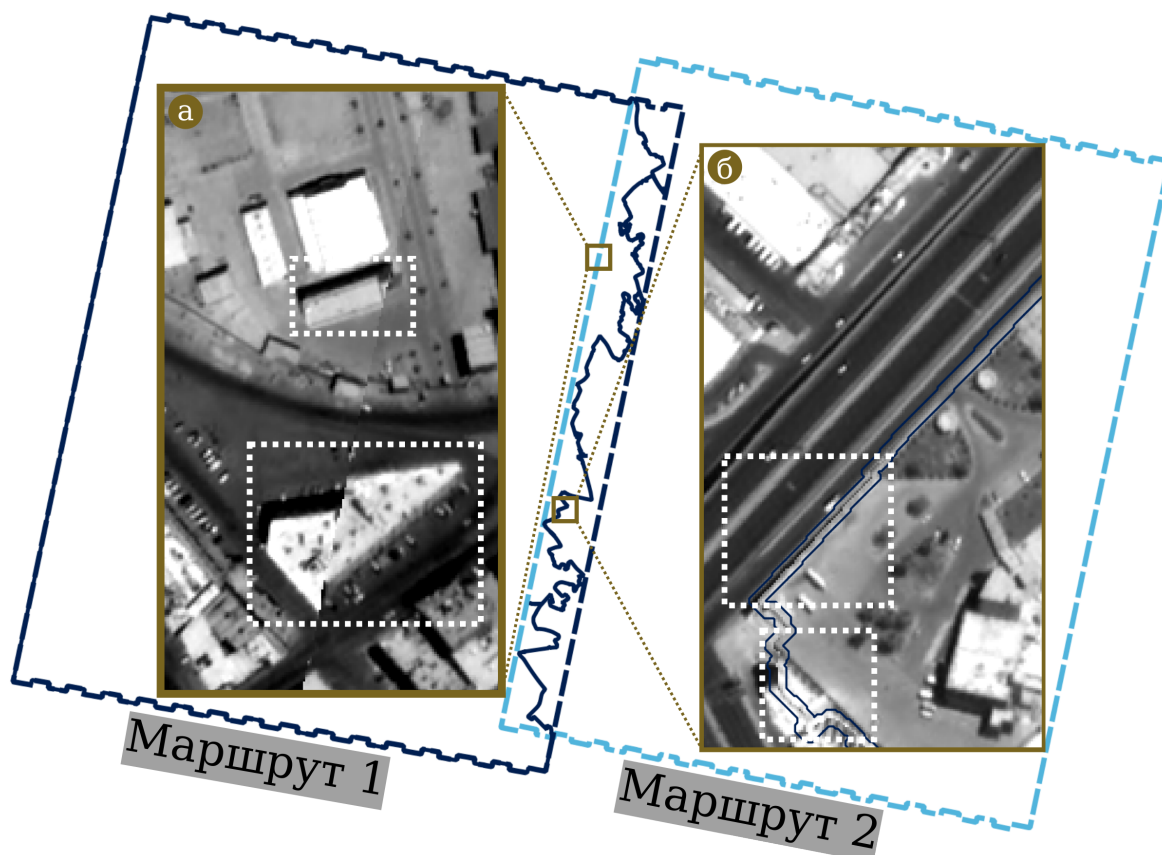


Рисунок 1.7 — Дефекты мозаичных изображений: а — нестыковки объектов, обусловленные изменением угла съёмки, при непосредственном наложении маршрутов в мозаику; б — нестыковки совмещения изображений, обусловленные некачественной линией пореза

тической оценке качества полученных результатов авторы алгоритмов отмечают, что найденные линии пореза соответствуют эвристическим предположениям, положенным в основу разработанных алгоритмов проведения линии пореза. К таким предположениям, например, относятся: следование линии пореза вдоль объектов с «сильными» границами [94]; минимизация пересечения зданий [42] и следование вдоль автомобильных дорог [41], сегментированных свёрточной нейронной сетью и др. Для выполнения сравнительного анализа необходимо использовать показатели оценки качества, не применяемые в процессе проведения линии пореза.

В утратившей силу инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов ГКИНП (ГНТА)–02–036–02 рекомендации к линиям пореза представлены в пункте 4.7 [53]. В частности, предполагается, что линии пореза должны:

- 1) проходить по середине зон перекрытия снимков;
- 2) не пересекать высотные объекты и объекты, служащие ориентирами;

- 3) не проходить вдоль границ объектов разного тона;
- 4) проходить по середине дорог, рек и т. п., или под прямым углом к ним.

В современном ГОСТ Р 70663—2023 [54] представлены унифицированные требования и рекомендации к процессам создания динамических и мозаичных покрытий: отбору данных, формированию, оценке качества. Мозаичное покрытие определяется как «покрытие в виде единого (статичного) изображения, полученного в результате объединения смежных или перекрывающихся маршрутов/сцен дистанционного зондирования Земли». Стандарт систематизирует широкий набор процессов, выполняемых при создании покрытий. В части проведения линий порезов при формировании мозаичных изображений приводятся рекомендации:

- 1) минимизировать число «артефактов изображения (засветы, пропуски пикселей и др.)»;
- 2) минимизировать «резкие изменения яркости на участках, содержащих зону перехода между маршрутами/сценами»;
- 3) минимизировать число «видимых линий сшивки на участках, содержащих зону перехода между маршрутами/сценами»;
- 4) минимизировать попадание «облачности, дымки и иных атмосферных явлений»;
- 5) проводить линию пореза «в зоне наименьших отклонений по геометрической точности и радиометрической яркости».

Следование рекомендациям инструкции и стандарта позволяет получать мозаики, искажения вдоль линий пореза которых минимальны или отсутствуют. Рекомендации могут быть разделены на следующие группы:

- 1) отсутствие искажений сюжета мозаики вдоль линии пореза: пп. 2 и 4 инструкции, пп. 1 и 4 стандарта;
- 2) минимизация видимости визуального перехода вдоль линии пореза: п. 3 инструкции, пп. 2, 3 и 5 стандарта.

Таким образом, необходимо, чтобы алгоритмическое обеспечение оценки качества позволяло получить численное значение, характеризующее степень несоответствия линии пореза требованиям из представленных групп.

В ГОСТ Р 70663—2023 также представлены следующие показатели качества:

- 1) «количество артефактов (общее или удельное)»;
- 2) «величина перепадов яркости между смежными или перекрывающимися маршрутами/сценами»;

- 3) «видимость линии сшивки между маршрутами/сценами»;
- 4) «радиометрическая точность»;
- 5) «геометрическая точность».

При этом в стандарте не указаны строгие методы получения численных оценок этих показателей качества.

Под артефактом (показатель 1) подразумевается «дефект или особенность данных дистанционного зондирования Земли из космоса, которые искажают их радиометрические, пространственно-частотные и координатно-измерительные характеристики» [101]. За показатель количества артефактов можно принять число пересечений линией пореза зданий, объектов, служащих ориентирами, то есть число искажений объектов сюжета, влияющих на координатно-измерительные характеристики мозаики. При условии точной геопривязки мозаики для автоматической оценки показателя может использоваться растеризованная маска антропогенных объектов (зданий, эстакад и др.), полученная из цифровой карты. Под артефактами также могут пониматься значительные изменения структуры и формы объектов сюжета между фрагментами и мозаикой.

Показатели радиометрической и геометрической точности (показатели 4 и 5 соответственно) относятся к фрагментам исходных изображений, входящим в мозаику, и не относятся непосредственно к линии пореза.

На радиометрическую точность (показатель 4) мозаики может повлиять выполнение операции фотометрического выравнивания, преобразующей яркости фрагментов таким образом, чтобы математические ожидания и дисперсии яркостей в общих областях были примерно равны. При соблюдении условия сохранения динамического диапазона яркостей радиометрическая точность не изменяется.

В соответствии с постановкой задачи объединения ортотрансформированных фрагментов, скорректированных в результате блочного уравнивания, они представлены в единой системе координат мозаики. Поэтому геометрическая точность (показатель 5) мозаики по результатам объединения не изменяется.

В работе [55] представлено методическое обеспечение выполнения сравнительного анализа оперативности и качества проведения линий пореза путём внесения искажений в объединяемые фрагменты. Применение подхода позволяет авторам проводить тестирование различных алгоритмов проведения в изолированных условиях и определять субоптимальный алгоритм для дальнейшего применения. Предлагаемый подход не подразумевает дальнейшее использование

полученной оценки качества. В работе [56] авторами используется два критерия независимой оценки качества найденной линии пореза:

- 1) максимальное и среднее значения ошибки геометрического совмещения;
- 2) среднее значение индекса структурного сходства [102].

Среднее значение индекса структурного сходства (Structure SIMilarity, SSIM) является количественной мерой структурной и радиометрической согласованности пары изображений: чем выше значение SSIM, тем менее заметно визуальное различие между изображениями.

1.2.9. В результате проведённого анализа отечественной и зарубежной литературы определены следующие перспективные направления исследований, необходимые для организации унифицированных автоматических алгоритмов формирования мозаичных снимков по материалам площадной съёмки: первое направление — практическая оценка адекватности RPC-модели для данных, получаемых с отечественных КА высокого пространственного разрешения; второе направление — разработка алгоритма фильтрации ОИТ, учитывающего особенности площадной съёмки при значительном изменении угла визирования; третье направление — разработка стабильного блочного уравнивания групп изображений, входящих в мозаику; четвёртое направление — разработка комплекса алгоритмов формирования и оценки качества мозаичных изображений.

1.3 Задачи диссертационного исследования

1.3.1. 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.

Обобщённая схема предлагаемой технологии обработки данных площадной съёмки, объединяющей решение поставленных задач, приведена на рис. 1.8. Этапы технологии соотнесены с Положениями, выносимыми на защиту, и раскрываются в соответствующих главах диссертации.

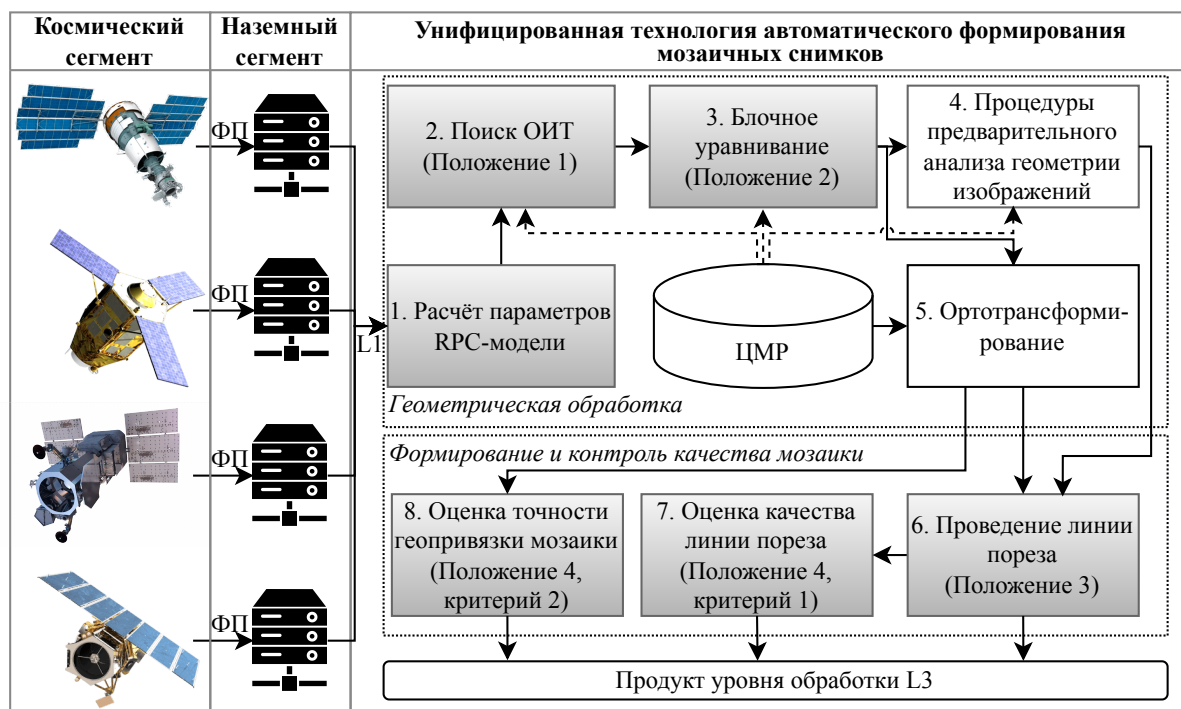


Рисунок 1.8 — Обобщённая схема технологии автоматического формирования мозаичных снимков по материалам площадной съёмки (ФП — файл-поток)

1.3.2. Во второй главе рассмотрены алгоритмы и модели геометрической обработки данных ДЗЗ. Основным фактором, влияющим на качество мозаичных изображений, является точность геопривязки объединяемых снимков, задаваемая моделью съёмки. Перед применением унифицированной RPC-модели съёмки к конкретной съёмочной системе в технологии потоковой обработки необходимо оценить точность аппроксимации строгой модели в фактических условиях работы КА, и выработать рекомендации по применению для информационных продуктов при автоматической обработке.

В условиях требования к оперативности обработки данных необходимы надёжные алгоритмы фильтрации ОИТ, учитывающие специфику площадной съёмки при значительном изменении угла визирования.

Неотъемлемой частью технологии формирования мозаик является процедура блочного уравнивания, входными данными которой являются ОИТ. Необходима выработка математической модели блочного уравнивания, описывающей остаточные невязки, и численно устойчивого алгоритма оптимизации её параметров в отсутствие опорной информации.

1.3.3. В третьей главе исследованы задачи синтеза мозаичных изображений. Получение единого непрерывного кадра по материалам площадной съёмки осуществляется в рамках процедуры геометрического синтеза. Ввиду наличия остаточных деформаций земных объектов вдоль стыка совмещаемых изображений, обусловленных изменением угла съёмки и изменениями в процессе перенацеливания съёмочной аппаратуры, выполняется автоматическое проведение линии пореза с учётом особенностей площадной съёмки.

Для автоматической оценки качества линии пореза необходимо разработать критерий, отражающий следование линией требованиям отраслевых стандартов. Выполнение процедур коррекции модели геопривязки для повышения точности совмещения не должно ухудшать измерительные свойства мозаичного изображения. С целью контроля стабильности алгоритмов обработки актуальна разработка методики оценки точности геопривязки мозаичных изображений.

1.3.4. В четвёртой главе предложены решения технических вопросов, особенности практической реализации предлагаемых алгоритмов в виде программного комплекса обработки данных площадной съёмки. Необходима разработка средств автоматизированной оценки качества мозаичных изображений, которые позволят обеспечить контроль стабильности алгоритмов обработки. Архитектура комплекса должна обеспечивать потоковую обработку данных с возможностью распределённой обработки в составе многосерверных центров. Кроме этого, в главе рассмотрены практические результаты применения технологии на базе предлагаемого математического и программного обеспечения.

Выводы по главе 1

1. Установлено, что для решения задач оперативного высокодетального мониторинга земной поверхности на современных КА оптического наблюдения предусмотрен режим площадной съёмки. Получаемые изображения характеризуются значительным изменением угла визирования, в связи с чем для их высокоточного совмещения необходима разработка специального математического и алгоритмического обеспечения. Показано, что ввиду многообразия КС ДЗЗ текущего состава и появления перспективных аппаратов целесообразна разработка унифицированных алгоритмов обработки материалов съёмки от различных съёмочных систем, входными данными которых являются информационные продукты уровня обработки L1, геопривязанные по RPC-модели съёмки.

2. Определены следующие перспективные направления исследований на основе проанализированной отечественной и зарубежной литературы: первое направление — практическая оценка адекватности RPC-модели для данных, полученных с отечественных КА высокого пространственного разрешения; второе направление — разработка алгоритма фильтрации ОИТ, учитывающего особенности площадной съёмки при значительном изменении угла визирования; третье направление — разработка стабильного блочного уравнивания групп изображений, входящих в мозаику; четвёртое направление — разработка комплекса алгоритмов формирования и оценки качества мозаичных изображений.

3. На основе проведённого анализа отечественной и зарубежной литературы определены четыре направления исследований и сформулированы задачи диссертационной работы, направленные на создание унифицированной технологии оперативного формирования мозаичных изображений по материалам площадной съёмки без привлечения опорной информации.

Глава 2. Модели и алгоритмы геометрической обработки материалов площадной съёмки

2.1 Представление строгой модели съёмки в унифицированном виде

2.1.1. Геодезическая привязка изображений может быть представлена в форме строгой модели в виде расчётных отношений (1.1) или RPC-модели в соответствии с уравнениями (1.3). Строгая модель описывает принципы функционирования съёмочной аппаратуры и позволяет получить наилучшие точностные показатели в результате обработки при условии своевременного выполнения процедур калибровки [21; 24; 59]. Материалы съёмки, сопровождаемые параметрами RPC-модели, используются в качестве исходных данных для унифицированных алгоритмов обработки данных ДЗЗ [103—107]. При этом актуально решение ряда задач для обоснования использования RPC-модели при выполнении прецизионной фотограмметрической обработки на конкретных натуральных данных, а именно необходимо:

- 1) разработать математическое обеспечение оценки точности аппроксимации строгой модели съёмки RPC-моделью;
- 2) на натуральных данных от действующей космической системы ДЗЗ высокодетальной съёмки определить точность аппроксимации строгой модели;
- 3) выработать практические рекомендации по организации высокоточной обработки данных на основе RPC-модели съёмки.

2.1.2. Определим невязку в строчном и кадровом направлении RPC-модели (1.3) относительно строгой модели съёмки (1.1). Пусть дана точка на изображении $I_k(m, n)$ с растровыми координатами (m, n) и высотой H , в соответствии с (1.1) рассчитаем её геодезические координаты (B, L) . Тогда невязки в кадровом направлении определяются как,

$$\Delta m = P_k(B, L, H) - m, \quad (2.1)$$

а в строчном как,

$$\Delta n = R_k(B, L, H) - n. \quad (2.2)$$

Задача поиска неизвестных коэффициентов RPC-модели (1.6) для изображения $I_k(m,n)$ сводится к минимизации невязок в строчном и кадровом направлениях между строгой моделью съёмки и RPC-моделью.

Для этого на исходном изображении сформируем регулярную сетку точек $(m_{i,j}, n_{i,j})$, $i = \overline{1, \mathcal{I}}$, $j = \overline{1, \mathcal{J}}$ (рис. 2.1). Число точек должно быть не меньше числа искомых коэффициентов, $\mathcal{I} \times \mathcal{J} \geq 78$. С использованием строгой модели (1.1) для различных значений высоты H_τ , $\tau = \overline{1, T}$, рассчитаем геодезические координаты пикселей $(B_{i,j,\tau}, L_{i,j,\tau})$. Диапазон высот от минимального до максимального значения выберем из ЦМР, соответствующей обрабатываемому снимку, число слоёв сетки $T = 10$ будем задавать с учётом рекомендаций, изложенных в [25].

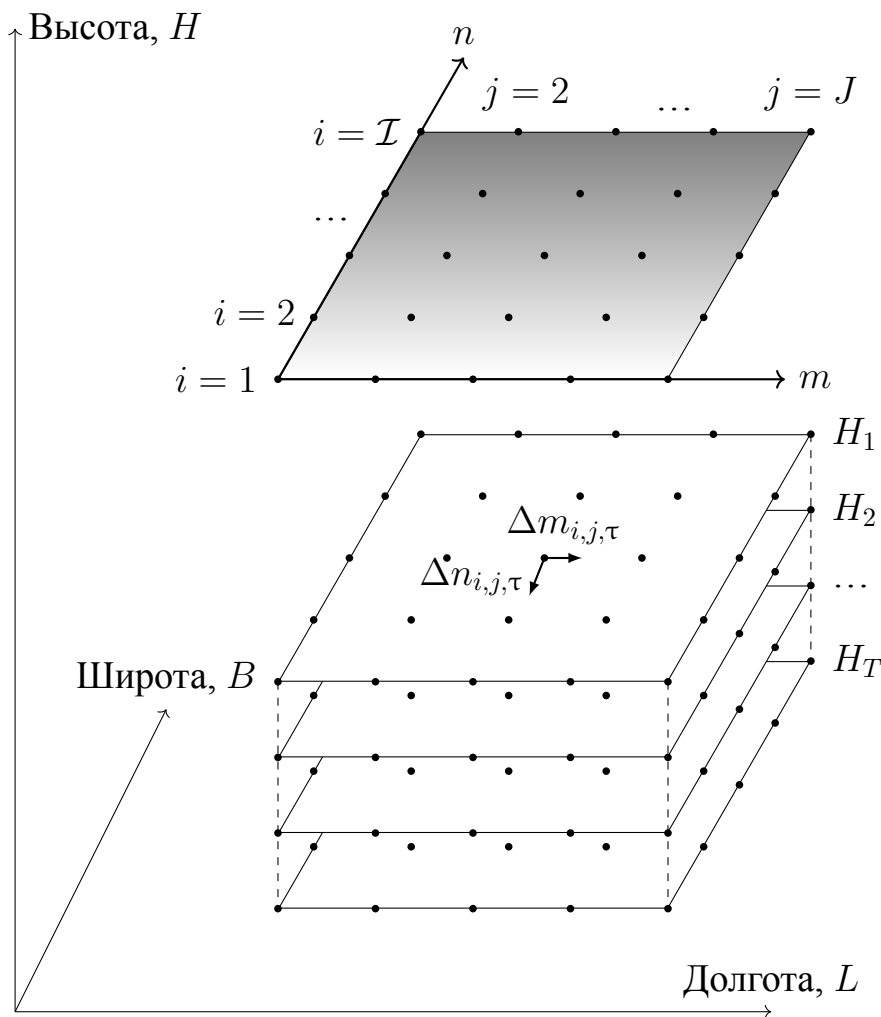


Рисунок 2.1 — Подготовка исходных данных для расчёта RPC-модели изображения

Тогда соответствующие задачи минимизации для расчёта коэффициентов $\mathbf{c}_k, \mathbf{d}_k$ RPC-модели изображения $I_k(m,n)$ определим через сумму квадратов невя-

зок в кадровом направлении,

$$\sum_{i,j,\tau} [\Delta m_{i,j,\tau}]^2 \rightarrow \min_{\mathbf{c}_k, \mathbf{d}_k} \quad (2.3)$$

а коэффициентов $\mathbf{e}_k, \mathbf{f}_k$ — через сумму квадратов невязок в строчном направлении,

$$\sum_{i,j,\tau} [\Delta n_{i,j,\tau}]^2 \rightarrow \min_{\mathbf{e}_k, \mathbf{f}_k} \quad (2.4)$$

При этом минимизация сумм квадратов (2.1) и (2.2) может быть осуществлена независимо друг от друга. Рассмотрим задачу минимизации невязок в строчном направлении для поиска соответствующих коэффициентов.

Для минимизации (2.4) систему уравнений невязок в строчном направлении представим в матричной форме. Ввиду того, что решение задачи выполняется одновременно только для изображения $I_k(m,n)$, в дальнейших обозначениях индекс k опустим. Сформируем вектор невязок в кадровом направлении,

$$\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_p \ \dots \ v_\psi], \quad \psi = IJT, \quad (2.5)$$

элемент которого с индексом $p = (\tau - 1)IJ + (j - 1)I + i$ соответствует невязке $\Delta m_{i,j,\tau}$. Тогда система уравнений невязок в матричной форме будет выглядеть как

$$\mathbf{v} = \mathbf{WGC} - \mathbf{WM}, \quad (2.6)$$

где

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & W_\psi \end{bmatrix}, \quad W_p = \frac{1}{\mathbf{d}^\top \mathbf{u}_p}; \quad (2.7)$$

\mathbf{u}_p — вектор нормированных координат (1.4) точки сетки с индексом $p = \overline{1, \psi}$;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{H}_1 & \tilde{L}_1 & \tilde{B}_1 & \dots & \tilde{L}_1^3 & \tilde{B}_1^3 & -\tilde{m}_1 \tilde{H}_1 & -\tilde{m}_1 \tilde{L}_1 & \dots & -\tilde{m}_1 \tilde{L}_1^3 & -\tilde{m}_1 \tilde{B}_1^3 \\ 1 & \tilde{H}_2 & \tilde{L}_2 & \tilde{B}_2 & \dots & \tilde{L}_2^3 & \tilde{B}_2^3 & -\tilde{m}_2 \tilde{H}_2 & -\tilde{m}_2 \tilde{L}_2 & \dots & -\tilde{m}_2 \tilde{L}_2^3 & -\tilde{m}_2 \tilde{B}_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \tilde{H}_\psi & \tilde{L}_\psi & \tilde{B}_\psi & \dots & \tilde{L}_\psi^3 & \tilde{B}_\psi^3 & -\tilde{m}_\psi \tilde{H}_\psi & -\tilde{m}_\psi \tilde{L}_\psi & \dots & -\tilde{m}_\psi \tilde{L}_\psi^3 & -\tilde{m}_\psi \tilde{B}_\psi^3 \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

$$\tilde{m} = \frac{m - m_{\text{off}}}{m_{\text{scale}}}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{c} \ \mathbf{d}]^\top, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \tilde{m}_1 \\ \tilde{m}_2 \\ \vdots \\ \tilde{m}_\psi \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Тогда система нормальных уравнений для последующего решения при помощи метода наименьших квадратов [108] может быть представлена как

$$\mathbf{G}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{G} \mathbf{C} - \mathbf{G}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{M} = 0. \quad (2.10)$$

На основе системы (2.10) выполним итерационное нахождение коэффициентов \mathbf{C} . Для этого начальное приближение \mathbf{C} вычислим представив матрицу \mathbf{W}^2 единичной, то есть

$$\mathbf{C} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{M}. \quad (2.11)$$

Затем итеративно выполним уточнение коэффициентов \mathbf{C} системы уравнений (2.10). На очередной итерации s решение системы $\mathbf{C}^{(s)}$ используем для получения матрицы $\mathbf{W}^{(s)}$ в соответствии с выражением (2.7). Коэффициенты находим до тех пор, пока разница невязок между двумя итерациями не будет меньше некоторого порога, то есть,

$$\forall p \in \{1, 2, \dots, \Psi\}, \quad \left| v_p^{(s)} - v_p^{(s-1)} \right| < v_{\max}, \quad (2.12)$$

где $v_p^{(s)}$, $v_p^{(s-1)}$ — взвешенные невязки на итерациях (s) и $(s-1)$ соответственно; v_{\max} — пороговое значение суммы невязок между итерациями.

Аналогично выполняется поиск коэффициентов RPC-модели в строчном направлении, а именно векторов \mathbf{e}_k и \mathbf{f}_k . Таким образом, в результате двух итерационных процессов поиска получим искомые векторы \mathbf{c}_k , \mathbf{d}_k , \mathbf{e}_k и \mathbf{f}_k уравнений (1.3).

2.1.3. Для оценки точности аппроксимации строгой модели RPC-моделью выполним расчёт коэффициентов для ряда натуральных изображений с космических аппаратов серии «Ресурс-П» уровней обработки L1 и L2A [109]. Съёмочная аппаратура спутников серии «Ресурс-П» представлена датчиком «Геотон» с полосой захвата 38 км и пространственным разрешением 0,7 м [110], камерой высокого разрешения КШМСА-ВР с полосой захвата 96 км и пространственным разрешением 12 м и камерой среднего разрешения КШМСА-СР с полосой захвата 480 км и пространственным разрешением 60 м [61]. С использованием полученных в результате аппроксимации коэффициентов рассчитаем невязки в строчном и кадровом направлении в соответствии с (2.1) и (2.2). Для каждого изображения k получим следующие статистические оценки:

– среднеквадратическую ошибку невязок в кадровом направлении

$$\overline{\sigma}_k^{(m)} = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{I} \mathcal{J} \mathcal{T}} \sum_{i,j,\tau} [\Delta m_{i,j,\tau}]^2}; \quad (2.13)$$

- среднеквадратическую ошибку невязок в строчном направлении

$$\bar{\sigma}_k^{(n)} = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{I}JT} \sum_{i,j,\tau} [\Delta n_{i,j,\tau}]^2}; \quad (2.14)$$

- среднеквадратическую ошибку вектора невязок

$$\bar{\sigma}_k^{(m,n)} = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{I}JT} \sum_{i,j,\tau} [(\Delta m_{i,j,\tau})^2 + (\Delta n_{i,j,\tau})^2]}; \quad (2.15)$$

- максимальную суммарную невязку каждой точки сетки аппроксимации

$$E_k = \sqrt{\max_{i,j,\tau} [(\Delta m_{i,j,\tau})^2 + (\Delta n_{i,j,\tau})^2]}. \quad (2.16)$$

Спутник во время съёмки совершает угловое движение для обеспечения возможности наблюдения заданных территорий под различным азимутом, компенсации вращения Земли и сохранения пространственного разрешения видеоданных. Поэтому для проведения полнофакторного эксперимента были привлечены маршруты, снятые в режимах объектовой, азимутальной и стереосъёмки при различных значениях угловой скорости и движения КА (таблица 3).

Всего для анализа использовалось: 54 маршрута от датчика «Геотон» с продолжительностью съёмки 4–16 с; 68 маршрутов от КШМСА-ВР — 9–300 с; 70 маршрутов от КШМСА-СР — 11–300 с. При расчёте коэффициентов RPC-модели минимальное и максимальное значения высоты в рамках экспериментов установим для всех маршрутов равными 0 м и 1000 м соответственно. Для каждого типа датчика рассчитываются оценки (2.13) — (2.16) по всем изображениям уровня обработки L1 и L2A. Затем выполняется усреднение по числу маршрутов K , вычисляются интегральные оценки, а именно:

- среднее значение среднеквадратической ошибки вектора невязок

$$\langle \bar{\sigma}^{(m,n)} \rangle = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{\sigma}_k^{(m,n)}; \quad (2.17)$$

- максимальная ошибка аппроксимации по маршрутам

$$E_{\max} = \max_{k=1, K} \{ E_{(k)} \}. \quad (2.18)$$

Рассмотрим распределения статистических оценок (2.13) — (2.16) аппроксимации строгой модели RPC-моделью в зависимости от протяжённости маршрута \mathcal{L} для каждого датчика «Геотон». На уровне обработки L1 наиболее выражено

Таблица 3 — Ошибки аппроксимации строгой модели съёмки RPC-моделью по данным с КА серии «Ресурс-П», усреднённые по числу маршрутов

Тип датчика	Число маршрутов	Диапазон угловых скоростей по осям, °/с	Среднее значение среднеквадратической ошибки вектора невязок $\langle \bar{\sigma}^{(m,n)} \rangle$, пикс		Максимальная ошибка аппроксимации по маршрутам E_{\max} , пикс	
			Уровень обработки L1	Уровень обработки L2A	Уровень обработки L1	Уровень обработки L2A
«Геотон»	54	$x : -1,156.. + 0,580$ $y : -0,044.. + 0,229$ $z : -0,295.. + 0,161$	2,0344	0,0068	33,2599	0,0632
КШМСА-ВР	68	$x : -0,566.. + 0,315$ $y : -0,268.. + 0,155$ $z : -0,536.. + 0,561$	1,1339	0,0006	32,1822	0,0046
КШМСА-СР	70	$x : -0,292.. + 0,287$ $y : -0,133.. + 0,128$ $z : -0,536.. + 0,072$	1,9295	0,0151	22,9169	0,1235

различие распределений значений невязок в строчном и кадровом направлениях: $\bar{\sigma}_k^{(n)}$ систематически превышает $\bar{\sigma}_k^{(m)}$ (рис. 2.2а), при этом отдельные выбросы в строчном направлении достигают 12 пикс., в кадровом — 16 пикс.; а вектора невязок $\bar{\sigma}_k^{(m,n)}$ — 19 пикс. (рис. 2.2б). Пиковые значения максимальной суммарной невязки E_k достигают 35 пикс. (рис. 2.2в). Характерно, что выбросы сосредоточены в диапазоне малых значений длины сцены $\mathcal{L} \in [40, 55]$. Выраженное различие в характере распределений невязок в строчном и кадровом направлениях типично для ПЗС-линеек высокого разрешения и обусловлено более высокой чувствительностью к ошибкам определения ориентации вдоль направления полёта [36]. Невязки на уровне обработки L2A составляют порядка $1 \cdot 10^{-6}$ пикс. Различие между распределениями невязок в строчном и кадровом направлении не наблюдается (рис. 2.2г,д), а единичные выбросы не носят системного характера. Такая высокая точность объясняется тем, что для высокодетальной системы с узкой полосой захвата трансформирование на среднюю высоту не вносит существенных геометрических искажений и позволяет нивелировать влияние сложного углового движения на точность аппроксимации.

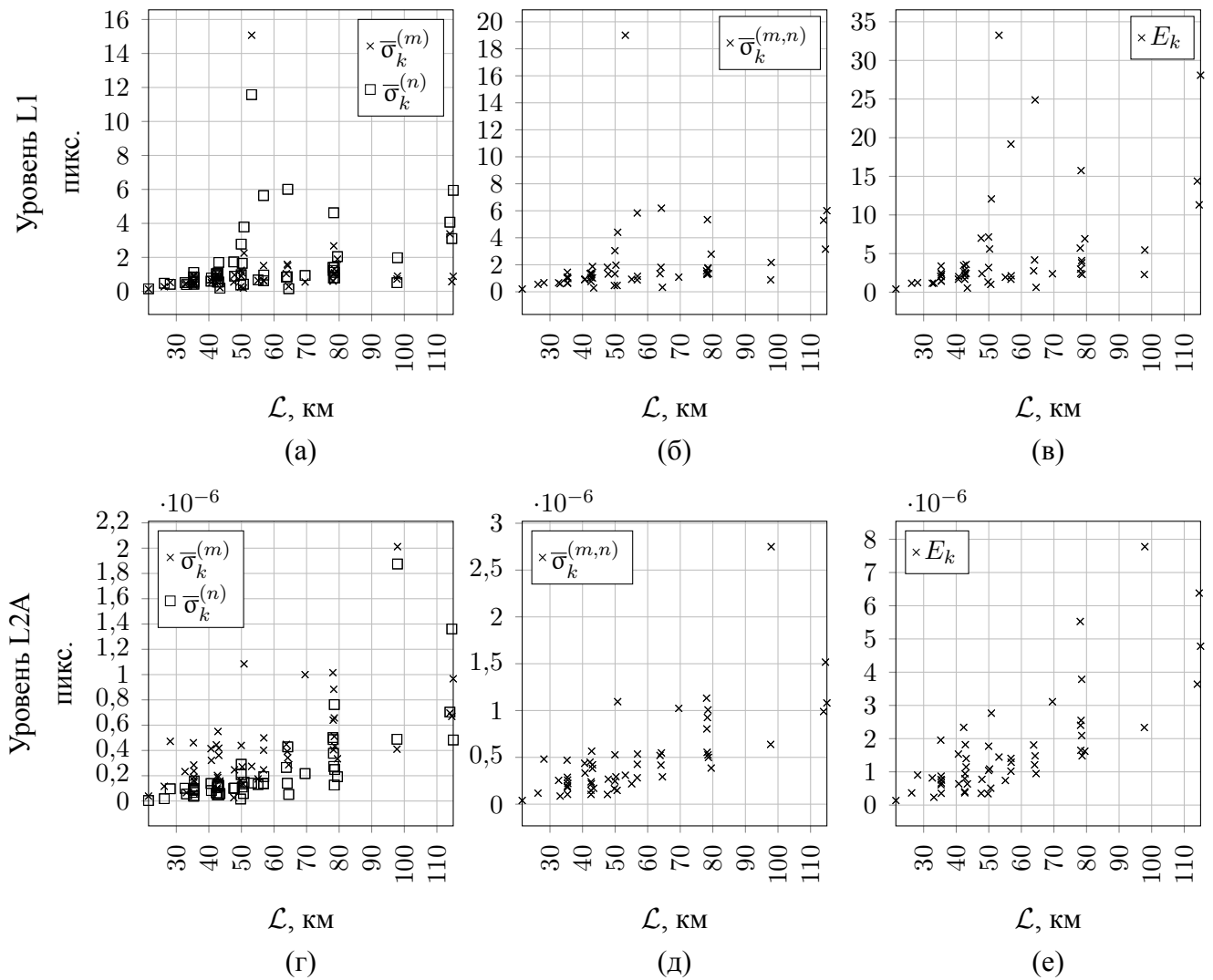


Рисунок 2.2 — Распределения статистических оценок (2.13) — (2.16) аппроксимации строгой модели RPC-моделью маршрутов от датчика «Геотон» серии КА «Ресурс-П»

2.1.4. На основе представленных в таблице 3 данных и графиков распределения вычисленных статистических оценок от протяженности маршрута \mathcal{L} (рис. 2.2) сформулированы следующие выводы.

1. Для снимков уровня обработки L1 не обеспечивается высокоточная аппроксимация строгой модели съёмки RPC-моделью. Причина состоит в том, что на снимках этого уровня обработки присутствуют высокочастотные геометрические искажения, вызванные угловым движением спутника, которые не описываются RPC-моделью. Такие искажения характерны для протяженных маршрутов съёмки и маршрутов, снятых в азимутальном режиме наблюдения земной поверхности.

2. На изображениях уровня обработки L2A скорректированы все высокочастотные геометрические искажения, а RPC-модель этого уровня обработки аппроксимирует строгую модель с высокой точностью. Применение продуктов уровня обработки L2A позволяет использовать материалы съёмки в унифицированных алгоритмах обработки с точностными характеристиками на уровне строгой модели съёмки. Изображения уровня обработки L2A формируются в картографической проекции путём трансформирования из системы координат виртуального сканирующего устройства (СКВСУ). Поскольку ориентация СКВСУ в общем случае не совпадает с направлениями осей картографической проекции, результирующая сцена оказывается повёрнутой относительно строк и столбцов выходного растра. Таким образом, недостатками приведения к уровню обработки L2A являются 1) увеличенный на 10–25 % объём изображения; 2) дополнительная передискретизация растра изображения.

3. Обработка изображений уровня L1 может выполняться с фрагментированием на условные кадры. Суть подхода заключается в разбиении изображения, представленного в системе координат виртуального сканирующего устройства, в строчном направлении на ряд областей. Области формируются с частичным перекрытием, что обеспечивает согласованность геометрической модели на границах соседних фрагментов для организации дальнейшего совмещения. Длина фрагмента в строчном направлении выбирается исходя из требований к точности аппроксимации, ширина соответствует полной ширине изображения уровня обработки L1. Для каждой области независимо вычисляется собственный набор параметров RPC-модели на основе аппроксимации связи между координатами местности и координатами изображения в пределах данного фрагмента. После вычисления коэффициентов исходное изображение фрагментируется в соответствии с заданными областями, и каждому фрагменту сопоставляется соответствующий набор параметров RPC-модели.

2.2 Алгоритм фильтрации одноимённых точек на основе предобработки их областей с использованием методов искусственного интеллекта

2.2.1. В современной литературе глубоко рассмотрены вопросы эффективного поиска и описания ключевых точек, их дальнейшего сопоставления

для формирования пары одноимённых точек. При этом по результатам практического применения предлагаемых авторами подходов на материалах площадной съёмки, геопривязанных по RPC-модели, обнаруживаются некорректные сопоставления. Некорректные сопоставления обуславливаются следующими особенностями входных данных:

- 1) параллактические искажения сюжета. Например, для пары изображений площадной съёмки с углом конвергенции 50° ошибка совмещения объекта земной поверхности с высотой 30 м составит $30 \text{ м} \cdot \text{tg} \left(\frac{50^\circ}{2} \right) \approx 13,99 \text{ м}$. Геометрический тест с одним пороговым значением, лежащий в основе алгоритмов отбраковки (например, RANSAC [34]), не позволяет отличить неправильные соответствия. Если порог слишком низкий для отбраковки рассогласований объектов на поверхности Земли, он также отсеивает корректные соответствия на высотных объектах; если порог достаточно высокий, чтобы сохранить корректные совпадения, он допускает появление ошибочных соответствий точек местности;
- 2) окклюзии. Зона несоответствия сюжета между двумя изображениями для высотного объекта из примера составит $2 \cdot 13,99 \text{ м}$. Фасад объекта на одном изображении может быть перекрыт самим объектом на другом изображении, а детали, которые остаются видимыми, демонстрируют принципиально различный сюжет. Масштабно-инвариантные дескрипторы (например, SIFT [29] или SURF [30]), хотя и устойчивы к умеренным изменениям угла наблюдения на плоских поверхностях, не могут компенсировать подобные структурные различия;
- 3) точность модели геопривязки в условиях сложного углового движения. Как показано ранее, на уровне обработки L1 RPC-модель может содержать ошибки аппроксимации, обусловленные угловым движением аппарата при выполнении съёмки в площадном режиме. Эти ошибки приводят в том числе к взаимным рассогласованиям (смещениям) одноимённых объектов. Эти смещения составляют предельное значение невязок одноимённых объектов, которые различаются между парами изображений и неизвестны априори. Пороговые подходы отбраковки ожидают в качестве входных данных значение, основанное на смещениях изображения;
- 4) сложность описания скалярным значением меры сходства точек. Алгоритм RANSAC и его варианты классифицируют каждое соответствие

по одному скалярному значению — геометрическим невязкам относительно построенной модели соответствия. При этом не учитываются: качество дескриптора, согласованность масштаба, и геометрическая конфигурация модели съёмки. Соответствие пары точек со значением невязок выше порога и высокой степенью совпадения дескрипторов может быть отклонено, в то время как соответствие пары с малым значением невязок, но некачественными дескрипторами (случайное геометрическое совпадение несвязанных особенностей) может быть принято за корректную пару точек.

Входными данными для процедуры поиска являются изображения земной поверхности. В условиях требований высокой степени надёжности и автоматизации процедуры поиска одноимённых точек при формировании мозаичных изображений в темпе поступления данных целесообразно привлечение имеющейся дополнительной информации, а именно моделей съёмки и цифровой модели рельефа. Таким образом, для выработки нового решения задачи надёжного поиска ОИТ на изображениях площадной съёмки необходимо определить адаптивную процедуру, нивелирующую недостаток высокой чувствительности существующих подходов к отбраковке некорректно сопоставленных пар точек. Отбраковка пар ключевых точек может быть сведена к задаче бинарной классификации [111—113] для определения корректности сопоставления.

В этой связи в рамках настоящего раздела необходимо:

- 1) выполнить постановку задачи фильтрации одноимённых точек как бинарной задачи классификации;
- 2) выработать признаковое описание [114] ключевых точек, дополнительно характеризующее окрестности точек;
- 3) разработать подход к извлечению предварительных меток классов для классификации;
- 4) рассмотреть аспекты применения метода опорных векторов и повышения качества классификации для получения надёжных результатов сопоставления в автоматическом режиме;
- 5) разработать алгоритм фильтрации одноимённых точек с использованием методов искусственного интеллекта.

2.2.2. Рассмотрим два изображения уровня обработки L1 земной поверхности высокого пространственного разрешения $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$, характеризуемые размерами $M_k \times N_k$ и $M_{k+1} \times N_{k+1}$. Изображения сопровождаются

RPC-моделями съёмки (1.3), то есть функциями P_k , R_k и P_{k+1} , R_{k+1} соответственно. Необходимо найти множество \mathcal{X} одноимённых точек, определяемое как

$$\mathcal{X} = \{q = \overline{1, Q_k} : ((m_{k,q}, n_{k,q}), (m_{k+1,q}, n_{k+1,q}))\}, \quad (2.19)$$

где Q_k — число ОИТ на паре исходных изображений $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$.

Поиск множества одноимённых точек традиционно сводится к выполнению следующей последовательности действий:

- 1) поиск упорядоченных множеств \mathcal{A}_k и \mathcal{A}_{k+1} ключевых точек, отвечающих требованиям [91], на изображениях $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ соответственно, которые обозначим как

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_k &= \{(\tilde{m}_{k,1}, \tilde{n}_{k,1}), (\tilde{m}_{k,2}, \tilde{n}_{k,2}), \dots\}, \\ \mathcal{A}_{k+1} &= \{(\tilde{m}_{k+1,1}, \tilde{n}_{k+1,1}), (\tilde{m}_{k+1,2}, \tilde{n}_{k+1,2}), \dots\}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Дескриптор ключевой точки на изображении $I_k(m, n)$ с координатами $(\tilde{m}_{k,i}, \tilde{n}_{k,i})$ определим как

$$\tilde{\mathcal{K}}_{k,i} = \mathcal{H}(\tilde{m}_{k,i}, \tilde{n}_{k,i}) \quad (2.21)$$

где $\mathcal{H}(\cdot)$ — функция расчёта дескриптора ключевой точки. Тогда упорядоченные множества дескрипторов для элементов множеств \mathcal{A}_k и \mathcal{A}_{k+1} обозначим как

$$\begin{aligned} \tilde{\Upsilon}_k &= \{i = \overline{1, |\mathcal{A}_k|} : \mathcal{H}(\tilde{m}_{k,i}, \tilde{n}_{k,i})\}, \\ \tilde{\Upsilon}_{k+1} &= \{i = \overline{1, |\mathcal{A}_{k+1}|} : \mathcal{H}(\tilde{m}_{k+1,i}, \tilde{n}_{k+1,i})\}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где $|\cdot|$ — мощность множества;

- 2) сопоставление ключевых точек по близости векторов дескрипторов, в результате которого формируется упорядоченное множество \mathcal{B} пар ключевых точек двух изображений, для которых соответствующие дескрипторы являются близкими согласно выбранной метрике в пространстве дескрипторов, то есть

$$\mathcal{B} = \left\{ i = \overline{1, |\mathcal{A}_k|}, j = \mathcal{N}^{(1)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k,i}, \tilde{\Upsilon}_{k+1}) : ((\tilde{m}_{k,i}, \tilde{n}_{k,i}), (\tilde{m}_{k+1,j}, \tilde{n}_{k+1,j})) \right\}, \quad (2.23)$$

где $\mathcal{N}^{(b)}(a, A)$ — функция, возвращающая индекс j такого элемента $A_j \in A$, что A_j является b -м ближайшим к a -му элементом множества A по евклидову расстоянию;

- 3) получение упорядоченного множества \mathcal{X} одноимённых точек в результате отбраковки некоторым классификатором

$$\mathcal{X} = \left\{ q = \overline{1, |\mathcal{B}|}, f(\mathbf{z}_{k,q}) = 1 : ((m_{k,q}, n_{k,q}), (m_{k+1,q}, n_{k+1,q})) \right\}, \quad (2.24)$$

$$\mathbf{z}_{k,q} = \mathcal{O}((m_{k,q}, n_{k,q}), (m_{k+1,q}, n_{k+1,q})),$$

где $f(\cdot)$ — функция-классификатор, возвращающая значение «+1» для пары ключевых точек, если сопоставление выполнено корректно, иначе значение «−1»; $\mathbf{z}_{k,q}$ — вектор признаков для пары ключевых точек с соответствующими координатами $(m_{k,q}, n_{k,q})$ и $(m_{k+1,q}, n_{k+1,q})$, рассчитанных функцией $\mathcal{O}(\cdot)$.

Таким образом, для привлечения дополнительной информации, позволяющей учитывать особенности режима площадной съёмки необходимо разработать признаковое описание пары ключевых точек в виде функции \mathcal{O} , а также классификатор f .

2.2.3. Для каждой пары из множества \mathcal{B} растровых координат ключевых точек $(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q})$ и $(\tilde{m}_{k+1,q}, \tilde{n}_{k+1,q})$, $q = \overline{1, |\mathcal{B}|}$, введем компоненты вектора признаков $\mathbf{z}_{k,q} = \begin{bmatrix} z_{k,q}^{(1)} & z_{k,q}^{(2)} & \dots \end{bmatrix}$, а именно:

- 1) тест отношения ближайших дескрипторов (Lowe's Ratio Test) [29] на изображении $I_{k+1}(m,n)$ для дескриптора на изображении $I_k(m,n)$,

$$z_{k,q}^{(1)} = \frac{\left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k,q} - \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q'} \right\|_2}{\left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k,q} - \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q''} \right\|_2}, \quad (2.25)$$

$$q' = \mathcal{N}^{(1)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k,q}, \tilde{\Upsilon}_{k+1}), \quad q'' = \mathcal{N}^{(2)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k,q}, \tilde{\Upsilon}_{k+1}),$$

где $\|\cdot\|_2$ — L2 норма вектора; $\tilde{\Upsilon}_{k+1}$ — множество дескрипторов ключевых точек изображения $I_{k+1}(m,n)$, определённое ранее по множеству \mathcal{A}_{k+1} ;

- 2) тест отношения ближайших дескрипторов на изображении $I_k(m,n)$ для дескриптора на изображении $I_{k+1}(m,n)$

$$z_{k,q}^{(2)} = \frac{\left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q} - \tilde{\mathcal{K}}_{k,q'} \right\|_2}{\left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q} - \tilde{\mathcal{K}}_{k,q''} \right\|_2}, \quad (2.26)$$

$$q' = \mathcal{N}^{(1)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q}, \tilde{\Upsilon}_k), \quad q'' = \mathcal{N}^{(2)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q}, \tilde{\Upsilon}_k),$$

- 3) соответствие ближайших дескрипторов на изображениях

$$z_{k,q}^{(3)} = \left[\mathcal{N}^{(1)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q'}, \tilde{\Upsilon}_k) = q \right], \quad q' = \mathcal{N}^{(1)}(\tilde{\mathcal{K}}_{k,q}, \tilde{\Upsilon}_{k+1}), \quad (2.27)$$

где $[\cdot]$ — скобка Айверсона, принимающая значение «1», если логическое выражение истинно, иначе — значение «0»;

- 4) расстояние между дескрипторами пары

$$z_{k,q}^{(4)} = \left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k,q} - \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q} \right\|_2; \quad (2.28)$$

- 5) доля расстояний между дескрипторами пары точек, меньших или равных расстоянию текущей пары

$$z_{k,q}^{(5)} = \frac{\left| \left\{ i = \overline{1, |\mathcal{B}|} : \left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k,i} - \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,i} \right\|_2 \leq \left\| \tilde{\mathcal{K}}_{k,q} - \tilde{\mathcal{K}}_{k+1,q} \right\|_2 \right\} \right|}{|\mathcal{B}|}; \quad (2.29)$$

- 6) отклонение масштабного отношения дескрипторов от отношения пространственных разрешений в окрестности ключевых точек,

$$z_{k,q}^{(6)} = \left| \log \frac{\sigma_{k,q}}{\sigma_{k+1,q}} - \log \frac{G_k(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q})}{G_{k+1}(\tilde{m}_{k+1,q}, \tilde{n}_{k+1,q})} \right|, \quad (2.30)$$

где $\sigma_{k,q}$, $\sigma_{k+1,q}$ — масштабы q -й ключевой точки на изображениях $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$ соответственно; $G_k(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q})$ — пространственное разрешение пикселя изображения $I_k(m,n)$ с координатами $(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q})$, рассчитанное по якобиану RPC-модели;

- 7) угол разницы ориентации векторов градиента SIFT ключевых точек

$$z_{k,q}^{(7)} = |\theta_{k,q} - \theta_{k+1,q}|, \quad (2.31)$$

где $\theta_{k,q}$, $\theta_{k+1,q}$ — углы ориентации градиентов дескрипторов q -й ключевой точки на изображении $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$ соответственно;

- 8) отклонение вектора смещения пары ключевых точек от локально интерполированного поля смещений,

$$z_{k,q}^{(8)} = \left\| \Delta_q - \hat{\Delta}_q \right\|_2, \quad (2.32)$$

$$\Delta_q = (\tilde{m}_{k+1,q} - \tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k+1,q} - \tilde{n}_{k,q}),$$

$$\hat{\Delta}_q = \frac{\sum_{j \in \mathcal{S}_k(q)} w_j \Delta_j}{\sum_{j \in \mathcal{S}_k(q)} w_j}, \quad w_j = \frac{1}{\left\| (\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}) - (\tilde{m}_{k,j}, \tilde{n}_{k,j}) \right\|_2 + \varepsilon},$$

$$\mathcal{S}_k(q) = \left\{ p = \overline{1, 6} : \mathcal{N}^{(p)} \left((\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}), \tilde{\mathcal{C}}_k \right) \right\},$$

$$\tilde{\mathcal{C}}_k = \left\{ q = \overline{1, |\mathcal{B}|} : (\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}) \right\},$$

где Δ_q — вектор смещения q -й пары ключевых точек; $\hat{\Delta}_q$ — локальная оценка смещения, полученная средневзвешенным по обратному расстоянию; $\tilde{\mathcal{C}}_k$ — множество растровых координат ключевых точек из \mathcal{B} на изображении $I_k(m, n)$; ε — малая константа для избежания деления на ноль;

- 9) локальная плотность пар — число пар ключевых точек в окрестности радиуса r на изображении $I_k(m, n)$

$$\begin{aligned} z_{k,q}^{(9)} &= \left| \left\{ j = \overline{1, |\mathcal{B}|} : \|(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}) - (\tilde{m}_{k,j}, \tilde{n}_{k,j})\|_2 < r \right\} \right|, \\ r &= 3 \cdot \text{med} \left(\left\{ q = \overline{1, |\mathcal{B}|} : d_{k,q} \right\} \right), \\ d_{k,q} &= \|(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}) - (\tilde{m}_{k,q'}, \tilde{n}_{k,q'})\|_2, \\ q' &= \mathcal{N}^{(1)} \left((\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}), \tilde{\mathcal{C}}_k \setminus \{(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q})\} \right), \end{aligned} \quad (2.33)$$

где $\text{med}(\cdot)$ — медиана множества; $d_{k,q}$ — расстояние от q -й точки до ближайшей соседней в $\tilde{\mathcal{C}}_k$;

- 10) минимальный отклик детектора ключевых точек в паре — надёжность пары ограничена более слабой ключевой точкой,

$$z_{k,q}^{(10)} = \min (|\text{DoG}(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q}, \sigma_{k,q})|, |\text{DoG}(\tilde{m}_{k+1,q}, \tilde{n}_{k+1,q}, \sigma_{k+1,q})|), \quad (2.34)$$

где $\text{DoG}(m, n, \sigma)$ — отклик разности гауссианов [29] в точке (m, n) на масштабе σ ; $\sigma_{k,q}$, $\sigma_{k+1,q}$ — масштабы q -й ключевой точки на изображениях $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ соответственно;

- 11) отклонение угла конвергенции — отличие локального угла между лучами визирования от глобального угла конвергенции пары изображений,

$$\begin{aligned} z_{k,q}^{(11)} &= |\alpha_q - \alpha_0|, \\ \alpha_q &= \arccos(\mathbf{v}_{k,q} \cdot \mathbf{v}_{k+1,q}), \quad \alpha_0 = \arccos\left(\mathbf{v}_k^{(c)} \cdot \mathbf{v}_{k+1}^{(c)}\right), \end{aligned} \quad (2.35)$$

где α_q — локальный угол конвергенции для q -й пары точек; α_0 — глобальный угол конвергенции, рассчитанный в центрах изображений; $\mathbf{v}_{k,q}$ — единичный вектор луча визирования q -й ключевой точки на изображении $I_k(m, n)$ [115]; $\mathbf{v}_k^{(c)}$, $\mathbf{v}_{k+1}^{(c)}$ — единичные векторы лучей визирования изображений, рассчитанные в центре; \cdot — скалярное произведение векторов;

- 12) расстояние до эпиполярной кривой — минимальное расстояние от ключевой точки на изображении $I_{k+1}(m,n)$ до эпиполярной кривой [116], соответствующей ключевой точке на изображении $I_k(m,n)$,

$$z_{k,q}^{(12)} = \min_{h \in [h_{\min}, h_{\max}]} \|(\tilde{m}_{k+1,q}, \tilde{n}_{k+1,q}) - \mathbf{E}_{k,q}(h)\|_2, \quad (2.36)$$

где $\mathbf{E}_{k,q}(h)$ — эпиполярная кривая, то есть проекция луча визирования точки $(\tilde{m}_{k,q}, \tilde{n}_{k,q})$ изображения $I_k(m,n)$ на изображение $I_{k+1}(m,n)$ на диапазоне высот h ; h_{\min}, h_{\max} — границы диапазона высот из ЦМР.

Представленные признаки могут быть разделены на следующие группы в соответствии с их физическим смыслом:

- различимость дескрипторов точек пары: $z^{(1)}, z^{(2)}, z^{(3)}$. Признаки $z^{(1)}$ и $z^{(2)}$ показывают насколько первый ближайший сосед в пространстве дескрипторов ближе, чем второй, при поиске из $I_k(m,n)$ в $I_{k+1}(m,n)$ и наоборот. Перекрестная проверка $z^{(3)}$ подтверждает, что оба направления поиска указывают на одну и ту же пару ключевых точек;
- схожесть дескрипторов пары точек: абсолютное расстояние между дескрипторами $z^{(4)}$ и доля расстояний между дескрипторами $z^{(5)}$ для нормализации признака $z^{(4)}$ относительно всех сопоставлений;
- геометрическая согласованность в окрестности точки: признак согласованности масштаба $z^{(6)}$, измеряющий отклонение между наблюдаемым отношением масштабов SIFT и отношением пространственных разрешений по RPC-модели; разность ориентаций $z^{(7)}$ позволяет идентифицировать пары точек, в которых разница направлений градиента яркости отличается от остальных пар ключевых точек;
- пространственная согласованность в окрестности точки: признак отклонения вектора смещения пары ключевых точек от локально интерполированного поля смещений $z_{k,q}^{(8)}$; признак локальной плотности пар ключевых точек $z_{k,q}^{(9)}$;
- основанные на геометрической модели съёмки: величина отклика SIFT $z_{k,q}^{(10)}$; признак отклонение угла луча визирования $z_{k,q}^{(11)}$; эпиполярное расстояние $z_{k,q}^{(12)}$.

2.2.4. Исходя из заданной постановки задачи, она может быть сведена к задаче бинарной классификации [111—113] для определения корректности сопоставления пар ключевых точек. Пусть дан набор данных \mathbf{U} :

$\{(\mathbf{z}_{k,1}, \zeta_{k,1}), (\mathbf{z}_{k,2}, \zeta_{k,2}), \dots, (\mathbf{z}_{k,|\mathcal{B}|}, \zeta_{k,|\mathcal{B}|})\}$, в котором каждому объекту $\mathbf{z}_{k,i}$ поставлено в соответствие число $\zeta_{k,i} \in \mathcal{Z} = \{-1; +1\}$, принимающее значение « -1 » или « $+1$ » в зависимости от того, какому классу принадлежит объект $\mathbf{z}_{k,i}$. В рамках задачи бинарной классификации необходимо определить такую классифицирующую функцию f , которая восстанавливает зависимость между признаками и метками класса, то есть

$$\zeta = f(\mathbf{z}). \quad (2.37)$$

Для повышения качества сопоставления пар ключевых точек без участия оператора необходимо сформировать метки классов для пар, которые гарантированно являются корректно или некорректно сопоставленными. Для каждой q -й пары точек пересечения изображений $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$ из множества \mathcal{B} рассчитаем длину вектора невязок $\Delta w_{k,q}$ по RPC-модели съёмки. Для этого определим геодезические координаты B_q, L_q , при которых пересекаются визирные лучи модели съёмки на высоте, взятой из ЦМР. Тогда рассчитав невязки в строчном $\Delta n_{k,q}$ и кадровом $\Delta m_{k,q}$ направлениях между рассчитанными по RPC-моделям изображений растровыми координатами и соответствующими координатами из множества \mathcal{B} получим искомое значение $\Delta w_{k,q}$ для каждой пары точек. Поиск неизвестных геодезических координат осуществляется в результате минимизации следующей суммы квадратов невязок методом наименьших квадратов [108; 117]

$$\sum_{q=1}^{|\mathcal{B}|} [\Delta m_{k,q}^2 + \Delta n_{k,q}^2] \rightarrow \min_{B_q, L_q}, \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{k,q} &= (m_{k,q} - P_k(B_q, L_q, \hbar(B_q, L_q))), \\ \Delta n_{k,q} &= (n_{k,q} - R_k(B_q, L_q, \hbar(B_q, L_q))), \end{aligned} \quad (2.39)$$

где $\hbar(B_q, L_q)$ — функция получения из ЦМР в точке с координатами (B_q, L_q) . Тогда

$$\Delta w_{k,q} = \sqrt{\Delta n_{k,q}^2 + \Delta m_{k,q}^2}. \quad (2.40)$$

Невязки $\Delta m_{k,q}$ и $\Delta n_{k,q}$ для корректно идентифицированных точек представляют собой сумму независимых ошибок (ошибки строгой модели съёмки, ошибки аппроксимации RPC-модели, ошибки интерполяции ЦМР, ошибки локализации ключевых точек), что согласно центральной предельной теореме приводит к нормальному закону распределения каждой компоненты с ненулевым средним.

При допущении равенства дисперсий невязок в строчном и кадровом направлениях, и независимости компонент, длина вектора $\Delta w_{k,q}$ следует распределению Райса [118] с параметрами: нецентральности $\sqrt{\overline{\Delta n}^2 + \overline{\Delta m}^2}$, где $\overline{\Delta n}$ — оценка математического ожидания невязок в строчном направлении, $\overline{\Delta m}$ — в кадровом; масштаба, равному среднеквадратическому отклонению невязок по каждой из координат. Ошибочно идентифицированные пары ключевых точек порождают невязки, определяемые случайным взаимным расположением несвязанных точек в области перекрытия изображений. Поскольку ложное сопоставление не вносит закономерности в значения невязок, а область поиска соответствий ограничена, по принципу максимальной энтропии выбросы описываются равномерным распределением. Таким образом, векторы невязок описываются смесью двух распределений — двухкомпонентным распределением, на основе которой необходимо определить с заданной вероятностью корректные (принадлежащие распределению Райса) и некорректные (принадлежащие равномерному распределению) сопоставления.

Данная задача может быть решена при помощи алгоритма ожидания-максимизации (Expectation-Maximization, EM) [119; 120]. На каждой итерации EM-алгоритма на E-шаге для каждой длины вектора невязок $\Delta w_{k,q}$ вычисляется апостериорная вероятность принадлежности к распределению Райса и равномерному распределению, исходя из текущих оценок параметров нецентральности и масштаба и весового коэффициента смеси. На M-шаге по полученным вероятностям уточняются параметры распределения Райса и весовой коэффициент. Равномерное распределение задано на интервале $\left[0; \max_{q=1,|\mathcal{B}|} \Delta w_{k,q}\right]$ и в оценке параметров не участвует. Для повышения устойчивости оценок процедура выполняется многократно с различными начальными приближениями, из которых выбирается результат с наибольшим значением логарифма правдоподобия. Разделимость смеси на распределение Райса и равномерное распределение оценивается путём сравнения байесовского информационного критерия [121] двухкомпонентного распределения и равномерного распределения. Если двухкомпонентное распределение не демонстрирует преимущества по критерию — смесь является неразделимой.

По результатам EM-алгоритма каждой паре ключевых точек из множества \mathcal{B} присваивается апостериорная вероятность принадлежности соответствующей длины вектора невязок к распределению Райса. Для каждой q -й пары точек с вектором невязок $\Delta w_{k,q}$ на основе двух эмпирически подобранных порогов $\tau_1 = 0,8$

и $\tau_0 = 0,2$ формируется метка класса: сопоставления с апостериорной вероятностью выше τ_1 считаются корректными, ниже τ_0 — некорректными, остальные — неопределёнными. Обучающая выборка для дальнейшей классификации \mathbf{U} формируется из пар ключевых точек, отнесённых к корректным и некорректным, то есть

$$\mathbf{U} = \left\{ q = \overline{1, |\mathcal{B}|}, \zeta_{k,q} \in \mathcal{Z} : (\mathbf{z}_{k,q}, \zeta_{k,q}) \right\}, \quad (2.41)$$

$$\zeta_{k,q} = \begin{cases} +1, & \text{если } \mathcal{P}(1|\Delta w_{k,q}) \geq \tau_1, \\ -1, & \text{если } \mathcal{P}(1|\Delta w_{k,q}) \leq \tau_0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.42)$$

где $\mathcal{P}(1|\Delta w_{k,q})$ — функция получения вероятности принадлежности значения $\Delta w_{k,q}$ к распределению Райса. Полученный набор данных используется для обучения бинарного классификатора. Разделение на корректные и некорректные пары, выполненное EM-алгоритмом, является предварительным, поскольку основано на единственном признаке — длине вектора невязок. Классификатор обучается на векторах признаков иной физической природы, описывающих свойства каждой пары ключевых точек, и применяется ко всему множеству \mathcal{B} . В результате пары с неопределёнными метками получают классовую принадлежность, а пары, предварительно отнесённые к корректным или некорректным, могут быть переклассифицированы.

2.2.5. Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) представляет собой один из наиболее теоретически обоснованных алгоритмов машинного обучения [122], особенно в условиях полных численных данных без пропусков и выбросов. SVM-алгоритм принадлежит к группе граничных алгоритмов машинного обучения и широко применяется для решения задач классификации данных в различных прикладных областях, демонстрируя высокую эффективность при статистической классификации [123]. Так, например, SVM показал наивысшую точность в 41% исследований медицинских данных [124] среди прочих алгоритмов машинного обучения с учителем, в частности k-ближайших соседей, деревьев решений логистической регрессии, наивного байесовского классификатора, случайного леса. Аналогичные выводы сделаны в работах [125; 126]. Анализ SVM проведён в работе [127], показана высокая эффективность применения метода на ряде классических наборов данных, приведены способы решения задачи поиска оптимальных параметров классификатора, для получения высоких показателей качества обучения и обобщающей способности [111].

В результате обучения SVM-классификатора определяется разделяющая гиперплоскость. Чем шире эта полоса, тем увереннее можно классифицировать объекты. При этом объекты, ближайšie к разделяющей гиперплоскости называются опорными векторами. Они расположены точно на границах полосы разделяющей классы и несут всю информацию об их разделении [128]. Для решения задач, где объекты набора данных не могут быть разделены линейной разделяющей гиперплоскостью вводится функция ядра $\varphi_{\text{svm}}(\mathbf{z}_a, \mathbf{z}_b)$ преобразующая вектор признаков в пространство признаков более высокой размерности, в котором объекты могут быть линейно разделимы. Обычно используются линейная, полиномиальная, радиальная базисная (гауссовская) и сигмоидная функции ядра.

Задача построения разделяющей гиперплоскости может быть сформулирована как двойственная задача поиска седловой точки функции Лагранжа — она сводится к задаче квадратичного программирования, содержащей только двойственные переменные [127], то есть

$$\begin{cases} -\sum_{i=1}^{|\mathbf{U}|} \lambda_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{|\mathbf{U}|} \sum_{j=1}^{|\mathbf{U}|} \lambda_i \lambda_j \zeta_i \zeta_j \varphi_{\text{svm}}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) \rightarrow \min_{\boldsymbol{\lambda}}, \\ \sum_{i=1}^{|\mathbf{U}|} \lambda_i \zeta_i = 0, \\ 0 \leq \lambda_i \leq C, \\ i = \overline{1, |\mathbf{U}|}, \end{cases} \quad (2.43)$$

где $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_{|\mathbf{U}|}]$ — вектор двойственных переменных; C — параметр регуляризации [129]. Таким образом, правило классификации (2.37) на основе SVM классификатора может быть представлено как,

$$\zeta = f_{\text{svm}}(\mathbf{z}) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{|\mathbf{U}|} \lambda_i \zeta_i \varphi_{\text{svm}}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}) \right), \quad (2.44)$$

где $\text{sgn}(\cdot)$ — функция, возвращающая значение « -1 », если число отрицательное, и значение « $+1$ », если число равно нулю или положительное.

Практические аспекты поиска двойственных переменных функции Лагранжа для задачи (2.43) с учётом её особенностей подробно рассмотрены в работе [130].

Выбор и настройка применяемых алгоритмов классификации, а также ряд использованных практических решений опираются на результаты, полученные ранее при участии автора настоящей работы по следующим направлениям:

- 1) поиск оптимальных параметров SVM-классификатора (функций ядра и их параметров, значения регуляризации) с помощью биоинспирированных алгоритмов [127; 128; 131—134];
- 2) разработка гибридных технологий классификации, повышающих обобщающую способность [132; 135—137].

Полученные в этих работах результаты использованы при решении задачи надёжной классификации корректности пар ключевых точек.

2.2.6. В работе [137] предложена гибридная интеллектуальная технология классификации данных (ГИТКД), развивающая подход из [138]; при этом обосновывается необходимость модификации и проводится сравнение с базовым вариантом.

Суть технологии заключается в совместном использовании SVM-алгоритма и метода окна Парзена. Пусть дан набор данных бинарной классификации в двумерном пространстве признаков, который был классифицирован с нелинейной функцией ядра φ_{svm} SVM-классификатором (рис. 2.3). При этом одна часть объектов, оказавшихся вне полосы, уверенно разделяющей классы, классифицирована правильно, в то время как для другой части объектов, попавших внутрь разделяющей полосы и расположенных вблизи линии, разделяющей классы, требуется применение дополнительного инструментария для определения класса принадлежности объектов, а именно классификатора на основе метода окна Парзена (KoMOP). KoMOP позволяет повысить точность классификации данных, по сравнению с вариантом выполнения, использующим классификатор на основе SVM-алгоритма (KoSVM). KoMOP применяется к объектам, которые могут быть классифицированы с использованием KoSVM, как верно, так и ошибочно. Эти данные находятся в экспериментально определяемых подобластях вблизи разделяющей классы гиперплоскости. При этом KoSVM используется со значениями параметров, заданными по умолчанию, а оптимальные значения параметров KoMOP определяются с применением генетического алгоритма (ГА).

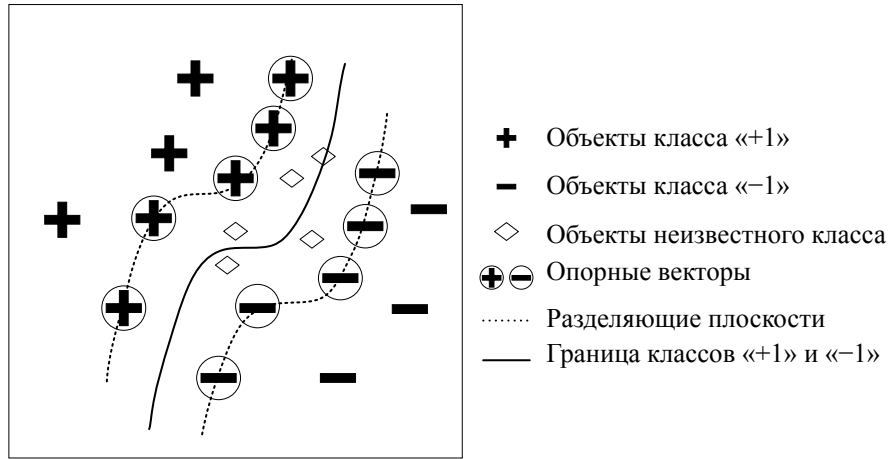


Рисунок 2.3 — Пример классификации объектов в двумерном пространстве признаков SVM-классификатором

Метод окна Парзена [139; 140] является частным случаем обобщенного метрического классификатора, заданного правилом классификации

$$\zeta = f_p(\mathbf{z}, \mathbf{U}, h) = \arg \max_{\zeta \in \mathcal{Z}} \sum_{i=1}^{|\mathbf{U}|} \mathcal{W}_i [\zeta_i = \zeta]. \quad (2.45)$$

где \mathcal{W}_i — вес i -го объекта обучающей выборки; $[\cdot]$ — скобка Айверсона. В методе окна Парзена вес каждого объекта задается с помощью некоторой функции ядра, невозрастающей в диапазоне $[0, \infty)$. При реализации метода окна Парзена может использоваться окно фиксированной или переменной ширины, в соответствии с чем выбирается тот или иной способ задания веса i -го объекта \mathcal{W}_i . Для окна Парзена фиксированной ширины вес i -го объекта \mathcal{W}_i вычисляется с учётом максимального расстояния h , на котором учитываются объекты:

$$\mathcal{W}_i = \varphi_p \left(\frac{\delta(\mathbf{z}, \mathbf{z}_i)}{h} \right), \quad (2.46)$$

где $\varphi_p(\cdot)$ — функция ядра метода окна парзена; h — положительное вещественное число; $\delta(\mathbf{z}, \mathbf{z}_z^{(i)})$ — расстояние от объекта \mathbf{z} до своего i -го соседа $\mathbf{z}_z^{(i)}$, рассчитанное в соответствии с некоторой метрикой.

Для окна Парзена переменной ширины используется не ширина окна, а порядковый номер j для соседа $\mathbf{z}_j^{(i)}$, вклад которого в классификацию объекта \mathbf{z} учитывается

$$\mathcal{W}_i = \varphi_p \left(\frac{\delta(\mathbf{z}, \mathbf{z}_i)}{\delta(\mathbf{z}, \mathbf{z}_l)} \right), \quad l = \mathcal{N}^{(j)}(\mathbf{z}, \mathbf{U}), \quad (2.47)$$

то есть в уравнении (2.46) вместо константы h используется расстояние от объекта \mathbf{z} до j -го соседа из обучающей выборки \mathbf{U} . Окно Парзена переменной длины

позволяет варьировать ширину окна таким образом, чтобы окно содержало фиксированное количество соседей, равное j . Таким образом, для получения правила классификации (2.45) необходимо определить в процессе обучения: число соседей j , метрику расстояния и функцию ядра. Возможные функции ядра и метрики расстояния описаны в работе [137].

Гибридная технология заключается в применении следующей последовательности шагов.

- 1) Построить KoSVM на основе исходного набора данных с использованием значений параметров классификатора, заданных по умолчанию, и оценить с применением различных показателей качество классификации данных.
- 2) Сформировать π -область, расположенную вблизи гиперплоскости, разделяющей классы, и содержащую все объекты, ошибочно классифицированные с применением KoSVM. При этом π -область может быть как симметричной, так и асимметричной. Асимметричная область может быть определена как $\pi = \pi^+ \cap \pi^-$, где π^+ и π^- — соответственно подобласти, содержащие все ошибочно классифицированные объекты, которые относятся к классам с метками « -1 » и « $+1$ » в исходном наборе данных. Симметричная π -область может быть определена как область, содержащая все ошибочно классифицированные объекты, расположенные на расстоянии, которое не превышает $\max\{\Delta\pi^+, \Delta\pi^-\}$, где $\Delta\pi^+$, $\Delta\pi^-$ — ширины подобластей π^+ и π^- соответственно. Сформированная на основе подобластей π^+ и π^- результирующая π -область будет включать в себя все ошибочно классифицированные объекты, образующие вместе с правильно классифицированными объектами, попавшими в π -область, и соответствующими метками классов объектов из π -области, набор данных $\mathcal{G} = \{(\mathbf{z}_i, \zeta_i)\}$, в котором пара признаков и метки класса (\mathbf{z}_i, ζ_i) содержит информацию об объекте \mathbf{z}_i из π -области, и соответствующую объекту \mathbf{z}_i метку класса ζ_i .
- 3) Сформировать набор данных $\mathbf{U}' = \mathbf{U} \setminus \mathcal{G}$, который будет состоять только из тех кортежей исходного набора данных \mathbf{U} , классовая принадлежность объектов для которых с помощью KoSVM была определена правильно.
- 4) Разработать КоМОП на основе данных \mathbf{U}' при классификации объектов из набора данных \mathcal{G} .

- 5) Оценить качество итоговой классификации данных с применением показателей качества: общей точности (Accuracy); чувствительности (Sensitivity); специфичности (Specificity); точности (Precision); а также сбалансированной F-меры (F-measure) [141].

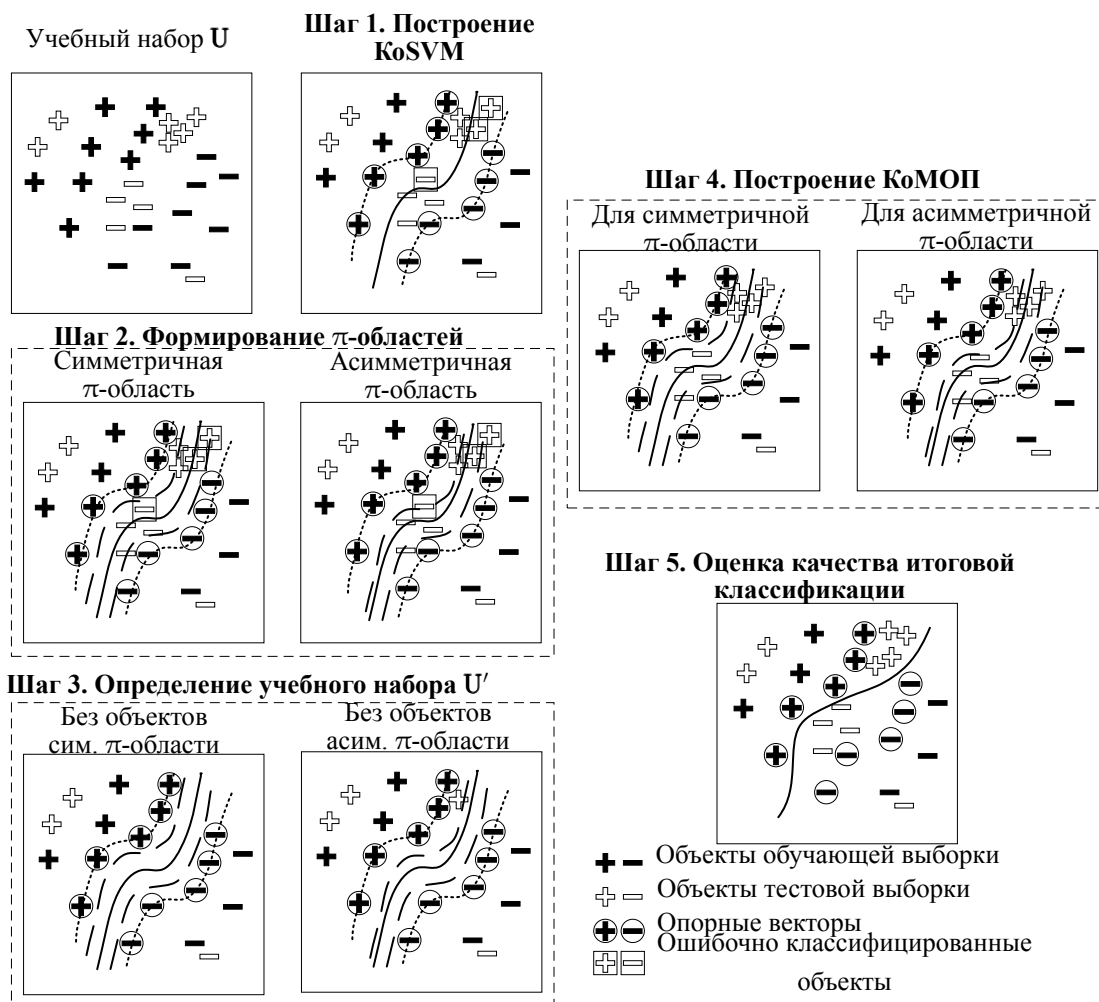


Рисунок 2.4 — Применение гибридной интеллектуальной технологии классификации данных с использованием KoSVM и KoMOП на примере смоделированного набора данных

На рис. 2.4 представлена иллюстрация работы ГИТКД на примере смоделированного набора данных U , содержащего 15 объектов класса «+1» (обозначены на рисунке как знак «плюс»), и 13 объектов класса «-1» (обозначены на рисунке как знак «минус»). Объекты набора данных U были разделены на обучающую и тестовую выборки, содержащие соответственно объекты с заливкой и без заливки. Для набора данных U согласно шагу 1 ГИТКД производится разработка KoSVM со значениями параметров, заданными по умолчанию. На этом шаге для рассматриваемого набора данных U определено 10 опорных векторов, которые задают информацию о разделении классов, при этом 3 объекта из 8 классифицированы

неверно. На шаге 2 определяются симметричные и асимметричные π -области, содержащие ошибочно классифицированные объекты. На шаге 3 формируются наборы данных U' , из которых исключена информация о всех объектах, расположенных внутри симметричной и асимметричной областей. Наборы данных U' используются в качестве новых наборов данных для разработки КоМОП. В рассматриваемом примере из исходного набора данных U исключена информация о 7 и 6 объектах соответственно для вариантов с симметричной и асимметричной π -областями. Построенный на шаге 4 КоМОП позволяет верно классифицировать объекты как симметричной, так и асимметричной π -областей. На шаге 5 выбирается лучший из разработанных КоМОП, обеспечивающий минимизацию числа ошибок при классификации данных, и составляется новое правило классификации, условно обозначенное на рис. 2.4 как преобразованная с учетом КоМОП разделяющая гиперплоскость, сформированная при разработке КоSVM.

2.2.7. Предлагаемый алгоритм (рис. 2.5) включает выполнение трёх этапов: предобработки (символы 1–5); подготовки обучающей выборки и применение ГИТКД для классификации корректных пар ключевых точек (символы 6–13); формирование множества корректно-сопоставленных пар ключевых точек (символы 14–19). В качестве входных данных алгоритм принимает:

- изображения $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$, сопровождаемые RPC-моделями съёмки;
- упорядоченное множество пар ключевых точек \mathcal{B} ;
- цифровую модель рельефа в виде функции $h(B, L)$.

В результате выполнения формируется множество пар \mathcal{X} ключевых точек для дальнейшего использования в блочном уравнивании в качестве одноимённых.

В символе 1 методом наименьших квадратов производится минимизация функционала (2.38) — суммы квадратов невязок по строке и столбцу — относительно геодезических координат B_q и L_q для каждой пары ключевых точек $q = \overline{1, |\mathcal{B}|}$. В цикле А (символы 2–4) для каждой пары ключевых точек рассчитывается длина вектора невязки $\Delta w_{k,q}$ в соответствии с (2.40) как евклидова норма компонент невязок по строке $\Delta m_{k,q}$ и столбцу $\Delta n_{k,q}$. В символе 5 по множеству полученных длин невязок $\{\Delta w_{k,q}\}$ посредством EM-алгоритма строится функция \mathcal{P} — апостериорная вероятность принадлежности значения $\Delta w_{k,q}$ распределению Райса, характерному для корректно сопоставленных пар ключевых точек. На E-шаге EM-алгоритма для каждой длины невязки вычисляется вероят-

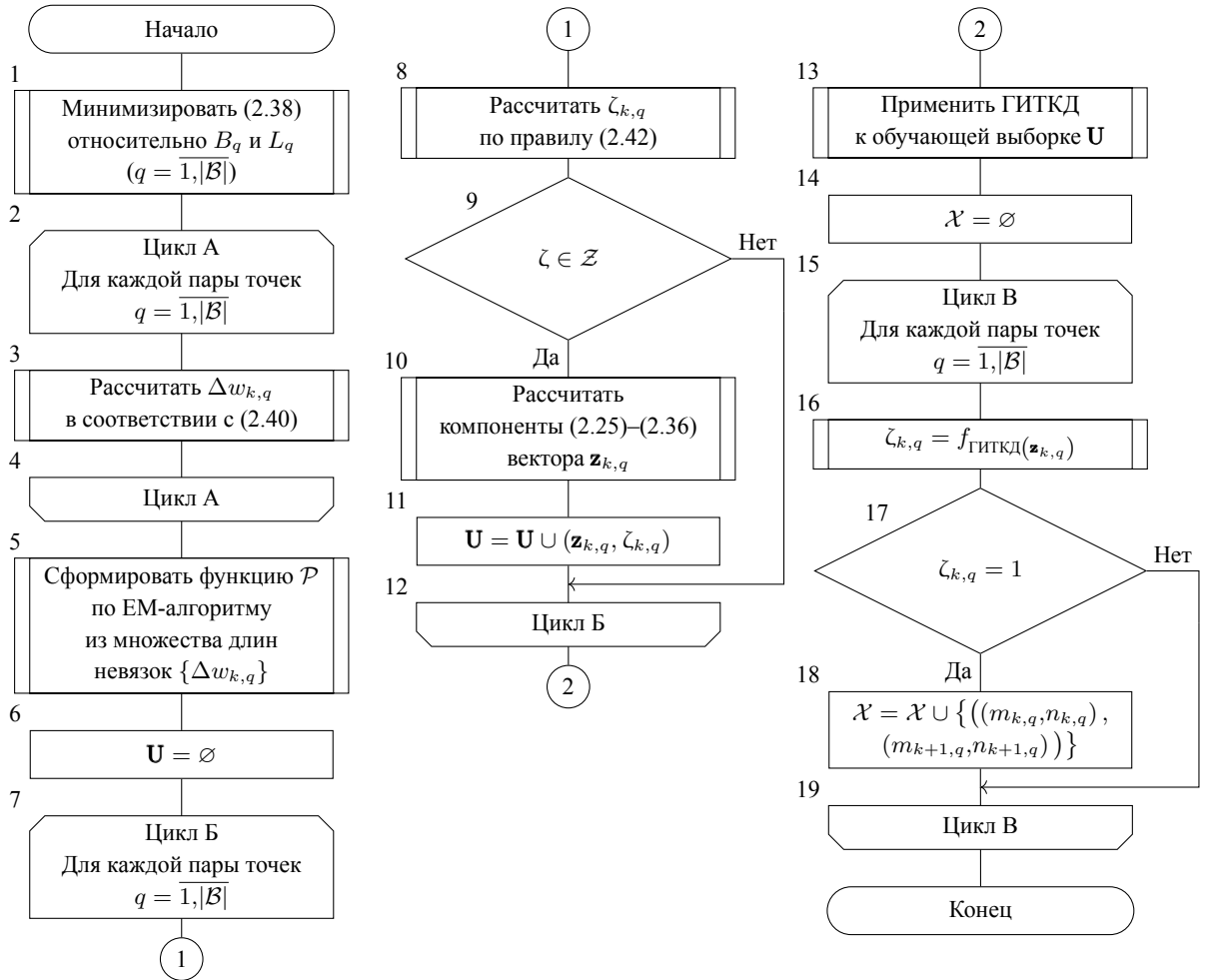


Рисунок 2.5 — Предлагаемый алгоритм фильтрации одноимённых точек

ность принадлежности к распределению Райса и равномерному распределению; на М-шаге уточняются параметры распределения Райса.

В символе 6 инициализируется пустая обучающая выборка \mathbf{U} . В цикле Б (символы 7–12) для каждой пары точек в символе 8 рассчитывается метка $\zeta_{k,q}$ по правилу (2.42) с использованием полученной функции \mathcal{P} и эмпирических порогов τ_1 и τ_0 : при $\mathcal{P}(1|\Delta w_{k,q}) \geq \tau_1$ метке присваивается значение $+1$ (корректное сопоставленная пара точек), при $\mathcal{P}(1|\Delta w_{k,q}) \leq \tau_0$ — значение -1 (некорректное сопоставление), иначе — значение 0 . В символе 9 проверяется принадлежность метки $\zeta_{k,q}$ множеству $\mathcal{Z} = \{-1; +1\}$: если метка определена (не равна нулю), то в символе 10 вычисляются компоненты (2.25)–(2.36) вектора признаков $\mathbf{z}_{k,q}$, а в символе 11 вектор признаков и метка класса $(\mathbf{z}_{k,q}, \zeta_{k,q})$ добавляется в выборку \mathbf{U} . В символе 13 к сформированной обучающей выборке \mathbf{U} применяется ГИТКД — гибридная интеллектуальная технология классификации данных — для обучения итогового классификатора $f_{\text{ГИТКД}}$.

В символе 14 инициализируется пустое выходное множество \mathcal{X} . В цикле В (символы 15–19) для каждой пары ключевых точек в символе 16 применяется обученный классификатор $f_{\text{ГИТКД}}$ к вектору признаков $\mathbf{z}_{k,q}$. Если в символе 17 предсказанная метка $\zeta_{k,q} = 1$ (пара классифицирована как корректная), то в символе 18 координаты пары точек $((m_{k,q}, n_{k,q}), (m_{k+1,q}, n_{k+1,q}))$ включаются во множество одноимённых точек \mathcal{X} , передаваемое в блочное уравнивание.

Вычислительная сложность предлагаемого алгоритма (рис. 2.5) определяется трудоёмкостью трёх этапов. На этапе предобработки (символы 1–5) вычисление вектора длин невязок для $|\mathcal{B}|$ пар ключевых точек требует $O(|\mathcal{B}|)$ операций, а построение функции \mathcal{P} в рамках EM-алгоритма — $O(|\mathcal{B}| \log |\mathcal{B}|)$. На этапе подготовки обучающей выборки (символы 6–12) вычисление компонент вектора признаков (2.25)–(2.36) суммарно выполняется за $O(|\mathcal{B}| \log |\mathcal{B}|)$: большинство признаков вычисляется за $O(|\mathcal{B}|)$, однако признаки (2.32) и (2.33), основанные поиске ближайших соседей, вносят определяющий вклад $O(|\mathcal{B}| \log |\mathcal{B}|)$. Доминирующий вклад вычислительной сложности ГИТКД составляет использование SVM-алгоритма, в связи с тем, что окно Парзена используется для малого числа объектов обучающей выборки. На этапе обучения SVM-классификатора (символ 13) метод Sequential minimal optimization [142] решает задачу квадратичного программирования с трудоёмкостью $O(|\mathcal{B}|^2)$ в худшем случае — это наиболее затратный этап всего алгоритма. Применение обученного классификатора (символы 15–19) требует $O(|\mathcal{B}| \cdot N_{sv})$, где N_{sv} — количество опорных векторов; при хорошей разделимости классов $N_{sv} \ll |\mathcal{B}|$. Таким образом, вычислительная сложность предлагаемого алгоритма составляет $O(|\mathcal{B}|^2)$.

Результаты применения предлагаемого алгоритма к рассмотренным ранее сюжетам площадной съёмки показаны на рис. 2.6. Некорректные сопоставления устранены. Число корректных сопоставлений в результате переклассификации в символе 17 для сюжета «береговая линия» (рис. 2.6а) повышено с 9 до 19; для сюжета «городская застройка» (рис. 2.6б) — с 19 до 20.

Предлагаемый алгоритм также был применён к материалам площадной съёмки двух территорий (таблица 4): «пустыня» и «город». Для учёта возможных взаимных смещений изображений до блочного уравнивания сформирована расширенная область пересечения. В расширенной области пересечения осуществлён поиск ключевых точек алгоритмом SIFT. Выполнено предварительное сопоставление точек и сформировано упорядоченное множество \mathcal{B} . К предва-

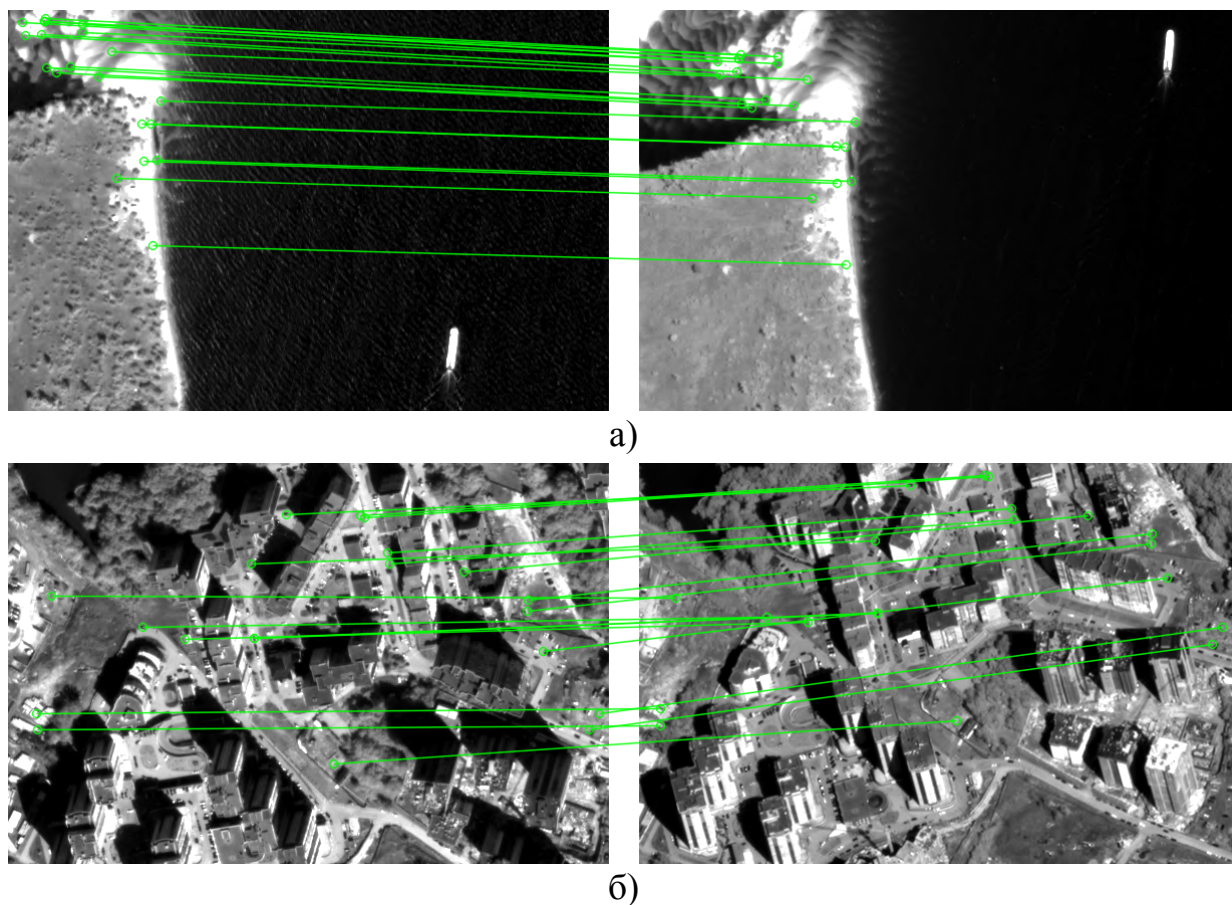


Рисунок 2.6 — Результат применения предлагаемого алгоритма фильтрации одноимённых точек к ранее рассмотренным сюжетам (рис. 1.5): а) сюжет «береговая линия»; б) сюжет «городская застройка»

рительно сопоставленным точкам применяется 2 подхода: на основе RANSAC и предлагаемый алгоритм.

Таблица 4 — Результаты выполнения предлагаемого алгоритма на маршрутах площадной съёмки

Характеристика	Территория «пустыня»	Территория «город»
Число ключевых точек на маршруте 1/2 в расширенной области пересечения	4760/4414	4878/4453
Число пар в множестве \mathcal{B}	444	421
Число пар в множестве \mathcal{X} после RANSAC (доля некорректных сопоставлений, %)	123 (16,3)	37 (29,8)
Число пар в множестве \mathcal{X} после предлагаемого алгоритма (доля некорректных сопоставлений, %)	137 (1,5)	91 (2,1)

В рамках первого подхода применяется метод RANSAC с аффинной моделью преобразования, определяемой шестью параметрами. На каждой итерации случайным образом выбираются три пары сопоставленных точек — минимальное количество, необходимое для определения параметров аффинного преобразования. По полученной модели вычисляются прогнозируемые координаты для всех остальных пар, и каждая пара классифицируется как корректная или некорректная на основании порогового значения ошибки трансформирования. По завершении итеративного процесса выбирается модель, которой соответствует наибольшее число корректных сопоставлений, и по ним выполняется уточнённая оценка параметров преобразования методом наименьших квадратов [108].

В результате ручного контроля результирующих множеств после первого и второго подхода определена доля некорректных сопоставлений. Применение предлагаемого алгоритма позволяет получить долю ложных сопоставлений на уровне 2 %.

2.2.8. В рамках настоящего раздела задача фильтрации одноимённых точек поставлена как задача бинарной классификации — разделения множества предварительно сопоставленных пар на корректные и некорректные. Предложено признаковое описание из 12 признаков, характеризующих области ключевых точек. Разработан подход к автоматическому извлечению предварительных меток классов для формирования обучающей выборки. Подход основан на EM-алгоритме, моделирующем смесь распределения Райса и равномерного распределения на основе длин векторов невязок каждой пары ключевых точек. Рассмотрены аспекты применения метода опорных векторов и повышения качества классификации. Для улучшения результатов вблизи разделяющей гиперплоскости предложено использование гибридной интеллектуальной технологии классификации данных, сочетающей классификатор на основе SVM-алгоритма и классификатор на основе окна Парзена.

Таким образом, разработан трёхэтапный алгоритм фильтрации одноимённых точек (Положение 1) на основе гибридной интеллектуальной технологии классификации данных, позволяющий повысить точность и полноту формируемого множества корректных соответствий пар ключевых точек. Экспериментальная проверка на двух участках площадной съёмки показала, что для участков «пустыня» и «город» предлагаемый алгоритм обеспечивает долю ложных сопоставлений 1,5 и 2,1 %, тогда как применение подхода на основе RANSAC в аналогичных условиях даёт 16,3 и 29,8 % соответственно.

2.3 Математическая модель блочного уравнивания групп снимков с использованием RPC-модели

2.3.1. Для организации высокоточного совмещения материалов съёмки выполняется процедура блочного уравнивания [36; 40; 60]. Входными данными для процедуры являются: модели съёмки уравниваемых изображений; наборы одноимённых и опорных точек; цифровая модель рельефа. В результате её выполнения формируются поправки в модели съёмки изображений: в случае строгой модели — корректируются параметры внешнего ориентирования геометрической модели [24]; в случае унифицированной — к расчётным соотношениям добавляются корректирующие функции от растровых координат [36].

Привлечение опорной информации позволяет контролировать процесс уравнивания за счёт введения ограничений в опорных точках, но при этом сопряжено с замедлением всей технологической цепи. При условии своевременного выполнения процедур калибровки материалы съёмки характеризуются высокой точностью геопривязки и не нуждаются в дополнительном уточнении относительно опорных данных. В отсутствие опорной информации при организации оперативных процедур обработки данных площадной съёмки важным является получение надёжных результатов совмещения. В частности, применение блочного уравнивания не должно ухудшать точность геопривязки исходных изображений. В этой связи целесообразно исследование конкретных моделей поправок, применительно к натурным данным от современных отечественных космических аппаратов.

2.3.2. Выполним постановку задачи блочного уравнивания групп снимков, геопривязанных по RPC-модели съёмки. Будем считать, что каждое изображение $I_k(m, n)$, геокодированное по RPC-модели (1.3), дополнительно может сопровождаться J_k опорными точками, характеризуемыми растровыми координатами объекта земной поверхности на изображении $(m_{k,j}, n_{k,j})$, измеренными с точностью $\sigma_{k,j}^{(p)}$, геодезическими координатами объекта $(B_{k,j}, L_{k,j}, H_{k,j})$ с точностью определения плановых координат $\sigma_{k,j}^{(пл)}$ и точностью определения высоты $\sigma_{k,j}^{(выс)}$.

На паре изображений $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ найдём Q_k одноимённых точек в области пересечения, q -я, $q = \overline{1, Q_k}$, точка будет характеризоваться: растровыми координатами $(m_{k, \nu+q}, n_{k, \nu+q})$ на изображении $I_k(m, n)$, измеренными с погрешностью $\sigma_{k, \nu+q}^{(p)}$ и $(m_{k+1, \eta+q}, n_{k+1, \eta+q})$ на изображении $I_{k+1}(m, n)$, измеренными

с погрешностью $\sigma_{k+1,\eta+q}^{(p)}$, где

$$\nu = J_k + Q_{k-1}, \quad \eta = J_{k+1}, \quad (2.48)$$

где J_{k+1} — число ОТ на изображении $I_{k+1}(m,n)$; Q_{k-1} — число ОИТ на изображении $I_{k-1}(m,n)$, пересекающимся с изображением $I_k(m,n)$.

Пусть даны $K = 3$ изображения для блочного уравнивания. При этом на изображении $I_1(m,n)$ задано $J_1 = 2$ ОТ, на изображении $I_2(m,n)$ — $J_2 = 1$ ОТ, $I_3(m,n)$ — $J_3 = 1$ ОТ. Также на пересечении изображений $I_1(m,n)$ и $I_2(m,n)$ найдём $Q_1 = 1$ ОИТ, а на пересечении $I_2(m,n)$ и $I_3(m,n)$ — $Q_2 = 2$ ОИТ. Для описанного состава изображений и точек блочного уравнивания схема используемых индексов для растровых координат приведена на рис. 2.7.

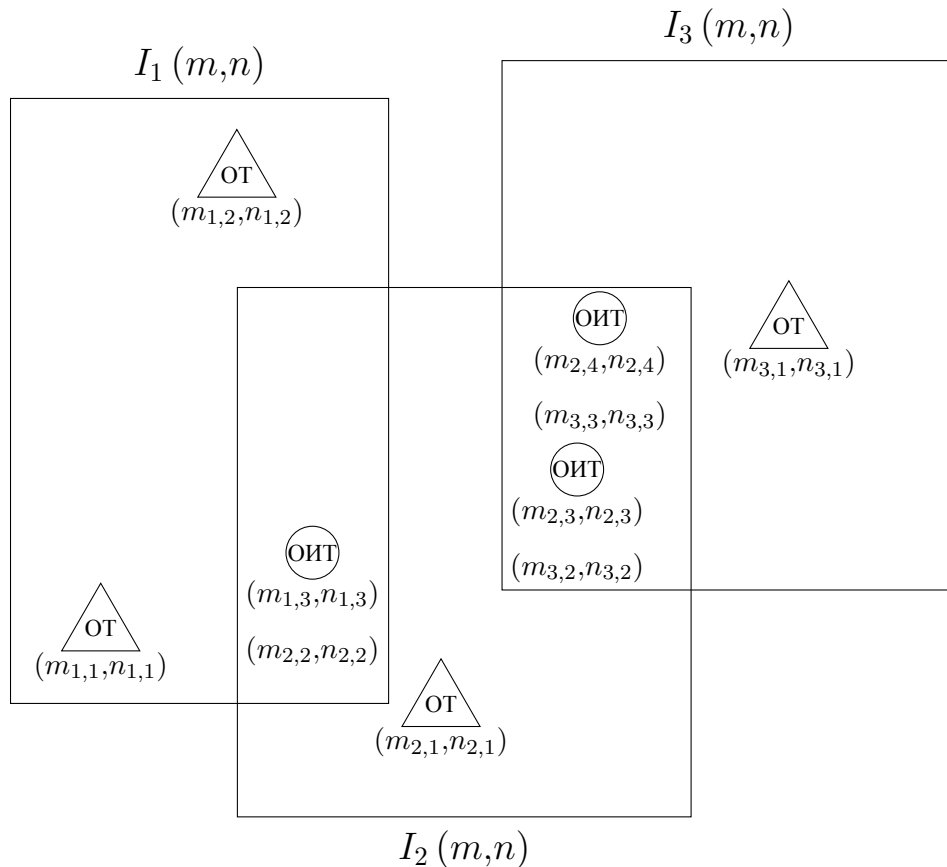


Рисунок 2.7 — Пример используемых обозначений при блочном уравнивании трёх изображений

Пронумеруем ОИТ и ОТ на изображении $I_k(m,n)$ индексом l . Невязки в строчном и кадровом направлениях одноимённой или опорной точки l на изображении $I_k(m,n)$ определяются как разница между измеренными растровыми координатами точки и вычисленными по RPC-модели с некоторой поправкой, то

есть,

$$\begin{aligned}\Delta n_{k,l} &= n_{k,l} - \left[n'_{k,l} + \tilde{R}_k (m'_{k,l}, n'_{k,l}, \mathbf{p}_k) \right], \\ \Delta m_{k,l} &= m_{k,l} - \left[m'_{k,l} + \tilde{P}_k (m'_{k,l}, n'_{k,l}, \mathbf{k}_k) \right],\end{aligned}\quad (2.49)$$

где $(m_{k,l}, n_{k,l})$ — измеренные на изображении $I_k(m, n)$ растровые координаты точки l ; $(\hat{B}_{k,l}, \hat{L}_{k,l}, \hat{H}_{k,l})$ — уточнённые геодезические координаты точки l на изображении $I_k(m, n)$; $(m'_{k,l}, n'_{k,l})$ — вычисленные по (1.3) растровые координаты точки l по $(\hat{B}_{k,l}, \hat{L}_{k,l}, \hat{H}_{k,l})$, то есть,

$$n'_{k,l} = R_k (\hat{B}_{k,l}, \hat{L}_{k,l}, \hat{H}_{k,l}), \quad m'_{k,l} = P_k (\hat{B}_{k,l}, \hat{L}_{k,l}, \hat{H}_{k,l}); \quad (2.50)$$

и где \tilde{R}_k, \tilde{P}_k — модель поправок к RPC-модели изображения $I_k(m, n)$, определённой в пространстве растровых координат, в строчном и кадровом направлениях соответственно; $\mathbf{p}_k, \mathbf{k}_k$ — параметры модели поправок изображения $I_k(m, n)$ в строчном и кадровом направлениях соответственно.

Истинные геодезические координаты одноимённых точек неизвестны, опорных — известны с точностью измерений. Для опорной точки j изображения $I_k(m, n)$ дополним невязки координат в плане и по высоте, определяемые как

$$\begin{aligned}\Delta x_{k,j} &= D \left((B_{k,j}, L_{k,j}), (\hat{B}_{k,j}, L_{k,j}) \right) \cdot R_3; \\ \Delta y_{k,j} &= D \left((B_{k,j}, L_{k,j}), (B_{k,j}, \hat{L}_{k,j}) \right) \cdot R_3; \\ \Delta H_{k,j} &= H_{k,j} - \hat{H}_{k,j},\end{aligned}\quad (2.51)$$

где $D(\cdot)$ — функция расчёта угловой разницы на сфере между точками по формуле гаверсинусов; R_3 — средний радиус Земли в метрах, равный 6371,3 км.

Одноимённой точке q на пересечении изображений $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ соответствуют неизвестные геодезические координаты (B_s, L_s, H_s) , где

$$s = \sum_{i=1}^k Q_i + q. \quad (2.52)$$

Пусть для s -й, $s = \overline{1, Q}$, одноимённой точки найдены уточненные геодезические координаты $(\hat{B}_s, \hat{L}_s, \hat{H}_s)$, тогда невязка высоты относительно цифровой модели рельефа определяется как

$$\Delta h_s = \hat{H}_s - \hat{h} (\hat{B}_s, \hat{L}_s), \quad (2.53)$$

где Q — число одноимённых точек на пересечениях всех изображений; $\hat{h}(\hat{B}_s, \hat{L}_s)$ — функция получения из ЦМР в точке с координатами (\hat{B}_s, \hat{L}_s) геодезической высоты местности с погрешностью измерений $\sigma^{(\hat{h})}$.

Целью блочного уравнивания является минимизация невязок в одноимённых точках для улучшения качества совмещения изображений и невязок в опорных точках для повышения точности геопривязки изображений при неизвестных геодезических координатах одноимённых точек и параметрах моделей поправок, то есть,

$$\mathcal{V} = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{l=1}^{J_k+Q_k} \frac{\Delta m_{k,l}^2 + \Delta n_{k,l}^2}{\sigma_{k,l}^{(p)2}} + \sum_{j=1}^{J_k} \left[\frac{\Delta x_{k,j}^2 + \Delta y_{k,j}^2}{\sigma_{k,j}^{(\text{пл})2}} + \frac{\Delta H_{k,j}^2}{\sigma_{k,j}^{(\text{выс})2}} \right] \right] + \sum_{s=1}^Q \frac{\Delta h_s^2}{\sigma^{(\hat{h})2}}, \quad (2.54)$$

$$\mathcal{V} \rightarrow \min_{\Theta}, \quad (2.55)$$

где Θ — искомые параметры блочного уравнивания, в том числе: вектор Θ_1 уточнённых геодезических координат ОИТ; вектор Θ_2 уточнённых геодезических координат ОТ; вектор Θ_3 параметры модели поправок для каждого изображения $I_k(m, n)$, то есть,

$$\begin{aligned} \Theta &= [\Theta_1 \ \Theta_2 \ \Theta_3], \\ \Theta_1 &= [\hat{B}_1 \ \hat{L}_1 \ \hat{H}_1 \ \hat{B}_2 \ \hat{L}_2 \ \hat{H}_2 \ \cdots \ \hat{B}_Q \ \hat{L}_Q \ \hat{H}_Q], \\ \Theta_2 &= [\hat{B}_{1,1} \ \hat{L}_{1,1} \ \hat{H}_{1,1} \ \hat{B}_{1,2} \ \hat{L}_{1,2} \ \hat{H}_{1,2} \ \cdots \ \hat{H}_{K,J_K}], \\ \Theta_3 &= [\rho_1 \ \kappa_1 \ \rho_2 \ \kappa_2 \ \cdots \ \kappa_K]. \end{aligned} \quad (2.56)$$

2.3.3. Выбор модели поправок блочного уравнивания должен быть обусловлен характером невязок в строчном и кадровом направлениях. Например, для изображений с КА IKONOS показано [36], что при протяженности маршрута до 50 км достаточно частного случая полиномиальной модели поправок от индекса строки и столбца — аффинной. Полиномиальная модель поправок изображения $I_k(m, n)$ определяется как функции

$$\begin{aligned} \tilde{R}_k^{\text{poly}}(m, n, \kappa_k) &= \sum_{t=0}^T \sum_{\tau=0}^{T-t} \kappa_t \cdot m^t \cdot n^\tau, \\ \tilde{P}_k^{\text{poly}}(m, n, \rho_k) &= \sum_{t=0}^T \sum_{\tau=0}^{T-t} \rho_t \cdot m^t \cdot n^\tau, \end{aligned} \quad (2.57)$$

где $\iota = T \cdot t + \tau$ — индекс коэффициента поправки. Частными случаями полиномиальной модели поправок являются: аддитивная модель ($T = 0$) и аффинная модель ($T = 1$).

Проанализируем применение полиномиальной модели поправок для данных с космических аппаратов серии «Ресурс-П». Для анализа источника ошибок были взяты две пары маршрутов съёмочной аппаратуры «Геотон» с КА «Ресурс-П» № 1 [61], полученных в результате тангажной [57] стереосъёмки (маршруты 1.1 и 1.2) и площадной съёмки (маршруты 2.1 и 2.2). Каждый маршрут сопровождается коэффициентами RPC-модели, аппроксимирующей строгую модель съёмки с показателями: максимальной ошибки аппроксимации E_{\max} (2.18); среднеквадратической ошибки аппроксимации в строчном и кадровом направлениях $\langle \bar{\sigma}^{(m,n)} \rangle$ (2.17). На каждом маршруте с привлечением высокоточных абрисов найдены опорные точки. Характеристики маршрутов представлены в таблице 5.

Таблица 5 — Характеристики анализируемых маршрутов с КА «Ресурс-П» № 1

Характеристика	Маршрут 1.1	Маршрут 1.2	Маршрут 2.1	Маршрут 2.2
Тип съёмки	стерео		площадная	
Углы съёмки (крен, тангаж), °	-7,82; -24,78	-7,91; 24,63	-3,32; -24,55	1,01; 24,59
Пространственное разрешение, м	0,87	0,86	0,66	0,66
E_{\max} (2.18), пикс	4,08	10,96	2,95	3,83
$\langle \bar{\sigma}^{(m,n)} \rangle$ (2.17), пикс	2,02	3,79	1,27	1,76
Охват, км	35,3 × 44,4	35,4 × 37,6	35,59 × 44,83	35,49 × 45,00
Число ОТ	30	34	20	20
Число ОИТ	90		89	

Вычислим следующие статистические характеристики точности:

- 1) точность геопривязки $\bar{\sigma}_k^{(OT)}$ изображения $I_k(m,n)$ после применения поправок, вычисляемая как среднеквадратическая ошибка суммарных невязок в плане в опорных точках по формуле (1.7);
- 2) общую точность геопривязки $\bar{\sigma}^{(OT)}$ после применения поправок по формуле (1.7) на множестве опорных точек всех изображений;
- 3) точность совмещения $\bar{\sigma}_k^{(OIT)}$ изображений $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$, как среднеквадратическую ошибку суммарных невязок плановых координат

ОИТ, найденных в результате блочного уравнивания,

$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_k^{(\text{ОИТ})} &= \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{Q_k} [D_1^2 + D_2^2]}{Q_k}}, \\ \mathcal{D}_1 &= D \left(\left(\hat{B}_s, \hat{L}_s \right), \left(B'_{k,\nu+q}, L'_{k,\nu+q} \right) \right), \\ \mathcal{D}_2 &= D \left(\left(\hat{B}_s, \hat{L}_s \right), \left(B'_{k+1,\eta+q}, L'_{k+1,\eta+q} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.58)$$

где $(B'_{k,\eta+q}, L'_{k,\eta+q})$, $(B'_{k+1,\nu+q}, L'_{k+1,\nu+q})$ — вычисленные по скорректированной обратной RPC-модели геодезические координаты одноимённой точки q на изображениях $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$, которой соответствуют уточнённые в процессе уравнивания геодезические координаты (\hat{B}_s, \hat{L}_s) ; η , ν , s — индексы, вычисляемые по формулам (2.48) и (2.52);

- 4) общую точность совмещения $\overline{\sigma}^{(\text{ОИТ})}$ после применения поправок по формуле (2.58) на множестве одноимённых точек всех изображений.

Блочное уравнивание пар маршрутов было выполнено с использованием ОТ и ОИТ. Для начальной оценки точности привязки и совмещения блочное уравнивание выполнено без использования поправок, затем использованы полиномиальные модели поправок со значениями $T = \overline{0,4}$ по формуле (2.57). В таблице 6 представлены полученные в результате блочного уравнивания показатели точности.

Таблица 6 — Результаты блочного уравнивания анализируемых маршрутов с КА «Ресурс-П» № 1

Модель поправок	$\overline{\sigma}_{1,1}^{\text{ОТ}}$, м	$\overline{\sigma}_{1,2}^{\text{ОТ}}$, м	$\overline{\sigma}_{1,1,1,2}^{\text{ОИТ}}$, м	$\overline{\sigma}_{2,1}^{\text{ОТ}}$, м	$\overline{\sigma}_{2,2}^{\text{ОТ}}$, м	$\overline{\sigma}_{2,1,2,2}^{\text{ОИТ}}$, м
Без поправок	5,41	8,07	5,76	2,07	3,01	1,63
Аддитивная $T = 0$ (2.57)	2,28	2,84	3,17	2,20	3,09	1,32
Аффинная $T = 1$ (2.57)	2,11	2,67	2,33	2,18	3,05	1,04
Полиномиальная $T = 2$ (2.57)	2,21	2,34	2,32	1,73	2,48	0,78
Полиномиальная $T = 3$ (2.57)	1,87	1,62	1,76	1,44	2,05	0,79
Полиномиальная $T = 4$ (2.57)	1,56	1,42	1,59	1,24	1,43	0,73
Двухкомпонентная $T = 1, \gamma = 3, \varepsilon = 1000$ (2.61)	1,43	1,69	0,73	2,47	2,79	0,38

Из полученных результатов следует, что среди рассматриваемых полиномиальных моделей поправок наибольшую точность геопривязки обеспечивает модель со степенью полинома $T = 4$ на обоих парах маршрутов. При этом на мозаичном изображении после применения скорректированной RPC-модели выявлено ухудшение точности привязки более 50 м в областях изображения, не содержащих опорные и одноимённые точки, выражающееся в значительном искажении сюжета. Кроме этого, не обеспечивается достаточная точность совмещения в одноимённых точках для выполнения высокоточного геометрического синтеза мозаичного изображения. Для получения стабильных результатов применения полиномиальной модели поправок с высокой степенью полинома T необходимо большое количество равномерно распределённых по изображению опорных и одноимённых точек, что не всегда может быть обеспечено при потоковой обработке. По результатам ручного контроля мозаичных снимков, полученных с использованием рассмотренных полиномиальных моделей, выявлено, что наименьшее влияние на модель съёмки вносит аффинная поправка.

Для оценки характера распределения остаточных невязок построены графики невязок в кадровом Δm и строчном Δn направлениях в зависимости от номера строки n для маршрута 1.1 (рис. 2.8). Без применения поправок значения оценки математического ожидания невязок и среднеквадратического отклонения составляют $-1,15$ пикс. и $1,20$ пикс. для невязок в кадровом направлении, и $0,40$ пикс. и $1,05$ пикс. — в строчном. В результате применения аддитивной модели поправок среднее значение невязок в строчном направлении становится $-0,19$ пикс., в кадровом — $0,11$ пикс., что свидетельствует о наличии ошибки модели привязки, устраняемой смещением или сдвигом. Использование аффинной модели позволяет достичь значений оценок математического ожидания и среднеквадратической $0,04$ пикс. и $0,92$ пикс. в кадровом направлении, и $-0,01$ пикс. и $0,87$ пикс. — в строчном. Из рисунка следует, что распределения невязок выровнялись относительно линий тренда, сохраняя при этом полиномиальную структуру от номера строки.

Добавим к скорректированной в результате блочного уравнивания RPC-модели дополнительную поправку в пространстве растровых координат как функцию от номера строки, устраняющей остаточные невязки. Аппроксимация ошибок в строчном и кадровом направлениях может быть определена как одномерный случай метода резинового листа. Пусть на изображении $I_k(m, n)$ найдено Q_{k-1} и Q_k ОИТ, тогда поправку остаточных невязок представим как

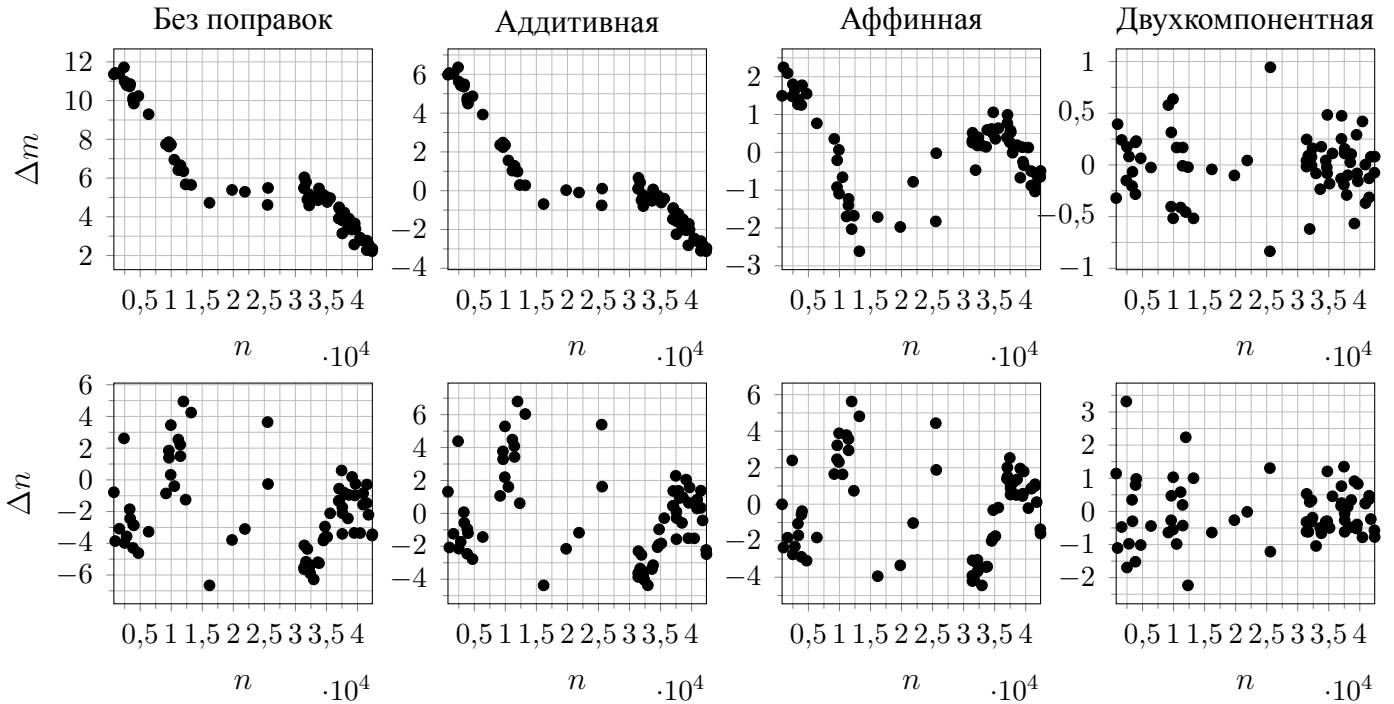


Рисунок 2.8 — Невязки ОИТ в кадровом Δm и строчном Δn направлениях от номера строки n маршрута 1.1 после блочного уравнивания без поправок, с аддитивной, аффинной и двухкомпонентной поправками

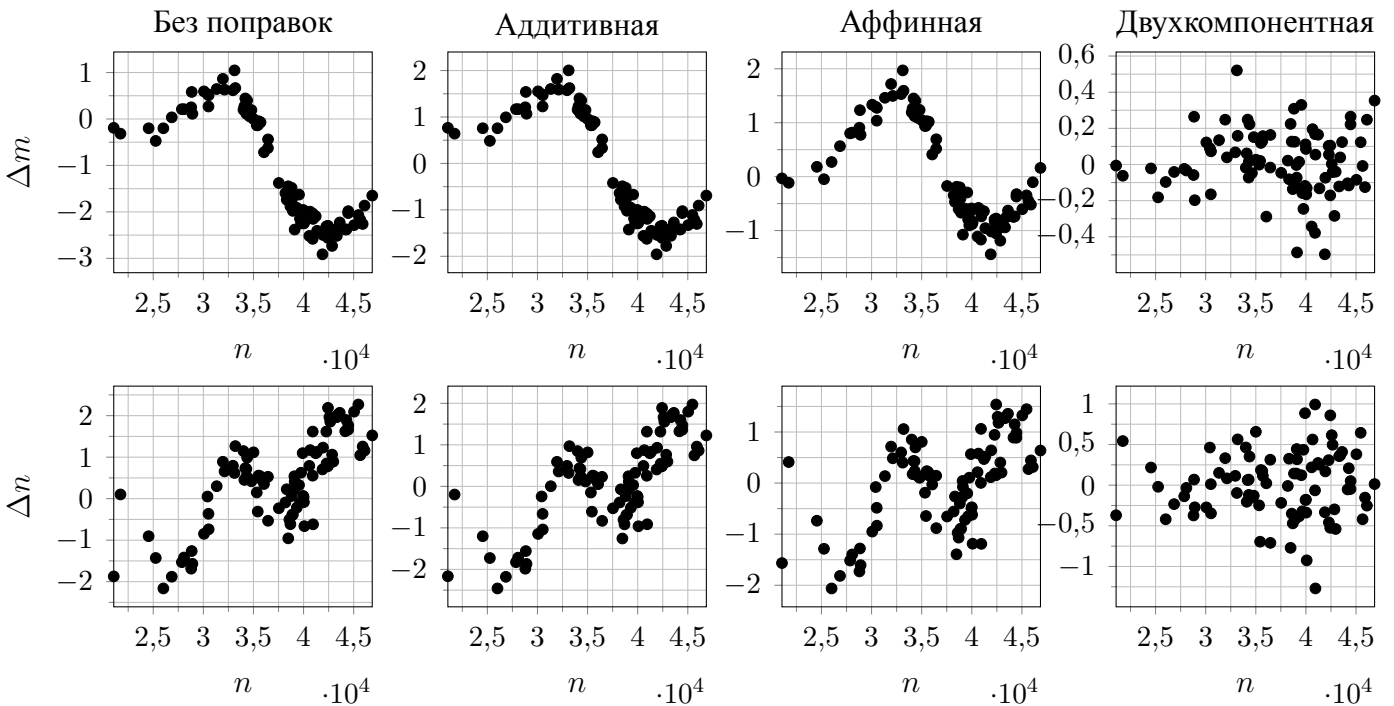


Рисунок 2.9 — Невязки ОИТ в кадровом Δm и строчном Δn направлениях от номера строки n маршрута 2.1 после блочного уравнивания без поправок, с аддитивной, аффинной и двухкомпонентной поправками

функции от индекса строки n , а именно:

$$\begin{aligned}\tilde{R}_k^{\text{rs}}(n) &= \frac{\sum_{q=1}^{\Gamma} [\omega(n, n_{k,q}) \cdot \Delta n_{k,q}]}{\sum_{q=1}^{\Gamma} \omega(n, n_{k,q})}, \\ \tilde{P}_k^{\text{rs}}(n) &= \frac{\sum_{q=1}^{\Gamma} [\omega(n, n_{k,q}) \cdot \Delta m_{k,q}]}{\sum_{q=1}^{\Gamma} \omega(n, n_{k,q})}, \\ \Gamma &= Q_{k-1} + Q_k,\end{aligned}\tag{2.59}$$

где

$$\omega(n, n_{k,q}) = (|n - n_{k,q}| + \varepsilon)^{-\gamma},\tag{2.60}$$

и где γ , ε — параметры функции. При этом вычислительная сложность расчёта поправки зависит от числа ОИТ на изображении, что может быть неприемлемо для оперативной обработки. С целью устранения этого недостатка полученные функции могут быть интерполированы кубическим сплайном на диапазоне числа строк изображения $I_k(m, n)$.

Таким образом, предлагаемая двухкомпонентная модель поправок, используемая в уравнении (2.49) определяется как

$$\begin{aligned}\tilde{R}_k(m, n, \mathbf{p}_k) &= \tilde{R}_k^{\text{poly}}(m, n, \mathbf{p}_k) + \tilde{R}_k^{\text{rs}}(n), \\ \tilde{P}_k(m, n, \mathbf{k}_k) &= \tilde{P}_k^{\text{poly}}(m, n, \mathbf{k}_k) + \tilde{P}_k^{\text{rs}}(n).\end{aligned}\tag{2.61}$$

Использование предлагаемой двухкомпонентной поправки, аппроксимирующей остаточные после аффинной модели значения невязок от номера строки резиновым листом, позволяет достичь значения оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения невязок (таблица 6) 0,01 пикс. и 0,18 пикс. в кадровом направлении, и 0,01 пикс. и 0,41 пикс. — в строчном. Таким образом, целесообразно применять к скорректированной в результате блочного уравнивания модели съёмки поправку в пространстве растровых координат как функцию от номера строки, устраняющей остаточные невязки. Использование предлагаемой двухкомпонентной поправки позволяет повысить точность совмещения без ухудшения точности геопривязки и без внесения искажений за пределами областей расположения опорных и одноимённых точек.

2.4 Алгоритмы оптимизации параметров модели блочного уравнивания

2.4.1. В условиях оперативной обработки материалов площадной съёмки и при отсутствии опорной информации решение задачи минимизации (2.55) должно приводить к получению таких параметров модели поправок, при которых обеспечиваются наилучшие точностные показатели. Целью настоящего раздела является исследование подходов к решению задачи (2.55) при обработке данных площадной съёмки. В частности, выдвигается важное для практического использования требование — получение стабильных результатов в отсутствие опорной информации. В рамках раздела необходимо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать работу оригинального алгоритма [36] блочного уравнивания в условиях отсутствия опорной информации;
- 2) исследовать применение многоцелевого эволюционного алгоритма для решения задачи оптимизации параметров блочного уравнивания;
- 3) разработать численно-устойчивый алгоритм блочного уравнивания.

2.4.2. Алгоритм блочного уравнивания изображений, геопривязанных по RPC-модели съёмки, был предложен в работе [36]. Входными данными алгоритма являются коэффициенты RPC-моделей уравниваемых изображений, набор опорных и одноимённых точек. Суть алгоритма заключается в начальной оценке неизвестных уравнивания: геодезических координат ОИТ и параметров модели уравнивания; итерационном уточнении неизвестных линеаризацией уравнений невязок в окрестности значений неизвестных до достижения сходимости. Параметрами алгоритма являются: полиномиальная модель уравнивания каждого изображения, рассматриваемая далее в настоящей работе; минимальное значение разницы суммы квадратов невязок между итерациями ΔV ; максимальное число итераций S . Обобщённая схема алгоритма представлена на рис. 2.10.

Метод Гаусса-Ньютона заключается в итеративном поиске решения нелинейной системы сведением её к линейной в окрестности приближенного решения $\Theta^{(i)}$, найденного на очередной итерации i . В качестве начального приближенного решения (символ 2) $\Theta^{(0)}$ авторами предлагается использовать приближённые геодезические координаты ОИТ и нулевые значения параметров моделей уравнивания. Система невязок разлагается в ряд Тейлора. Решением полученной системы линейных уравнений является вектор приращений $d\Theta^{(i)}$ к неизвестным нелинейной системы $\Theta^{(i)}$. Выполняется расчёт матрицы плана \mathbf{A} (символ 4), со-

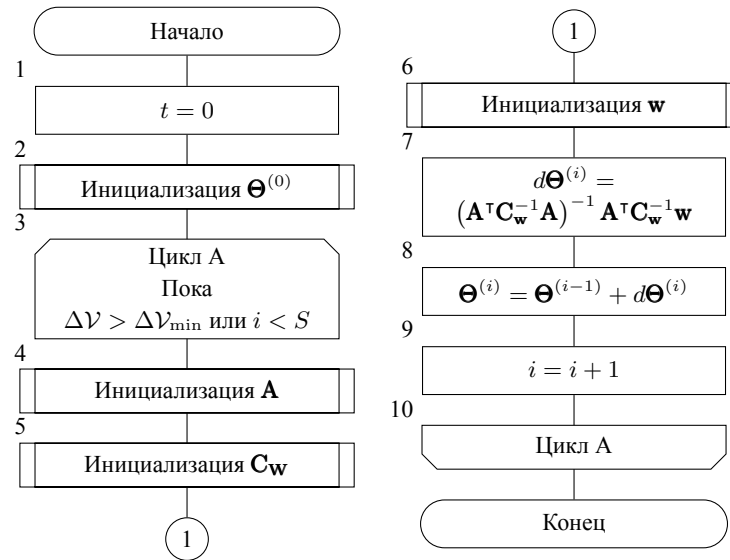


Рисунок 2.10 — Алгоритм решения задачи блочного уравнивания в соответствии с оригинальной работой [36]

держащей первые производные уравнений невязок относительно неизвестных параметров моделей уравнивания и истинных геодезических координат. Формируется ковариационная матрица C_w неизвестных (символ 5), вводящая априорную информацию о точности оценок неизвестных. В соответствии с текущими значениями неизвестных рассчитывается вектор невязок w (символ 6). В конце итерации s получают приращения к вектору неизвестных $d\Theta^{(i)}$ (символ 7), обновляется вектор неизвестных $\Theta^{(i)}$ (символ 8). Процедура повторяется до достижения сходимости или прерывания после превышения числа итераций (символ 3), где

$$\Delta\mathcal{V} = \left| \mathcal{V}^{(i)} - \mathcal{V}^{(i-1)} \right|, \quad (2.62)$$

где $\mathcal{V}^{(i)}$, $\mathcal{V}^{(i-1)}$ — суммы квадратов невязок на итерациях i и $i - 1$ соответственно.

Применим приведённый классический алгоритм решения задачи блочного уравнивания на наборе реальных данных с КА «Ресурс-П» № 1 без использования опорной информации для анализа его численной стабильности. В качестве тестового сюжета были использованы 2 изображения с 4 ОИТ, расположенными в углах области перекрытия. На рис. 2.11 отображена схема взаимного расположения ортотрансформированных изображений: пунктиром выделены описанные вокруг маршрутов прямоугольные области; сплошной линией — области определения маршрутов; символом «кружок» показаны ОИТ.

Планарные координаты ОИТ, соответствующие оценки геодезических координат в системе WGS 84 и невязки в строчном и кадровом направлениях

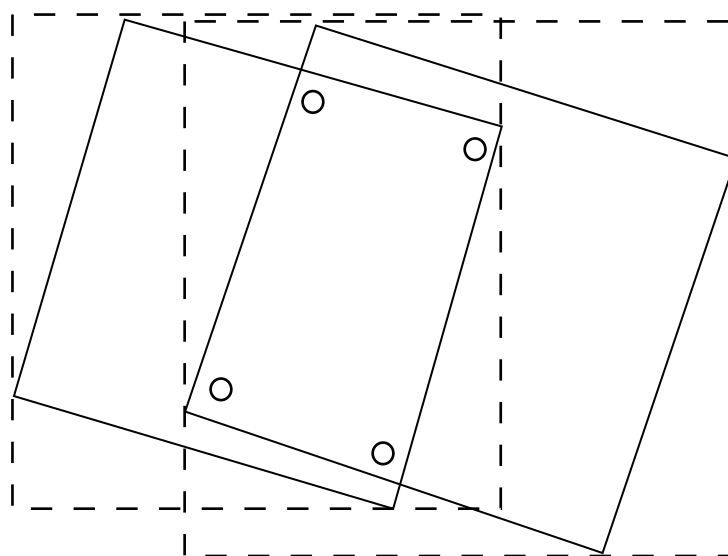


Рисунок 2.11 — Схема взаимного расположения ортотрансформированных изображений тестового сюжета для оценки численной стабильности алгоритма блочного уравнивания

отражены в таблице 7. Сумма квадратов невязок до выполнения уравнивания составляет 974,568.

Таблица 7 — Одноимённые точки тестового сюжета блочного уравнивания без использования опорной информации

№	Маршрут 1				Маршрут 2				Геодезические координаты, WGS 84		
	m	Δm	n	Δn	m	Δm	n	Δn	$B, ^\circ$	$L, ^\circ$	$H, \text{ м}$
1	5920	-12,56	24 010	-6,06	10 870	0,29	2951	-6,12	55,9928	37,8645	183
2	5987	-13,76	40 724	-14,13	10 555	0,29	18 078	-6,52	55,9646	38,0451	183
3	37 973	-10,91	23 747	-1,22	41 072	0,30	3545	-6,14	55,7999	37,7676	183
4	40 948	-10,43	40 358	-0,52	43 499	0,30	18 633	-6,54	55,7544	37,9376	183

В соответствии с классическим алгоритмом составляется система уравнений невязок с целью поиска истинных геодезических координат ОИТ и параметров аффинной модели уравнивания (6 коэффициентов для каждого изображения). Решение составленной системы нелинейных уравнений осуществляется методом линеаризации в окрестности начальных оценок неизвестных. В результате выполнения экспериментов выявлена численная нестабильность алгоритма: с выполнением каждой итерации величина суммы квадратов невязок увеличивалась (таблица 8). Ввиду того, что геодезические координаты не ограничены опорной информацией и ограничениями на диапазон допустимых значений, найденные значения координат не являются адекватными.

Таблица 8 — Результат выполнения одной итерации классического алгоритма блочного уравнивания без использования опорной информации

№	Маршрут 1		Маршрут 2		Геодезические координаты, WGS 84		
	Δm	Δn	Δm	Δn	$B,^\circ$	$L,^\circ$	$H, \text{ м}$
1	$-7,69 \cdot 10^4$	$4,32 \cdot 10^3$	$3,24 \cdot 10^2$	$4,32 \cdot 10^3$	50 060,0	24 960,9	168,0
2	$4,11 \cdot 10^3$	$-4,14 \cdot 10^2$	$-1,04 \cdot 10^5$	$-4,14 \cdot 10^2$	79 249,9	24 454,7	167,5
3	$-1,77 \cdot 10^5$	$-4,19 \cdot 10^4$	$2,18 \cdot 10^5$	$-4,19 \cdot 10^4$	-2718,6	-1376,1	167,9
4	$1,29 \cdot 10^7$	$3,43 \cdot 10^5$	$5,00 \cdot 10^3$	$3,43 \cdot 10^5$	10 070,5	50 118,1	167,8

Причиной численной нестабильности реализации является отсутствие ограничений процесса поиска решения в виде ОТ. В отсутствие опорных точек уравниваемые снимки не привязаны к геодезической системе координат, вследствие чего невязки, вводящие штраф за отклонение от исходных геодезических координат, не определены. Это приводит к тому, что матрица нормальных уравнений становится вырожденной, а функция суммы квадратов невязок может достигать минимума при таких значениях неизвестных, при которых уравненная RPC-модель камеры будет далека от истинной.

Таким образом, при решении задачи (2.55) алгоритмом [36] выявлен основной недостаток — отсутствие ограничений области поиска, порождающее численную нестабильность алгоритма. Устранение данного недостатка требует двух взаимно дополняющих подходов:

- 1) регуляризации задачи путём введения ограничений области поиска, обеспечивающих невырожденность матрицы нормальных уравнений и сохранение точности геопривязки;
- 2) выработки подходов к поэтапному решению задачи, на каждом этапе которого регуляризованная система решается алгоритмом оптимизации нелинейных уравнений.

2.4.3. Прежде чем перейти к разработке вычислительно эффективного алгоритма блочного уравнивания, необходимо убедиться в принципиальной разрешимости задачи (2.55) в отсутствие опорной информации. Получение решения, не зависящего от начального приближения и устойчивого к вырождению матрицы нормальных уравнений, подтвердит достижимость корректного результата уравнивания без опорных точек. Такое решение послужит ориентиром при последующей разработке вычислительно эффективного алгоритма.

Блочное уравнивание групп снимков в задаче (2.55) предполагает объединение физически разнородных невязок — растровых координат, геодезических координат, согласованности с цифровой моделью рельефа, — которые различаются по единицам измерения и масштабу. Вклад невязок определяется весом [108] — погрешностью измерений входных данных, приводящим к безразмерной единице измерения.

Выбор весов в единой функции суммы квадратов является субъективным и фактически задаёт фиксированный баланс между физически разнородными группами невязок, что может приводить к подавлению одних ограничений другими. Представление каждой группы невязок в виде отдельной целевой функции позволяет избежать произвольного выбора весов между группами и сохранить физический смысл каждого ограничения. В этом случае ставится задача многоцелевой оптимизации (МЦО), решением которой является не единственная точка, в которой достигается минимум, а множество Парето-оптимальных решений, отражающих различные компромиссы между конкурирующими целями.

Разобьём компоненты задачи (2.55) на целевые функции в соответствии с физическим смыслом групп невязок. Первая целевая функция \mathcal{V}_1 описывает невязки планарных координат для ОИТ и ОТ, то есть

$$\mathcal{V}_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{J_k+Q_k} \frac{\Delta m_{k,l}^2 + \Delta n_{k,l}^2}{\sigma_{k,l}^{(p)2}}. \quad (2.63)$$

Вторая \mathcal{V}_2 описывает невязки в плане и по высоте для ОТ при их наличии как

$$\mathcal{V}_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \left[\frac{\Delta x_{k,j}^2 + \Delta y_{k,j}^2}{\sigma_{k,j}^{(пл)2}} + \frac{\Delta H_{k,j}^2}{\sigma_{k,j}^{(выс)2}} \right]; \quad (2.64)$$

Третья \mathcal{V}_3 описывает невязки высот относительно цифровой модели рельефа, а именно

$$\mathcal{V}_3 = \sum_{s=1}^Q \frac{\Delta h_s^2}{\sigma^{(h)2}}. \quad (2.65)$$

В отсутствие опорных точек функция \mathcal{V}_2 не определена, что соответствует проблеме отсутствия ограничений поиска, выявленной ранее (функция \mathcal{V}_3 определена при наличии ЦМР независимо от ОТ). Для её устранения вводится дополнительная целевая функция \mathcal{V}_4 , ограничивающая величину поправок полиномиальной

модели (2.57) и тем самым предотвращая уход решения в физически недопустимую область, то есть

$$\mathcal{V}_4 = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^{|\rho_k|} \left(\frac{\rho_k^{(i)}}{\sigma_k^{(m)}} \right)^2 + \sum_{i=1}^{|\kappa_k|} \left(\frac{\kappa_k^{(i)}}{\sigma_k^{(m)}} \right)^2 \right], \quad (2.66)$$

$\sigma_k^{(m)}$ — регуляризационный параметр, ограничивающий величину поправок для изображения $I_k(m, n)$ в рамках одной целевой функции. Итоговая задача многоцелевой оптимизации принимает вид:

$$\mathcal{F}(\Theta) = \begin{pmatrix} \mathcal{V}_1(\Theta) \\ \mathcal{V}_2(\Theta) \\ \mathcal{V}_3(\Theta) \\ \mathcal{V}_4(\Theta) \end{pmatrix} \rightarrow \min_{\Theta}. \quad (2.67)$$

Среди алгоритмов МЦО наибольшее распространение получили эволюционные алгоритмы на основе генетического поиска. Эволюционные алгоритмы также успешно применяются для построения и идентификации математических моделей в смежных задачах системного анализа и обработки информации [143; 144]. Недоминируемый генетический алгоритм сортировки (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) [145] реализует быструю недоминируемую сортировку с вычислительной сложностью $O(MN^2)$, где M — число целевых функций, N — размер популяции. В отличие от методов на основе декомпозиции [146], NSGA-II не требует явного задания весовых векторов между целевыми функциями, что согласуется с принятой постановкой задачи. Механизм вытеснения на основе расстояния скученности обеспечивает равномерное распределение решений вдоль Парето-фронта без дополнительной параметризации.

Алгоритм демонстрирует наилучшую сходимость при числе целевых функций 2–3 [147]. В рассматриваемой задаче функции \mathcal{V}_2 и \mathcal{V}_3 присутствуют одновременно лишь при наличии как опорных точек, так и цифровой модели рельефа. В типичных сценариях число одновременно активных целевых функций не превышает трёх, что соответствует области эффективного применения NSGA-II. Алгоритм NSGA-III [148], обеспечивающий лучшую сходимость при четырёх и более целях, требует от пользователя дополнительной настройки референсных точек, что снижает его практическую применимость при автоматической обработке.

Применение NSGA-II в задаче блочного уравнивания обосновано следующим:

- 1) в отсутствие опорных точек начальное приближение, достаточное для корректной линеаризации, недоступно. NSGA-II не предъявляет требований к начальному приближению и производит поиск по всей допустимой области.
- 2) баланс между группами невязок может зависеть от конкретного маршрута. NSGA-II формирует Парето-фронт, явно отображающий достижимые компромиссы между целевыми функциями \mathcal{V}_1 – \mathcal{V}_4 .
- 3) основная идея использования NSGA-II — локализация области глобального оптимума из произвольного начального приближения.

В качестве оптимизационного метода используется модификация алгоритма NSGA-II, предложенная ранее при участии автора настоящей работы [131] и снижающая зависимость качества решения от ручного подбора параметров алгоритма. Рассмотрим её применение к решаемой задаче. Каждая особь популяции представляет собой хромосому, кодирующую полный вектор неизвестных задачи уравнивания Θ , то есть аффинной полиномиальной поправки (2.57) RPC-модели $(\mathbf{p}_k, \mathbf{k}_k)$ для каждого изображения $I_k(m, n)$ и геодезические координаты ОИТ и ОТ при их наличии. Значения целевых функций \mathcal{V}_1 – \mathcal{V}_4 вычисляются непосредственно по хромосоме и образуют вектор приспособленности особи.

Алгоритм выполняется в следующей последовательности.

1. Инициализация популяции. Популяция из P хромосом инициализируется равномерно в допустимой области поиска по каждой компоненте Θ . Все родители первого поколения делятся на $\Psi = m \cdot t_c \cdot t_m$ равных групп, каждая из которых соответствует определённому набору значений вероятности скрещивания p_c и индексов распределения операторов скрещивания η_c и мутации η_m .
2. Недоминируемая сортировка. Над популяцией производится недоминируемая сортировка [145] по значениям \mathcal{V}_1 – \mathcal{V}_4 : особи разбиваются на фронты Парето, где первый фронт содержит недоминируемые решения, второй — недоминируемые среди оставшихся, и так далее.
3. Расчёт скученности. Всем особям популяции присваивается значение расстояния скученности — оценки плотности окружения в пространстве целевых функций, обеспечивающей равномерное распределение решений вдоль Парето-фронта.

4. Селекция. Особи отбираются посредством бинарного турнира на основе оператора сравнения скученности: предпочтение отдаётся особи с меньшим номером фронта, а при равенстве фронтов — особи с большим расстоянием скученности.
5. Применение генетических операторов и самонастройка. Дочернее поколение формируется посредством моделируемого бинарного скрещивания и полиномиальной мутации. Параметры операторов (p_c, η_c, η_m) определяются группой родителя. По завершении шага оценивается успешность каждой группы по доле её представителей в результирующей популяции. В соответствии со способом 1 самонастройки [131]:
 - если «неуспешная» группа одна, её размер в следующем поколении уменьшается на 1; изымаемая хромосома выбирается случайным образом;
 - если «успешная» группа одна, её размер увеличивается на 1; новая хромосома генерируется мутацией на основе имеющихся в группе хромосом;
 - если «неуспешных» или «успешных» групп несколько, случайным образом выбирается одна из них для соответствующего изменения размера;
 - группа, не имеющая представителей в текущей популяции или сократившаяся до размера 1, исключается из рассмотрения; размер «успешной» группы увеличивается так, чтобы суммарный размер групп оставался равным P .
6. Формирование следующего поколения. Дочернее поколение объединяется с текущей популяцией, после чего производится отбор P лучших особей на основе номера фронта и расстояния скученности.

Шаги 3–6 повторяются до выполнения критерия останова. По завершении алгоритма из полученного Парето-фронта выбирается решение, соответствующее точке перегиба (knee point) [149]. Точка перегиба определяется как точка Парето-фронта, наиболее удалённая от гиперплоскости выпуклой оболочки индивидуальных минимумов, и соответствует наилучшему балансу между конкурирующими целевыми функциями.

Применим модифицированный алгоритм к маршрутам 2.1 и 2.2 (характеристики представлены в таблице 5). При этом в рамках эксперимента численной стабильности выполним модифицированный алгоритм для набора данных

с опорными точками и без опорных точек. Заданы следующие общие параметры алгоритма: число поколений 1000; размер популяции 200; индексы распределения принадлежат множеству $\{10, 20, 30\}$; значения вероятностей скрещивания — множеству $\{0,9, 0,8, 0,7\}$. При выполнении алгоритма на данных с опорными точками имеется 399 неизвестных (при 40 ОТ, 89 ОИТ, 12 параметров модели уравнивания) 657 уравнений; без опорных точек: 279 неизвестных и 457 уравнений.

В результате получены распределения значений целевых функций на каждом поколении при выполнении алгоритма с опорными точками (рис. 2.12а–в) и без опорных точек (рис. 2.12г–е). Сплошной линией (обозначенной на графике min) показано минимальное значение целевой функции, среди особей из Парето-фронта; пунктирной (обозначенной на графике knee) — значение целевой функции в точке перегиба Парето-фронта.

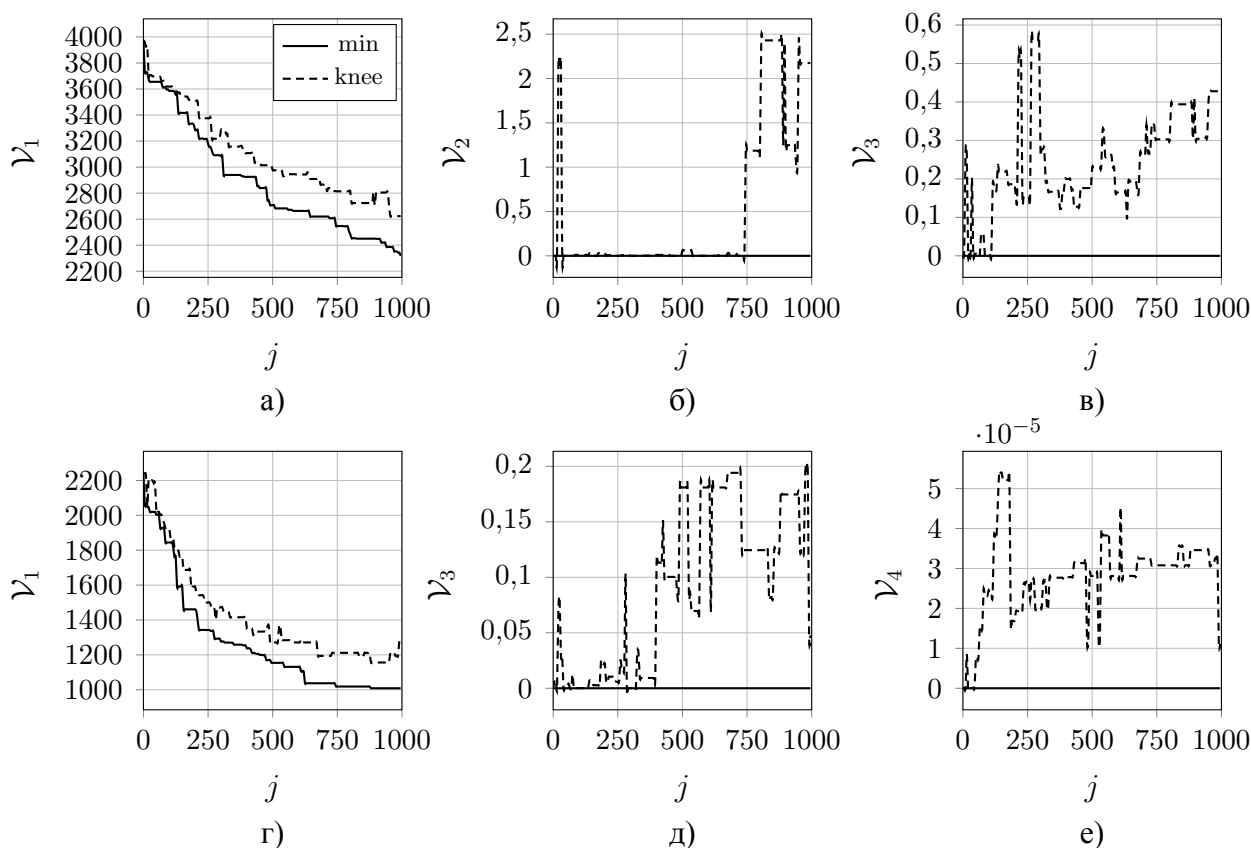


Рисунок 2.12 — Распределение значений целевых функций отобранных особей Парето-фронта на каждом j -м поколении алгоритма NSGA-II: (а)–(в) — с опорными точками; (г)–(е) — без опорных точек

Применение алгоритма на данных с опорными точками позволило достичь показателей точности геопривязки изображений $\bar{\sigma}_{2.1}^{(OT)} = 1,86$ м и $\bar{\sigma}_{2.2}^{(OT)} = 2,49$ м,

точности совмещения $\bar{\sigma}_{2.1,2.2}^{(\text{ОИТ})} = 1,11$ м; без опорных точек — $\bar{\sigma}_{2.1}^{(\text{ОТ})} = 2,01$ м, $\bar{\sigma}_{2.2}^{(\text{ОТ})} = 2,94$ м, $\bar{\sigma}_{2.1,2.2}^{(\text{ОИТ})} = 1,14$ м. На графиках (рис. 2.12а, г) наблюдается монотонное убывание минимального значения \mathcal{V}_1 по поколениям в обоих сценариях, что свидетельствует о сходимости алгоритма. Значение \mathcal{V}_1 в точке перегиба устойчиво превышает минимум, поскольку точка изгиба отражает баланс между всеми целевыми функциями, а не оптимальное значение по \mathcal{V}_1 в отдельности. Нестабильность \mathcal{V}_2 и \mathcal{V}_3 в поколениях 750–1000 (рис. 2.12б, в) обусловлена исследованием алгоритмом областей с улучшенным \mathcal{V}_1 за счёт временного ухудшения геодезических невязок. Результаты точности получены для решения, соответствующего точке перегиба финального поколения. Вычислительная сложность одной итерации NSGA-II составляет $O(MN^2)$ [145], где M — число целевых функций, N — размер популяции. Поскольку размер популяции должен быть пропорционален числу неизвестных n для обеспечения достаточного разнообразия поиска, суммарная сложность алгоритма за G поколений составляет $O(MGn^2)$. При решении задачи с опорными точками ($n = 399$, $G = 1000$, $M = 3$) и без опорных точек ($n = 279$, $G = 1000$, $M = 3$) отношение вычислительных затрат пропорционально $(399/279)^2 \approx 2,0$, что согласуется с наблюдаемым соотношением времён выполнения 1 мин 36 с и 51 с.

На основе полученных результатов могут быть сделаны следующие выводы относительно применения NSGA-II в задаче блочного уравнивания:

- 1) алгоритм обеспечивает численно устойчивое решение задачи блочного уравнивания в отсутствие опорной информации, что подтверждается сопоставимыми показателями точности геопривязки и совмещения изображений в обоих сценариях и свидетельствует о принципиальной разрешимости задачи без опорных точек;
- 2) вычислительная сложность алгоритма $O(MN^2)$ [145] в сочетании с ростом размера популяции при увеличении числа неизвестных делает время выполнения неприемлемым для оперативной обработки данных дистанционного зондирования.

Таким образом, принципиальная разрешимость задачи в отсутствие опорной информации подтверждена, а дальнейшая разработка состоит в построении алгоритма, обеспечивающего эквивалентную численную устойчивость при вычислительных затратах, приемлемых для оперативной обработки.

2.4.4. Рассмотрим решение задачи (2.55) в несколько этапов, для устранения численной неустойчивости в отсутствие опорной информации, а именно модифи-

кацию алгоритма [150]. Модифицированный алгоритм (рис. 2.13) состоит из трёх этапов [79]:

- 1) оценки геодезических координат ОИТ и их преобразование в виртуальные опорные точки (ВОТ) при необходимости (символы 1–5);
- 2) решения задачи блочного уравнивания относительно параметров модели уравнивания (символы 6–8);
- 3) аппроксимация остаточных невязок ОИТ при превышении допустимого порога (символы 9–13).

На вход алгоритма поступают:

- 1) коэффициенты прямой RPC-модели геопривязки $R_k, P_k, k = \overline{1, K}$;
- 2) растровые координаты одноимённых и опорных точек $(m_{k,l}, n_{k,l})$, с погрешностью измерений $\sigma_{k,l}^{(p)}, l = \overline{1, J_k + Q_k}$;
- 3) геодезические координаты опорных точек $(B_{k,j}, L_{k,j}, H_{k,j})$, с погрешностями измерений $\sigma_{k,j}^{(пл)}, \sigma_{k,j}^{(выс)}, j = \overline{1, J_k}$;
- 4) ЦМР в виде функции $\tilde{h}(B, L)$;
- 5) пороговое значение среднеквадратической ошибки суммарной невязки в ОИТ $\sigma_{\max}^{(ОИТ)}$;
- 6) максимально допустимое значение ухудшения точности геопривязки $\bar{\sigma}_{\text{доп}}$.

Результатом выполнения алгоритма являются:

- 1) модели поправок \tilde{R}_k, \tilde{P}_k , в том числе параметры \mathbf{p}_k и \mathbf{k}_k ;
- 2) уточнённые геодезические координаты одноимённых точек $(\hat{B}_s, \hat{L}_s, \hat{H}_s)$, $s = \overline{1, Q}$, и опорных точек $(\hat{B}_{k,j}, \hat{L}_{k,j}, \hat{H}_{k,j})$, $j = \overline{1, J_k}$.

Первый этап алгоритма предназначен для повышения численной стабильности поиска параметров уравнивания за счёт решения задачи (2.55) с начальными значениями вектора неизвестных Θ_1 — геодезических координат ОИТ, близких к искомым. Для одноимённой точки $q, q = \overline{1, Q_k}$, пересечения изображений $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ по численно обращенной RPC-модели вычисляются (символ 1) начальные оценки геодезических координат (\hat{B}_s, \hat{L}_s) , $s = \overline{1, Q}$, а высота \hat{H}_s извлекается из ЦМР:

$$\begin{aligned} \hat{B}_s &= \frac{1}{2} \left[R_k^{-1} (m_{k, \nu+q}, n_{k, \nu+q}, \bar{H}_k) + R_{k+1}^{-1} (m_{k+1, \eta+q}, n_{k+1, \eta+q}, \bar{H}_{k+1}) \right], \\ \hat{L}_s &= \frac{1}{2} \left[P_k^{-1} (m_{k, \nu+q}, n_{k, \nu+q}, \bar{H}_k) + P_{k+1}^{-1} (m_{k+1, \eta+q}, n_{k+1, \eta+q}, \bar{H}_{k+1}) \right], \\ \hat{H}_s &= \tilde{h}(\hat{B}_s, \hat{L}_s), \end{aligned} \quad (2.68)$$

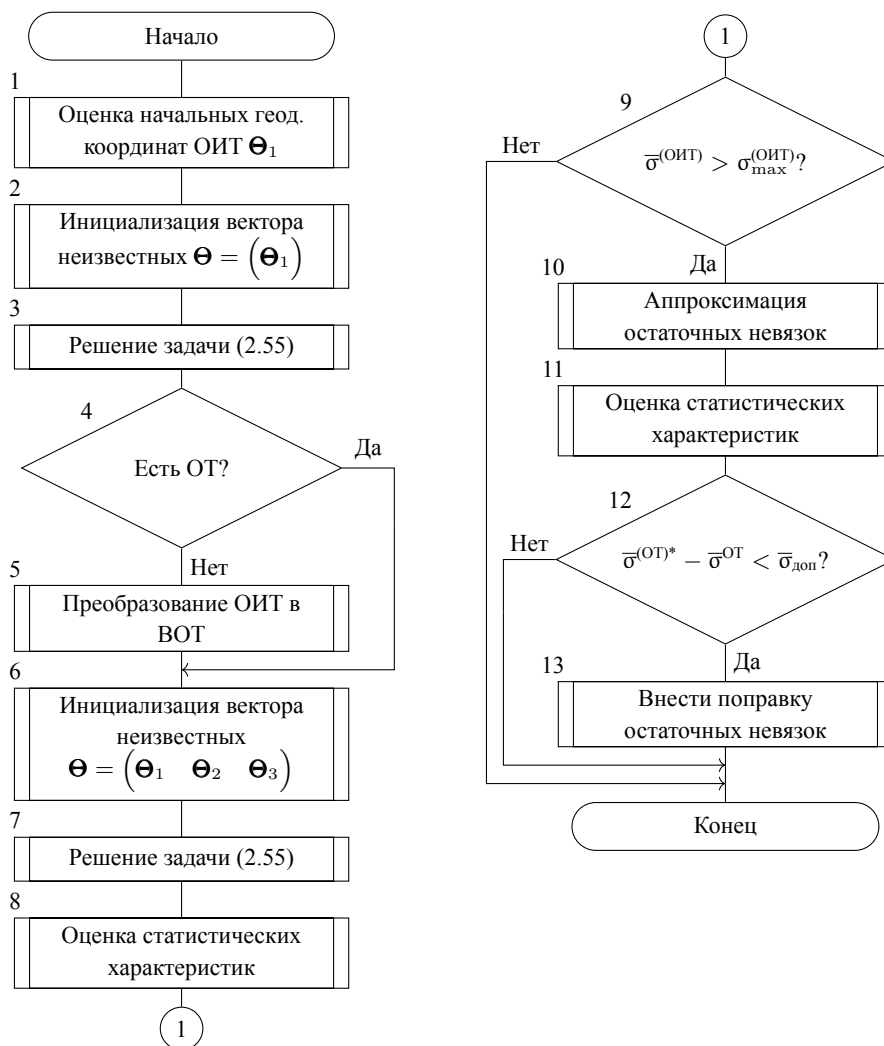


Рисунок 2.13 — Численно устойчивый алгоритм блочного уравнивания

где R_k^{-1} , P_k^{-1} , R_{k+1}^{-1} , P_{k+1}^{-1} — численно обращённые соотношения (1.3) получения геодезических координат на изображениях $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ по растровым координатам; \bar{H}_k , \bar{H}_{k+1} — средняя высота изображений $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$ соответственно, рассчитываемая по ЦМР. Вектор неизвестных инициализируются рассчитанными начальными оценками Θ_1 . Решение задачи (2.55) находится при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта (символ 3) [151; 152]. Физический смысл такой оценки геодезических координат ОИТ заключается в решении системы уравнений, описывающих пересечение визирных лучей моделей съёмки на заданной высоте местности.

Решение задачи (2.55) на каждом этапе алгоритма выполняется методом Левенберга-Марквардта с регуляризацией матрицы нормальных уравнений. При этом численная устойчивость решения в отсутствие опорной информации обеспечивается не регуляризирующим параметром алгоритма Левенберга-

Марквардта, а введением виртуальных опорных точек, ограничивающих область поиска решения и устраняющих вырождение матрицы нормальных уравнений.

Затем, если на изображениях не определены опорные точки, для предотвращения ухудшения геопривязки ОИТ преобразуются в ВОТ (символ 5). Пересечение изображений $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$ разбивается на 10 равномерных областей. Среди одноимённых точек, попавших в область, случайным образом выбираются для преобразования в виртуальные опорные до 50 % от общего числа. Пусть q -я одноимённая точка на изображениях $I_k(m,n)$ и $I_{k+1}(m,n)$, соответствующая s -й точке во множестве всех ОИТ, и характеризуемая парой растровых координат $(m_{k,\nu+q}, n_{k,\nu+q})$ и $(m_{k+1,\eta+q}, n_{k+1,\eta+q})$ с оценками геодезических координат $(\hat{B}_s, \hat{L}_s, \hat{H}_s)$, найденными в символе 3, выбрана для преобразования в ВОТ. Тогда на изображение $I_k(m,n)$ добавим опорную точку с растровыми координатами $(m_{k,\eta}, n_{k,\eta})$ с точностью измеренных координат $\sigma^{(p)}$ и геодезическими координатами $(\hat{B}_s, \hat{L}_s, \hat{H}_s)$ с точностью измерений высоты $\sigma^{(h)}$. Точность измерения плановых координат виртуальной опорной точки $\sigma^{(пл)}$ является параметром алгоритма. Поскольку геодезические координаты ВОТ вычисляются прямой засечкой визирных лучей по исходным RPC-моделям, а их точность определяется точностью этих моделей, $\sigma^{(пл)}$ задаётся равной априорной точности геопривязки обрабатываемых изображений уровня обработки L2A. Назначение веса ВОТ, соответствующего точности исходной геопривязки, обеспечивает мягкое ограничение области поиска: ВОТ устраняют вырождение матрицы нормальных уравнений. Для материалов КА «Ресурс-П» данная величина составляет 10 м.

Идея использования виртуальных опорных точек для блочного уравнивания спутниковых изображений предложена в [40], где они применяются для предотвращения деформации масштабного блочного уравнивания в высотном направлении и отбираются по регулярной сетке с учётом рельефа местности. В отличие от указанного подхода, в настоящей работе виртуальные опорные точки формируются непосредственно из одноимённых точек площадной съёмки.

На втором этапе алгоритма вектор неизвестных инициализируется (символ 6) уточнёнными геодезическими координатами одноимённых точек изображений Θ_1 , измеренными геодезическими координатами опорных точек Θ_2 , и искомыми параметрами моделей поправок Θ_3 . В результате решения (символ 7) задачи (2.55) оцениваются (символ 8) статистические характеристики точности, а именно: точность геопривязки $\bar{\sigma}_k^{(OT)}$ по формуле (1.7) для каждого изображения $I_k(m,n)$; общую точность геопривязки $\bar{\sigma}^{(OT)}$ на множестве всех ОИТ и ОТ

по формуле (1.7); точность совмещения $\bar{\sigma}_k^{(\text{ОИТ})}$ изображений $I_k(m, n)$ и $I_{k+1}(m, n)$; общую точность совмещения $\bar{\sigma}^{(\text{ОИТ})}$ после применения поправок.

На третьем этапе алгоритма анализируется полученная в результате блочного уравнивания точность совмещения изображений. Если показатель общей точности совмещения $\bar{\sigma}^{(\text{ОИТ})}$ превышает пороговое значение $\sigma_{\text{max}}^{(\text{ОИТ})}$, выполняется расчёт параметров поправки остаточных невязок (символ 10) в одноимённых точках. С учётом найденных на этапе 2 параметров модели и параметров поправки остаточных невязок рассчитываются статистические характеристики (символ 11), в том числе точность геопривязки после применения поправки остаточных невязок $\bar{\sigma}^{(\text{ОТ})*}$. Если совместное применение указанных поправок не ухудшает общую точность привязки, то есть

$$\bar{\sigma}^{(\text{ОТ})*} - \bar{\sigma}^{(\text{ОТ})} < \bar{\sigma}_{\text{доп}}, \quad (2.69)$$

то результатом работы алгоритма становится двухкомпонентная модель поправок; иначе — однокомпонентная модель поправок из этапа 2.

Результаты применения разработанного алгоритма представлены в таблице 6. Разработанный алгоритм программно реализован в комплексе формирования информационных продуктов по данным с КА «Ресурс-П» для выполнения высокоточного блочного уравнивания материалов съёмки [153].

Выводы по главе 2

1. В главе рассмотрены задачи геометрической обработки мозаичных снимков. В частности, рассмотрен алгоритм поиска коэффициентов унифицированной RPC-модели съёмки и статистические показатели, используемые для оценки точности аппроксимации строгой модели. Выполнена практическая оценка результатов аппроксимации RPC-моделью снимков, полученных с аппаратуры высокого и среднего пространственного разрешения серии космических аппаратов «Ресурс-П». Выработаны практические рекомендации по организации высокоточной обработки данных на основе RPC-модели съёмки. Показано, что наибольшая точность аппроксимации обеспечивается для изображений уровня обработки L2A, в которых скомпенсировано сложное угловое движение КА.

2. Разработан трёхэтапный алгоритм фильтрации одноимённых точек на основе гибридной интеллектуальной технологии классификации данных, позволяющий повысить точность и полноту формируемого множества корректных соответствий пар ключевых точек (Положение 1). Экспериментальная проверка на материалах площадной съёмки показала, что предлагаемый алгоритм обеспечивает долю ложных сопоставлений на уровне $\approx 2\%$.

3. Разработана математическая модель блочного уравнивания групп снимков с использованием RPC-модели. Выполнен анализ на натуральных данных от КА серии «Ресурс-П» распределений невязок в строчном и кадровом направлениях. Показано, что в результате применения полиномиальной (аффинной) модели поправок блочного уравнивания в одноимённых точках присутствуют невязки, аппроксимируемые полиномиальной функцией от индекса строки изображения. На основе проведённого анализа предложена двухкомпонентная модель поправок для устранения остаточных невязок.

4. Проанализированы алгоритмы оптимизации параметров математической модели блочного уравнивания в условиях отсутствия опорной информации. Показано, что прямое применение метода Гаусса-Ньютона без регуляризации к задаче (2.55) в отсутствие опорной информации приводит к вырождению матрицы нормальных уравнений.

На основе многоцелевого эволюционного алгоритма оптимизации NSGA-II подтверждена принципиальная разрешимость задачи блочного уравнивания в отсутствие опорной информации. Предложен численно устойчивый алгоритм блочного уравнивания (Положение 2), в котором численная устойчивость в отсутствие опорной информации обеспечивается виртуальными опорными точками (BOT), а точность совмещения повышается двухкомпонентной поправкой к RPC-модели. Первая компонента поправки — аффинная модель — устраняет систематические ошибки в одноимённых и опорных точках; вторая — компенсирует остаточные невязки в одноимённых точках методом резинового листа. В отличие от подхода [36], в котором уравнивание выполняется без ограничений области поиска, предложенный алгоритм за счёт регуляризации задачи виртуальными опорными точками стабильно уточняет RPC-модели без ухудшения геопривязки уравниваемых изображений.

5. Материалы главы опубликованы в работах [79; 109; 128; 131—137; 150; 154—160].

Глава 3. Алгоритмы синтеза и оценки качества мозаичных снимков

3.1 Синтез непрерывного мозаичного снимка

3.1.1. Рассмотрим синтез мозаичного снимка по данным площадной съёмки (рис. 3.1). В результате выполнения съёмки в площадном режиме получены K изображений земной поверхности $I_k(m,n)$, $k = \overline{1, K}$. В соответствии с этим режимом съёмки на одном витке территория снимается несколько раз под разными углами крена и тангажа. Результатом синтеза является мозаичное изображение в виде растра $I^T(x,y)$.



Рисунок 3.1 — Технологическая схема синтеза непрерывного мозаичного снимка по данным площадной съёмки

Входные изображения для синтеза сопровождаются RPC-моделями съёмки, параметры которых рассчитаны на этапе геометрической обработки (гл. 2), и могут быть представлены как по уровню обработки L1, так и L2A. При этом в настоящей работе показано, что по точностным характеристикам выходных продуктов, геопривязанных по RPC-модели, предпочтительно использование уровня обработки L2A. В этом случае входными данными являются изображения в системе координат картографической проекции, а не сканирующего устройства. Изображения уже прошли процедуры относительной радиометрической и сенсорной коррекции («сшивки») и геометрически непрерывны.

3.1.2. На первом этапе синтеза происходит поиск одноимённых точек. При необходимости дополнительного уточнения геопривязки могут опционально привлекаться опорные данные в виде опорного покрытия или абрисов; в штатном режиме работы технологии опорная информация не требуется. Поиск ОИТ выполняется следующим образом:

- 1) в соответствии с моделью геопривязки определяется расширенная область поиска ключевых точек;
- 2) выполняется предварительное сопоставление пар ключевых точек;
- 3) используется предложенный в разделе 2.2 алгоритм фильтрации одноимённых точек для формирования итогового множества надёжно идентифицированных соответствий.

В результате для каждой пары перекрывающихся изображений будут получены координаты одноимённых точек, состоящих из пар растровых координат. Полученные точки затем используются в процедуре блочного уравнивания.

3.1.3. Целью блочного уравнивания является поиск таких поправок в RPC-модель геопривязки, при которых минимизируются невязки в одноимённых и опорных точках. Из-за ошибок внешнего ориентирования камеры координатные рассогласования одноимённых объектов на объединяемых изображениях до уравнивания могут достигать десятков пикселей. В качестве алгоритма уравнивания предполагается использование численно-устойчивого алгоритма, предложенного в настоящей работе. В процессе выполнения блочного уравнивания важным является использование цифровой модели рельефа, которая будет задействована в процедуре ортотрансформирования изображения в картографическую проекцию. Физический смысл использования ЦМР заключается в привлечении опорной информации при поиске точки пересечения визирных лучей моделей съёмки каждого изображения. В результате блочного уравнивания формируются уточнённые модели геопривязки для каждого k -го изображения в виде соотношений R'_k и P'_k , определяемых как

$$\begin{aligned} n &= R'_k(B, L, H) = R_k(B, L, H) + \tilde{R}_k(m', n', \mathbf{p}_k), \\ m &= P'_k(B, L, H) = P_k(B, L, H) + \tilde{P}_k(m', n', \mathbf{k}_k), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $R_k(\cdot)$ и $P_k(\cdot)$ — соотношения RPC-модели съёмки, определённые в (1.3); \tilde{R}_k и \tilde{P}_k — поправки к RPC-модели в соответствии с (2.61).

3.1.4. Построение карты диспаратности выполняется одинаково для входных данных уровня L1 и L2A; далее процедура описана для изображений в системе координат сканирующего устройства. По результатам блочного уравнивания для каждой пары пересекающихся изображений $I_i(m, n)$ и $I_j(m, n)$ с уточнёнными моделями геопривязки R'_i, P'_i и R'_j, P'_j выполняется построение карты диспаратности в области пересечения фрагментов. Построение карт диспаратности осуществляется в системе координат эпиполярно выпрямленных изображений,

что позволяет свести задачу поиска соответствий между одноимёнными точками к одномерному поиску вдоль эпиполярных строк и тем самым повысить точность и вычислительную эффективность сопоставления [106; 116].

Эпиполярное выпрямление пары изображений заключается в таком перепроецировании исходных изображений из системы координат сканирующего устройства в общую эпиполярную систему координат (m_e, n_e) , при котором одноимённые точки располагаются на одной строке выпрямленного изображения. Обозначим эпиполярно выпрямленные изображения как $I_i^e(m_e, n_e)$ и $I_j^e(m_e, n_e)$. Для пикселя с координатами (m_e, n_e) в эпиполярной системе координат диспаратность определяется как вектор смещения положения одноимённой точки между выпрямленными изображениями:

$$\mathbf{D}(m_e, n_e) = \begin{pmatrix} D_x(m_e, n_e) \\ D_y(m_e, n_e) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_e^{(j)} - n_e^{(i)} \\ m_e^{(j)} - m_e^{(i)} \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

где $n_e^{(i)}$, $n_e^{(j)}$ и $m_e^{(i)}$, $m_e^{(j)}$ — координаты столбца и строки одноимённой точки в i -м и j -м эпиполярно выпрямленных изображениях соответственно. В идеальном случае эпиполярное выпрямление обеспечивает совпадение координат строк одноимённых точек, то есть $D_y = 0$, и диспаратность сводится к скалярной величине вдоль эпиполярных строк. Однако на практике остаточные ошибки выпрямления, обусловленные неточностями моделей геопривязки и аппроксимацией эпиполярных кривых, приводят к ненулевым значениям компоненты D_y . По этой причине в дальнейшем используются обе компоненты вектора диспаратности.

Привлечение карты диспаратности позволяет перейти от анализа радиометрических различий фрагментов мозаики к учёту трёхмерной геометрии наблюдаемой сцены при проведении линии пореза. Необходимость такого перехода обусловлена особенностями площадной съёмки высокого пространственного разрешения: в области пересечения смежных маршрутов условия наблюдения аналогичны стереоскопической съёмке, когда одна и та же область земной поверхности регистрируется под различными углами визирования. Вследствие этого проекции высотных объектов на пересекающихся изображениях оказываются пространственно смещены относительно друг друга, причём величина смещения определяется высотой объекта и разностью углов наблюдения. Известные в литературе алгоритмы построения линии пореза, основанные на стоимостных функциях, вычисляемых по значениям яркости пикселей [18;

95], обеспечивают качественное совмещение преимущественно для околонадирных изображений, в которых геометрические рассогласования высотных объектов пренебрежимо малы. При увеличении углов визирования, характерном для площадной съёмки, указанные рассогласования приводят к артефактам (двоение зданий, разрывы линейных объектов), которые не описываются известными радиометрическими критериями, так как яркостные различия в зонах смещения могут быть незначительны при однородной подстилающей поверхности. Использование карты диспаратности в качестве дополнительных признаков при формировании стоимостной функции позволяет явно учитывать геометрическую природу подобных рассогласований и тем самым устранять артефакты, недоступные для обнаружения методами, оперирующими исключительно яркостной информацией.

3.1.5. На следующем этапе происходит преобразование исходных изображений $I_k(m,n)$ с обновлёнными моделями геопривязки в картографическую проекцию аналогично строгой модели (1.2), то есть

$$I_k(m,n) \rightarrow I_k^T(x,y) : \quad (3.3)$$

$$x = F_x \left[P_k'^{-1}(m, n, H), R_k'^{-1}(m, n, H) \right],$$

$$y = F_y \left[P_k'^{-1}(m, n, H), R_k'^{-1}(m, n, H) \right],$$

где $R_k'^{-1}$, $P_k'^{-1}$ — численно обращённые соотношения (3.1) для получения геодезических координат по растровым на заданной высоте; F_x , F_y — уравнения картографического проектирования.

При этом важно корректно определить следующие параметры для набора изображений мозаики:

- 1) пространственное разрешение мозаичного изображения в метрах;
- 2) параметры системы координат картографической проекции;
- 3) размеры и параметры геопривязки мозаичного изображения.

Размер пикселя мозаики обычно принимается равным минимальному (лучшему) пространственному разрешению входящих в её состав фрагментов. Расчёт параметров системы координат картографической проекции выполняется для зонных проекций Гаусса-Крюгера или универсальной поперечной проекции Меркатора и заключается в определении номера зоны. Для этого по средней геодезической долготе центральных точек исходных снимков определяется номер зоны. При расчёте размеров и параметров геопривязки мозаичного изображения определяются координаты левого верхнего угла мозаики в картографической системе

координат, а также число строк и столбцов выходного растра. По угловым точкам объединяемых изображения находятся минимальные и максимальные значения северного и восточного указаний. Изображения ортотрансформируются в единый кадр мозаичного изображения. В процедуру ортотрансформирования передаются также целевой размер пикселя и координаты левого верхнего угла мозаики, учёт которых позволяет обеспечить формирование ортотрансформированных изображений в системах координат, смещённых на целое значение пикселей. Последнее позволяет избежать дополнительной яркостной интерполяции при объединении снимков в мозаику.

3.1.6. При необходимости яркостного выравнивания совмещаемых изображений (например, при различии средней яркости, обусловленном условиями съёмки) опционально выполняется фотовыравнивание. В работе [5] предложена математическая модель фотовыравнивания, позволяющая выровнять яркости совмещаемых изображений без потери динамического диапазона яркостей. Яркостное совмещение заключается в поиске значений фотометрических коэффициентов каждого изображения $u_k, v_k, k = \overline{1, K}$. Для областей пересечения каждой пары изображений i и j ($i = \overline{1, K}, j = \overline{1, K}, i \neq j$) формируется система уравнений

$$\begin{cases} \bar{b}_{i,j}u_i + v_i = \bar{b}_{j,i}u_j + v_j; \\ \sigma_{i,j}^{(b)}u_i = \sigma_{j,i}^{(b)}u_j, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $\bar{b}_{i,j}$ — среднее значение яркости изображения $I_i^T(x, y)$ в области пересечения с изображением $I_j^T(x, y)$; $\sigma_{i,j}^{(b)}$ — среднеквадратическое отклонение яркости изображения $I_i^T(x, y)$ в области пересечения с изображением $I_j^T(x, y)$. В результате решения системы с дополнительными условиями

$$\sum_{i=1}^K v_i = 0, \quad \prod_{i=1}^K u_i = 1, \quad u_1 = 1, \quad v_1 = 0, \quad (3.5)$$

получим искомые фотометрические коэффициенты, с использованием которых яркости изображений преобразуются как

$$\bar{I}_k^T(x, y) = u_k \cdot I_k^T(x, y) + v_k. \quad (3.6)$$

3.1.7. Настоящая глава посвящена вопросам проведения линии пореза и оценке качества синтезируемых мозаичных изображений, а именно:

- 1) постановке задачи проведения линии пореза и разработке алгоритма решения задачи, позволяющего учесть особенности площадной съёмки;

- 2) разработке алгоритма автоматической оценки качества дефектов, вносимых линией пореза;
- 3) выработке автоматизированной методики оценки точности геопривязки мозаичных изображений.

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

3.2 Алгоритм проведения линии пореза мозаичных изображений

3.2.1. Результатом процедуры ортотрансформирования, проведённой с учётом изложенных в разделе 3.1 особенностей, являются изображения в единой картографической системе координат, совмещённые в соответствии с уточнённой геодезической привязкой. На равнинной поверхности остаточное рассогласование одноимённых объектов после блочного уравнивания не превышает 1 пикс. Однако на высотных объектах вследствие условий съёмки под различными углами визирования и их отсутствия в цифровой модели рельефа рассогласование может достигать 20 пикс. Обозначим через $I_k^T(m,n)$ изображение k -го снимка, трансформированное в картографическую проекцию, где координаты (m,n) заданы в растровой системе координат мозаичного изображения.

Определим мозаичное изображение как дискретную функцию яркости $I^T(m,n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, где M, N — число столбцов и строк мозаики соответственно. Мозаичное изображение формируется по правилу,

$$I^T(m,n) = I_i^T(m_i, n_i), \quad i = \mu(m,n) = \min_k \{k = \overline{1, K} : e_k(m,n) \neq 0\}, \quad (3.7)$$

где $I_i^T(m_i, n_i)$ — функция яркости i -го фрагмента мозаики, определённая в диапазоне координат $m_i = \overline{m_i^{(0)}, m_i^{(0)} + M_i}$ и $n_i = \overline{n_i^{(0)}, n_i^{(0)} + N_i}$ в системе координат мозаики; $(m_i^{(0)}, n_i^{(0)})$ — координаты левого верхнего угла i -го фрагмента в системе координат мозаики; M_i, N_i — число столбцов и строк i -го фрагмента; $\mu(m,n)$ — функция получения индекса фрагмента, определённого в пикселе с координатами (m,n) ; $e_i(m,n)$ — бинарное изображение-маска i -го фрагмента, определяющее принадлежность изображения $I_i^T(m_i, n_i)$ мозаичному изображе-

нию в пикселе с координатами (m, n) . Тогда линия пореза определяется соответствующими изображениями-масками $e_i(m, n)$.

Проведение линии пореза традиционно сводится к поиску бинарных масок изображений, однако для её дальнейшей обработки целесообразно использовать представление в виде множества координат. Пусть E_i является множеством координат изображения-маски $e_i(m, n)$ с ненулевыми значениями яркости, то есть,

$$E_i = \{(m, n) : e_i(m, n) \neq 0\}. \quad (3.8)$$

Определим функцию $\mathcal{N}_8(m, n)$, возвращающую для пикселя с координатами (m, n) множество координат восьми соседних пикселей изображения. Тогда множество координат S линии пореза в области пересечения изображений $I_i^T(m_i, n_i)$ и $I_j^T(m_j, n_j)$ может быть определено как,

$$S = \{(m, n) \in E_i : |\mathcal{N}_8(m, n) \cap E_i| \neq 8 \wedge (m, n) \in E_j\}. \quad (3.9)$$

Для снижения визуального эффекта остаточных искажений в области линии пореза может быть использован полупрозрачный переход. Полупрозрачный переход строится с использованием функции нормализованного расстояния $\delta_{\text{норм}}(m, n)$, определённой в каждом пикселе мозаичного изображения (m, n) . При этом если в выражении (3.7) для формирования значения яркости в пикселе (m, n) использовался фрагмент мозаичного изображения с индексом $\mu(m, n)$, то полупрозрачный переход использует значения яркости фрагментов переднего плана с индексом $\mu_1(m, n)$ и фонового с индексом $\mu_2(m, n)$. С учётом этого выражение (3.7) примет вид

$$\tilde{I}^T(m, n) = \delta_{\text{норм}}(m, n) \cdot I_p^T(m_p, n_p) + (1 - \delta_{\text{норм}}(m, n)) \cdot I_q^T(m_q, n_q), \quad (3.10)$$

где

$$\begin{aligned} p = \mu_1(m, n) &= \min_k \{k = \overline{1, K} : e_k(m, n) \neq 0\}, \\ q = \mu_2(m, n) &= \min_k \{ \{k = \overline{1, K} : e_k(m, n) \neq 0\} \setminus \{\mu_1(m, n)\} \}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\delta_{\text{норм}}(m, n) = \begin{cases} 1, & \delta_e(m, n) \geq \chi \\ \frac{\delta_e(m, n)}{\chi}, & \delta_e(m, n) < \chi \end{cases}, \quad (3.12)$$

и $\delta_e(m, n)$ — функция евклидова расстояния от пикселя с координатами (m, n) до ближайшей границы фрагментов, определяемых по маскам $e_k(m, n)$; χ — диапазон полупрозрачного перехода.

3.2.2. В работе [18] предлагается порядко-независимый алгоритм морфологической композиции изображений. Алгоритм разработан для формирования мозаик на обширные территории из набора снимков среднего пространственного разрешения, полученных с КА Landsat. Предлагаемый авторами алгоритм обладает следующими свойствами:

- 1) порядко-независимость: возможность параллельной реализации проведения линии пореза для наборов изображений, при условии отсутствия пересечений между снимками наборов;
- 2) малые затраты памяти: для каждого обрабатываемого набора из K снимков необходимо хранить в памяти 3 вспомогательных изображения размером с активное изображение набора, вместо всех фрагментов мозаики целиком.

В результате анализа предметной области автоматического создания мозаичных изображений выявлено, что большинство рассмотренных алгоритмов предполагают выполнение следующих действий [161]: определение функции целесообразности проведения линии пореза в элементе изображения — стоимостной функции [95]; проведение линии пореза на основе стоимостной функции. В частности, авторами алгоритма порядко-независимой композиции изображений используются: в качестве стоимостной функции — поэлементный минимум морфологического градиента фрагментов; в качестве функции сегментации — морфологический водораздел. В мозаике разрезом графа [95] используется композиционная стоимостная функция текстуры. По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

- использование морфологического градиента в однотонных областях без ярко выраженной текстуры приводит к зашумлённой стоимостной функции, использование которой замедляет выполнение алгоритма сегментации и ухудшает качество найденной линии пореза;
- морфологический водораздел как функция сегментации показывает удовлетворительные результаты при обработке изображений высокого пространственного разрешения [162];
- морфологический водораздел алгоритмически проще поиска разрезом графа, благодаря чему обеспечивает лучшее быстроедействие;
- минимизация длины пути поиском разреза графа приводит к деформациям линией пореза земных объектов.

Целесообразно обобщить алгоритм порядко-независимой композиции изображений на произвольную стоимостную функцию и функцию сегментации. Анализ рассмотренных алгоритмов показывает, что существующие стоимостные функции оперируют исключительно радиометрической информацией (значениями яркости, текстурными признаками), что обеспечивает качественное совмещение преимущественно для околонадирных изображений. Вместе с тем при площадной съёмке высокого пространственного разрешения область пересечения смежных маршрутов формируется при различных углах визирования, аналогично стереоскопической съёмке, вследствие чего проекции высотных объектов оказываются пространственно смещены. Подобные геометрические рассогласования не всегда сопровождаются радиометрическими различиями и потому не обнаруживаются известными стоимостными функциями.

В этой связи предлагается модифицированный алгоритм проведения линии пореза (Положение 3), отличительной особенностью которого является комбинированная стоимостная функция, основанная на совместном учёте радиометрической информации (морфологического градиента фрагментов) и геометрической информации (карт диспаратности, характеризующих трёхмерную структуру наблюдаемой сцены). Для интеграции разнородных признаков и формирования маски областей рассогласования предлагается использовать свёрточную нейронную сеть архитектуры U-Net [163], обеспечивающую нелинейный совместный анализ радиометрических и геометрических каналов.

Входными данными алгоритма проведения линии пореза являются:

- виртуальное мозаичное изображение;
- стоимостная функция;
- функция сегментации.

Виртуальное мозаичное изображение — структура данных, позволяющая для вектора \mathbf{I} из K панхроматических ортотрансформированных изображений получать при заданном векторе флагов используемых изображений фрагмент (тайл) мозаики.

Общая схема предлагаемого алгоритма (рис. 3.2а) автоматического проведения линии пореза совпадает с алгоритмом морфологической композиции, за исключением реализации предопределённой процедуры обработки матрицы пересечений (символ 3).

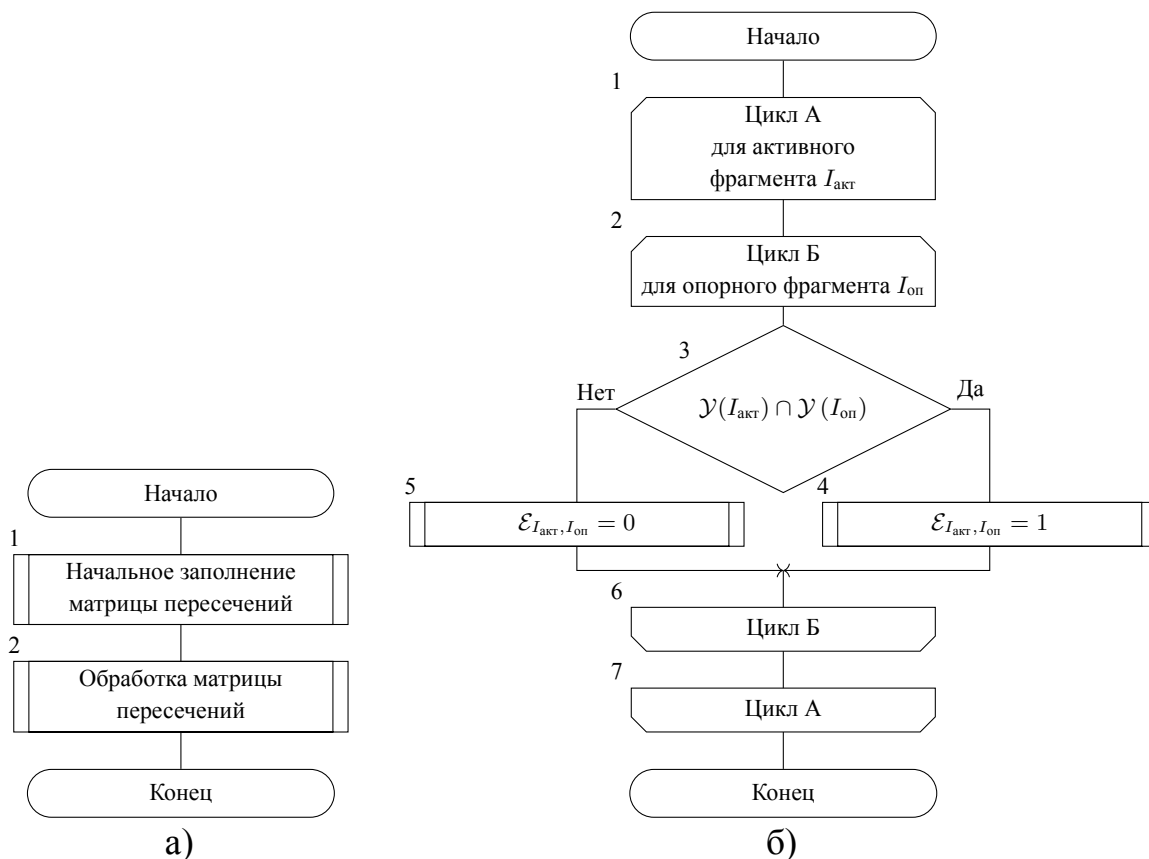


Рисунок 3.2 — Автоматическое проведение линии пореза: а — алгоритм автоматического проведения линии пореза; б — алгоритм предопределённого процесса начального заполнения матрицы пересечений

Под матрицей пересечений \mathcal{E} понимается симметричная матрица размера $K \times K$, в которой элемент (i, j) принимает значение 1 в случае пересечения фрагментов мозаики с индексами i и j .

Инициализация матрицы пересечений может быть выполнена через запрос фактической области определения фрагментов. При этом в результате экспериментов выявлено, что факт пересечения может быть упрощён. Предлагаемое начальное заполнение матрицы пересечений (символ 2) заключается в начальной оценке наличия пересечения между фрагментами в виде пересечений, описанных вокруг фрагментов в мозаичном изображении прямоугольников (рис. 3.2б), задаваемых областью определения \mathcal{Y} .

Схема алгоритма предопределённой процедуры обработки матрицы пересечений представлена на рис. 3.3. Обработка матрицы пересечений является итерационным процессом модификации бинарных масок фрагментов, и выполняется до тех пор, пока не будут устранены пересечения областей определения масок (символ 1).

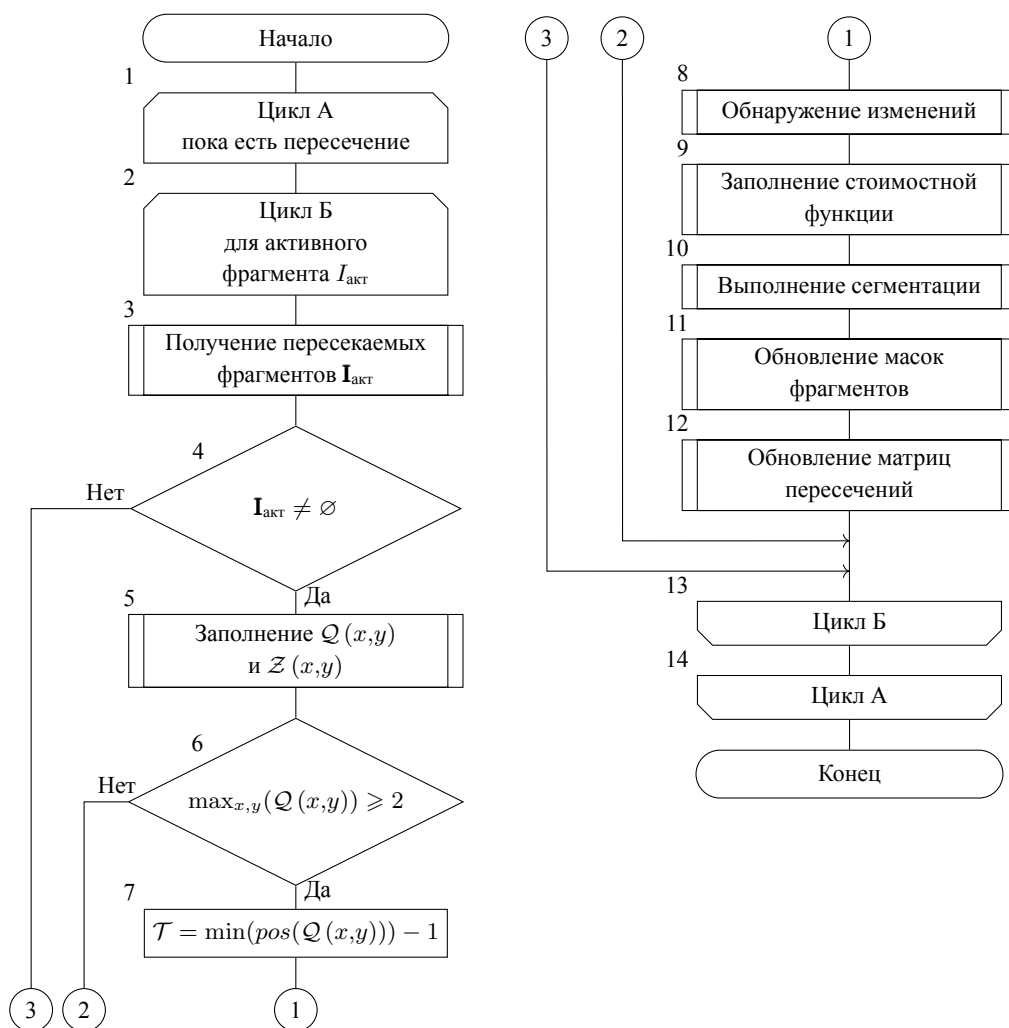


Рисунок 3.3 — Алгоритм predetermined процесса обработки матрицы пересечений

В рамках цикла по активным фрагментам (символ 2) выполняется итерация по фрагментам мозаики. Под активным фрагментом понимается текущий обрабатываемый фрагмент. Для каждого активного фрагмента запрашивается список фрагментов, с которыми пересекается активный (символ 3). В случае пустого списка пересекаемых фрагментов, происходит переход к следующей итерации (символ 4).

На основе списка пересекаемых фрагментов формируются два вспомогательных изображения размером с активный фрагмент: мощность $Q(x,y)$ и карта $Z(x,y)$. Яркость пикселя изображения $Q(x,y)$ отражает число пересекаемых фрагментов мозаики с учётом активного, определённых в соответствующем пикселе мозаики при текущем состоянии бинарных масок обрезаков. В карте яркость соответствует индексу фрагмента мозаики в соответствующем пикселе мозаики, если значение в изображении-мощности равно 1, то есть в заданном пикселе

определён один фрагмент. Заполнение мощности и карты осуществляется одновременно итерированием по мозаичному изображению с последовательным запросом тайлов мозаики (символ 5).

Дальнейшая обработка активного фрагмента необходима в случае, если максимальный код яркости изображения-мощности больше или равен 2 (символ 6), иначе в области активного фрагмента нет пересечений областей бинарных масок обрезок.

Далее определяется текущий обрабатываемый уровень T числа пересечений (символ 7) как минимальный положительный элемент изображения-мощности, коды яркости которого предварительно уменьшены на 1, что позволяет получить минимальный элемент изображения-мощности, больше 1. Порядок обработки пересечений с наименьшего обусловлен тем, что для обработки области пересечений n зачастую необходимо обработать области с числом пересечений $n - 1$, при условии $n > 1$

Ключевым отличием предлагаемого алгоритма от известных является переход от анализа исключительно радиометрических различий фрагментов мозаики к совместному учёту радиометрической и геометрической информации при формировании стоимостной функции (символ 8, 9).

Геометрическая составляющая представлена картой диспаратности $D_x(m,n)$ и $D_y(m,n)$, характеризующей попиксельное смещение одноимённых точек между фрагментами мозаики по соответствующим координатным осям. Ненулевые значения диспаратности указывают на геометрические рассогласования, которые вызваны не учтёнными в ЦМР высотными объектами и различиями углов визирования из-за перенацеливания съёмочной аппаратуры. Радиометрическая составляющая представлена значениями яркости фрагментов мозаики $I_i^T(m_i, n_i)$ и $I_j^T(m_j, n_j)$, отражающими изменения сюжета (перемещение облачности, сезонные изменения растительного покрова, появление и исчезновение временных объектов), которые не проявляются в картах диспаратности.

Простейшим подходом к использованию геометрической информации является пороговая обработка карт диспаратности с последующей морфологической постобработкой для формирования маски областей рассогласования. Однако такой детерминированный подход обладает рядом ограничений: выбор порога существенно зависит от условий съёмки (базы стереопары, пространственного разрешения) и требует индивидуальной настройки; пороговая обработка не учитывает радиометрические изменения сюжета, не связанные с трёхмерной гео-

метрией сцены; в областях с зашумлённой диспаратностью (слабоконтрастные участки, водные поверхности) пороговая фильтрация приводит к ложным срабатываниям.

Для совместного нелинейного анализа радиометрических и геометрических признаков и формирования маски областей рассогласования предлагается использование свёрточной нейронной сети архитектуры U-Net (символ 8). На вход нейронной сети поступает четырёхканальное изображение: первый канал — фрагмент мозаики $I_i^T(m_i, n_i)$; второй канал — фрагмент мозаики $I_j^T(m_j, n_j)$; третий канал — функция $D_x(m, n)$ карты диспаратности; четвёртый канал — функция $D_y(m, n)$ карты диспаратности. Пример такого набора данных показан на рис. 3.4.

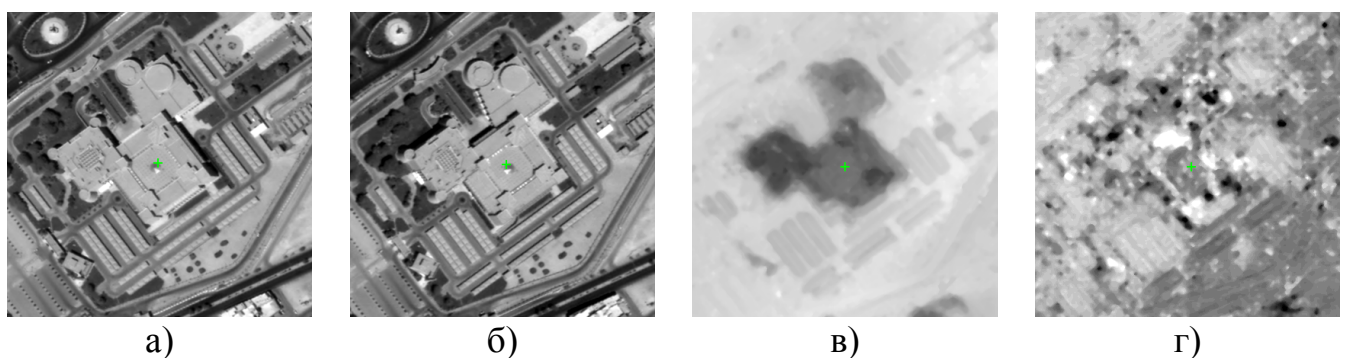


Рисунок 3.4 — Входные данные для искусственной нейронной сети для обнаружения изменений: а, б — фрагменты исходных изображений мозаики $I_i^T(m_i, n_i)$ и $I_j^T(m_j, n_j)$; в, г — функции $D_x(m, n)$ и $D_y(m, n)$ карты диспаратности

Архитектура U-Net выбрана в силу следующих свойств: симметричная энкодер-декодерная структура с прямыми соединениями (skip connections) обеспечивает эффективное сохранение пространственной информации при относительно неглубокой сети; число обучаемых параметров существенно меньше, чем у глубоких архитектур семантической сегментации (DeepLabV3+, HRNet, Swin-Transformer) [164], что снижает требования к объёму обучающей выборки; вычислительная сложность выполнения нейросети допускает обработку изображений большого объёма с использованием графических ускорителей потребительского сегмента. В данном контексте нейронная сеть выступает не как самостоятельный детектор изменений, а как средство объединения разнородных признаков, способное к обобщению на нетипичные конфигурации застройки и условия съёмки, в которых детерминированные пороговые методы требуют ручной настройки.

Структурная схема используемой нейронной сети приведена на рис. 3.5. Входной тензор имеет размерность $512 \times 512 \times 4$ и формируется конкатенацией

двух радиометрических каналов фрагментов мозаики и двух каналов карты диспаратности D_x, D_y . Энкодер сети образован четырьмя последовательными блоками, каждый из которых содержит сдвоенную свёртку ($\text{Conv} \times 2$) с ядром 3×3 , групповую нормализацию (Group Normalization, GN) и функцию активации ReLU; в трёх внутренних блоках дополнительно применяется dropout (DO) с вероятностью обнуления нейронов $p = 0,2$, обеспечивающий регуляризацию модели. Понижение пространственного разрешения между блоками осуществляется операцией max pooling с окном 2×2 ; на последнем уровне энкодера разрешение составляет 32×32 при числе каналов 256. Симметричный декодер реализован четырьмя блоками с аналогичной структурой свёрток; повышение пространственного разрешения выполняется билинейной интерполяцией с коэффициентом 2 ($\text{Bilinear} \times 2$), а признаки карты соответствующих уровней энкодера и декодера объединяются прямыми соединениями (Skip connections). Выходной слой представлен свёрткой 1×1 с функцией активации sigmoid, формирующей одноканальную карту попиксельной вероятности принадлежности к классу «рассогласование». Применение групповой нормализации вместо пакетной обусловлено сравнительно небольшим размером мини-пакета, при котором оценки статистик пакета характеризуются повышенной дисперсией.

Обучение нейронной сети выполнено в режиме контролируемого обучения с использованием выборки, сформированной по натурным данным площадной съёмки с КА «Ресурс-П». Бинарные эталонные маски рассогласований получены полуавтоматически: исходные кандидатные области выделены пороговой обработкой карт диспаратности с последующей морфологической постобработкой, окончательная разметка выполнена оператором с привлечением радиометрических каналов. В качестве функции потерь использована взвешенная комбинация бинарной кросс-энтропии и метрики Dice, компенсирующая дисбаланс классов (доля пикселей класса «рассогласование» в обучающей выборке составила менее 15 %). Оптимизация параметров сети выполнена методом Adam с начальной скоростью обучения 10^{-3} и экспоненциальным её снижением; число эпох обучения — 80. Аугментация данных включает геометрические преобразования (повороты на углы, кратные 90° , отражения относительно осей) и радиометрические вариации (гамма-коррекция, аддитивный гауссов шум).

Результатом работы нейронной сети является бинарная маска рассогласований $\mathcal{C}(m,n)$, принимающая значение 1 в пикселях, соответствующих областям

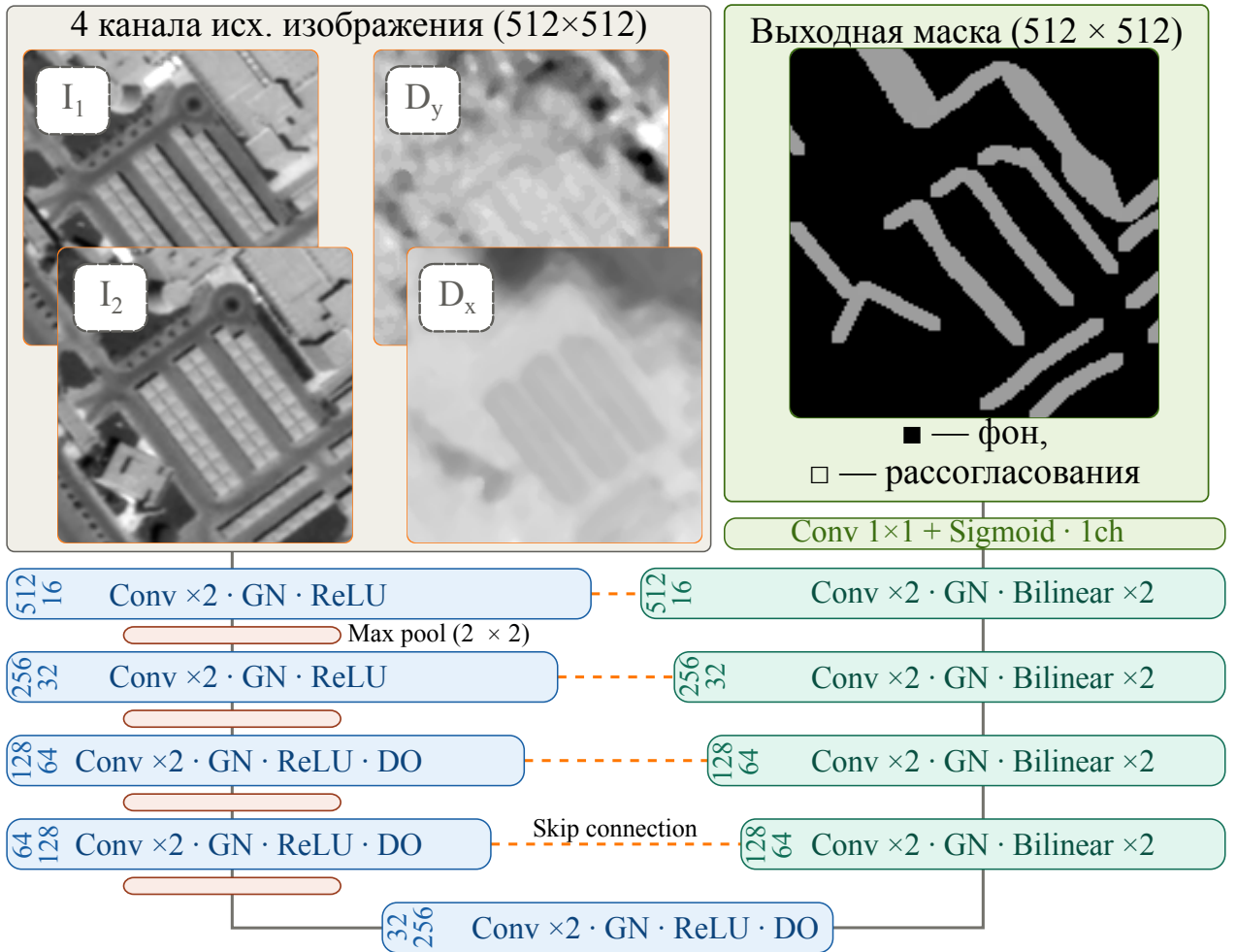


Рисунок 3.5 — Архитектура свёрточной нейронной сети U-Net для формирования маски рассогласований \mathcal{C} : на входе — четырёхканальный тензор 512×512 (два канала яркости фрагментов мозаики I_1 , I_2 и два канала карты диспаратности D_x , D_y); на выходе — одноканальная маска 512×512

геометрических рассогласований высотных объектов и радиометрических изменений сюжета, и значение 0 в остальных.

Заполнение изображения стоимостной функции (символ 9) осуществляется с использованием предлагаемой комбинированной стоимостной функции $\mathcal{F}(m,n)$, определяемой как

$$\mathcal{F}(m,n) = G(m,n) \cdot (1 + \alpha \cdot \delta_{\mathcal{C}}(m,n)), \quad (3.13)$$

где $G(m,n)$ — поэлементный минимум морфологического градиента фрагментов мозаики; $\delta_{\mathcal{C}}(m,n) \in [0; 1]$ — обратно нормализованное евклидово расстояние от пикселя (m,n) до ближайшего элемента маски рассогласований \mathcal{C} , принимающее значение 1 непосредственно на маске и монотонно убывающее до 0 на расстоянии радиуса нормализации $r_{\mathcal{C}}$; α — весовой коэффициент, регулирующий степень влияния маски рассогласований. Значение коэффициента α

выбирается из диапазона $[3; 10]$ по результатам предварительного обучения; в настоящей работе используется $\alpha = 5$, при котором обеспечивается баланс между следованием радиометрическим границам объектов в участках без расогласований и огибанием областей $C(m, n) = 1$. Множитель $(1 + \alpha \cdot \delta_C(m, n))$ формирует явный «водораздел» на карте стоимостной функции, направляющий линию совмещения в обход высотных объектов и зон изменения сюжета, что согласуется с постановкой задачи обнаружения и обхода областей геометрических расогласований, изложенной в Положении 3. Функция принимает в качестве входных данных виртуальное мозаичное изображение. Последовательно для каждого используемого фрагмента мозаики запрашиваются тайл с целью заполнения изображения стоимостной функции.

Выдвигаются два основных требования к функции сегментации, необходимых для корректного выполнения алгоритма: тип выполняемой сегментации — маркерная; выполнение обработки в пределах произвольной области интереса. Маркерная сегментация — способ разбиения изображения на непересекающиеся области с началом распространения сегментов в заданных областях. Требование к типу сегментации возникает в связи с необходимостью обработки областей одновременного пересечения нескольких фрагментов.

При выполнении функции сегментации (символ 10), областью интереса являются элементы изображения, в которых значение яркости изображения-мощности равно \mathcal{T} . Начало распространения сегментов задаётся изображением-маркером. Результат выполнения функции сегментации записывается в изображение-маркер.

На основе изображения-маркера обновляются бинарные маски обрезки активного и всех опорных изображений (символ 11). Пикселям бинарной маски k устанавливается значение яркости 1, если соответствующее значение яркости изображения-маркера равно k , иначе устанавливается значение яркости 0. С использованием обновлённых бинарных масок обрезки фрагментов выполняется обновление матрицы пересечений (символ 12).

3.2.3. Предлагаемый алгоритм построения линии пореза протестирован на результатах площадной съёмки высокого пространственного разрешения на две территории по данным, полученным с КА «Ресурс-П»: «город» и «пустыня». Укрупнённые фрагменты мозаичного изображения без использования линии пореза и с автоматически найденной линией пореза представлены на рис. 3.7 и 3.8. Фрагменты мозаики будем называть «левым» и «правым» в соответствии

с их отображением на рисунке. «Левый» фрагмент мозаики занимает область пересечения изображений.

Сравнительный анализ работы стоимостных функций для типового фрагмента застройки приведён на рис. 3.6. На рис. 3.6а линия пореза, найденная при использовании стоимостной функции $G(m,n)$ (поэлементного минимума морфологического градиента), пересекает контуры высотных зданий, что вызывает геометрические дефекты в местах их пересечения. На рис. 3.6б линия пореза, найденная при использовании предложенной комбинированной стоимостной функции (3.13), огибает указанные объекты, следуя контурам областей рассогласований, выделенных нейронной сетью.

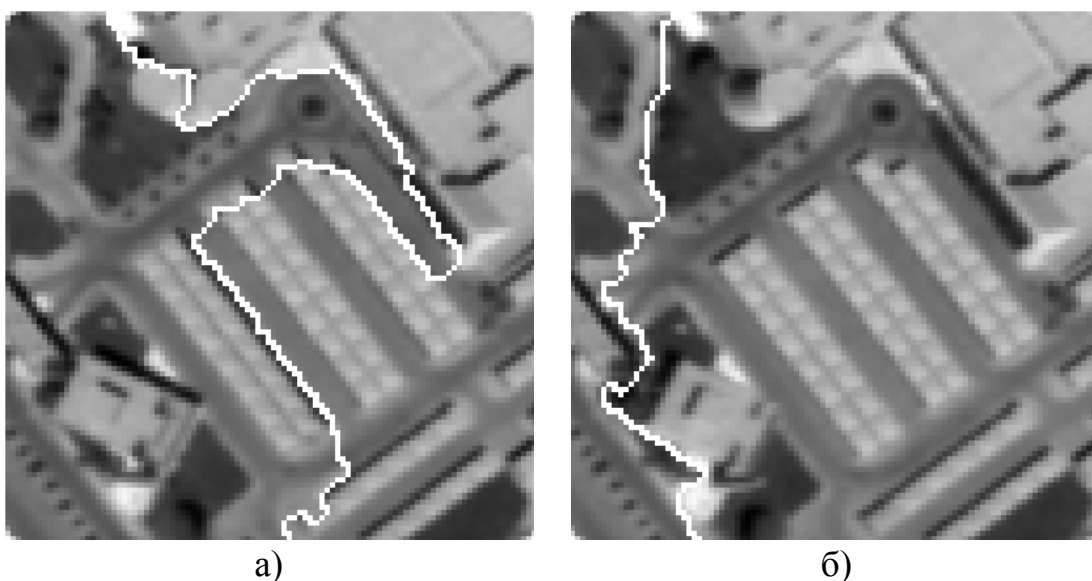


Рисунок 3.6 — Сравнение результатов проведения линии пореза (белые пиксели): а — по морфологическому градиенту $G(m,n)$; б — по комбинированной стоимостной функции $\mathcal{F}(m,n)$

Для количественной оценки эффективности алгоритма собрана статистика числа пересечений линией пореза контуров высотных объектов (зданий, эстакад) на 24 парах фрагментов площадной съёмки с городской застройкой. Контуров объектов получены ручным дешифрированием. Усреднённое по выборке число пересечений составило $\bar{N}_G = 4,8$ для алгоритма-прототипа на основе $G(m,n)$ и $\bar{N}_\mathcal{F} = 0,9$ для предложенного алгоритма на основе $\mathcal{F}(m,n)$, что соответствует снижению числа пересечений в среднем на 80,1 %.

Современные подходы к проведению линии пореза на основе глубоких нейронных сетей [41; 42] разработаны применительно к аэрофотосъёмке и не

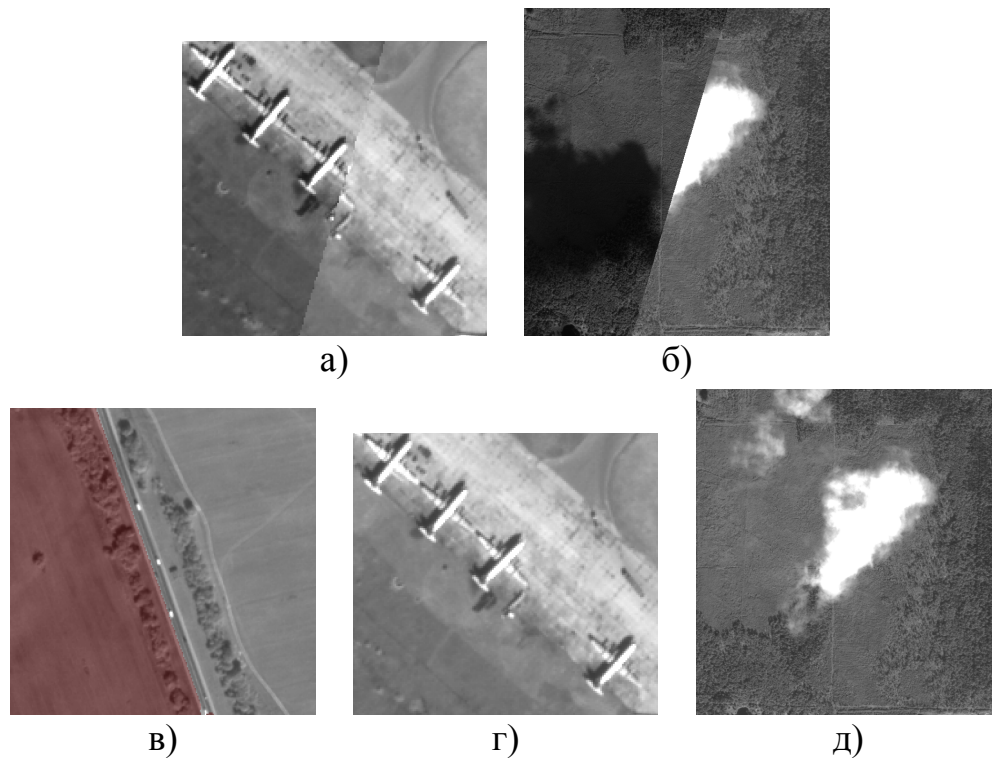


Рисунок 3.7 — Сюжет «город»: а и б — дефекты при непосредственном наложении изображений без линии пореза; в–д — результаты проведения линии пореза

учитывают параллакс высотных объектов, характерный для площадной съёмки. Принципиальным отличием предлагаемого алгоритма является использование карт диспаратности во входном тензоре нейронной сети, что обеспечивает применимость к материалам со значительными углами визирования.

В результате непосредственного наложения изображений сюжета «город» выявлен ряд деформаций объектов. В частности, на рис. 3.7а показана деформация крыла самолёта на стыке фрагментов, из-за чего не ясно: является ли крыло частью самолёта, отображенного на «левом» фрагменте, или является частью самолёта, не попавшего на «левый» фрагмент. На рис. 3.7б показана деформация облака: левый фрагмент снят позже и под другим углом съёмки, и облако переместилось. Представленные дефекты препятствуют как дешифрированию объектов земной поверхности, так и использованию полученной мозаики как непрерывной опорной сцены для решения тематических задач. В результате выполнения предлагаемого алгоритма линия пореза огибает явные границы объектов (рис. 3.7в), что соответствует рекомендациям, изложенным в инструкции [53] и стандарту [54]. Кроме этого в полученном мозаичном изображении устранены приведённые деформации объектов: линия наложения и пореза не проходит через стоянку самолётов (рис. 3.7г) и обходит облачность (рис. 3.7д).

Такое поведение линии пореза обусловлено тем, что комбинированная стоимостная функция (3.13), основанная на совместном учёте радиометрической и геометрической информации, позволяет обнаруживать рассогласования объектов земной поверхности, которые не выявляются известными стоимостными функциями, оперирующими исключительно значениями яркости. В частности, геометрические рассогласования высотных объектов, вызванные различиями углов визирования, идентифицированы по картам диспаратности, а изменения сюжета (перемещение облачности) — по радиометрическим каналам входного тензора нейронной сети.

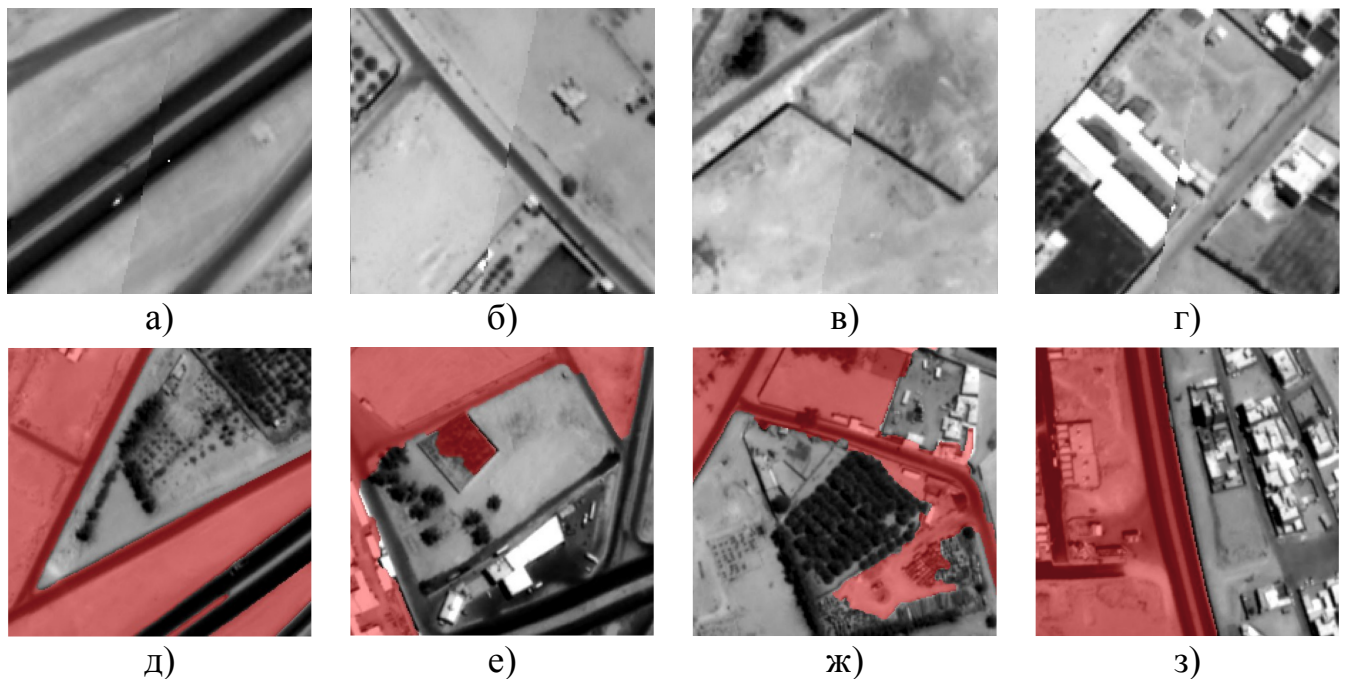


Рисунок 3.8 — Сюжет «пустыня»: а–г — дефекты при непосредственном наложении изображений без линии пореза; д–з — результаты проведения линии пореза

Изображения сюжета «пустыня» характеризуются большими углами съёмки, чем «город», что приводит к деформациям объектов земной поверхности, зависящим от угла наблюдения. В результате выполнения процедуры блочного уравнивания возможны рассогласования объектов. Так, например, на рис. 3.8а показаны искажения при наложении изображения при пересечении эстакады; на рис. 3.8б — дороги. Влияние угла наблюдения выражается в разнице внешнего вида забора: на «левом» фрагменте забор без тени, на «правом» с тенью (рис. 3.8в). Также присутствуют деформации объектов зданий (рис. 3.8в). Применение предложенного алгоритма проведения линии пореза позволяет избежать подобных искажений. Найденная линия пореза огибает явные одноимённые объекты (рис. 3.8д — 3.8з).

Разработанный алгоритм программно реализован в комплексе формирования информационных продуктов по данным с КА «Ресурс-П» для получения бесшовных мозаичных изображений [84; 165]. Расчёт стоимостной функции и маркерная сегментация (морфологический водораздел) реализованы на языке программирования C++; скорость их выполнения составляет 3,065 млн пикс./с на сервере с характеристиками: Intel Xeon CPU E5-2687W, 256 ГБ ОЗУ. Выполнение свёрточной нейронной сети U-Net осуществляется на графическом ускорителе NVIDIA RTX 4070 (12 ГБ видеопамяти) с использованием библиотеки TensorRT в режиме смешанной точности FP16. Время выполнения для тайла размером 512×512 составляет $\approx 8,5$ мс, что эквивалентно пропускной способности $\approx 30,8$ млн пикс./с с учётом времени передачи данных. Обработка крупноформатных изображений выполняется по схеме фрагментирования на тайлы с перекрытием 64 пикс. для устранения краевых артефактов; маска рассогласований $C(m,n)$ полного фрагмента синтезируется объединением по признаку максимума вероятности в зонах перекрытия. Совокупная производительность этапа формирования $C(m,n)$ с учётом фрагментирования на тайлы и постобработки составляет $\approx 14,2$ млн пикс./с.

3.2.4. В настоящем разделе предложен модифицированный алгоритм формирования линии пореза при синтезе мозаичных изображений площадной съёмки (Положение 3), отличительной особенностью которого является комбинированная стоимостная функция (3.13), объединяющая морфологический градиент фрагментов и маску рассогласований, формируемую свёрточной нейронной сетью архитектуры U-Net по совокупности радиометрических признаков и карт диспаратности. Использование карт диспаратности в составе входного тензора нейронной сети обеспечивает учёт трёхмерной структуры наблюдаемой сцены и выявление пространственных смещений проекций высотных объектов, не обнаруживаемых стоимостными функциями, оперирующими только значениями яркости.

Экспериментальная апробация на натуральных данных площадной съёмки высокого пространственного разрешения с КА «Ресурс-П» для территорий различных типов застройки и рельефа подтвердила, что предложенный алгоритм обеспечивает обнаружение и обход областей геометрических рассогласований высотных объектов и зон радиометрических изменений сюжета, что соответствует требованиям действующих нормативных документов [53; 54]. По результатам количественной оценки число пересечений линией пореза областей геометриче-

ских рассогласований высотных объектов снижено в среднем на 80 % относительно алгоритма [18], в котором стоимостная функция определяется исключительно морфологическим градиентом. Алгоритм программно реализован на языке C++ с реализацией этапа выполнения нейронной сети на графическом ускорителе и интегрирован в состав комплекса формирования информационных продуктов [84; 165].

3.3 Алгоритм оценки качества линии пореза мозаичных изображений

3.3.1. Дефект линии пореза мозаичного изображения проявляется в виде перепадов яркости между перекрывающимися маршрутами, которые образуют границы на изображении. Задача определения дефекта линии пореза сводится к обнаружению таких границ. В соответствии с законом Вебера-Фехнера линия пореза, как и любая другая граница, становится видна, когда отношение приращения яркости в окрестности точки к яркости в точке составляет константу, зависящую от сенсорной системы наблюдателя — обычно порядка 0,01–0,1 для зрительного восприятия человека [166]. Алгоритмы определения границ на изображении сводятся к выделению перепадов яркости и последующей пороговой обработкой (операторы Собеля, Лапласа, Кэнни и др.). Ввиду того, что изложенный ранее алгоритм построен на предположении, что линия пореза должна проходить вдоль явных границ объектов земной поверхности, применение детектора границ приведет к обнаружению границ, схожей с естественной. В связи с этим необходимо решить задачу обнаружения аномальных с точки зрения сюжета изображения границ.

3.3.2. При разработке алгоритма обнаружения дефектов линии пореза мозаичного изображения приняты во внимание следующие исходные данные и соображения [167; 168].

1. Результатом применения алгоритма поиска дефектов к мозаичному изображению является маска дефектных пикселей мозаичного изображения (или координаты дефектных пикселей линий пореза), оператору должен предъявляться готовый результат оценки качества.
2. Согласно требованиям к алгоритмам формирования мозаичных покрытий для обеспечения максимальной производительности при формиро-

вании мозаичных изображений уровня обработки L3 предпочтительно использование полностью автоматических алгоритмов [54].

3. Быстродействие алгоритма. Должно выполняться однократное чтение растра изображения. Должны избегаться трудоёмкие статистические операции или переход в частотную область представления изображения или его фрагментов.
4. Обнаружение дефектов линии пореза мозаики должно позволить выполнять ретуширование меньших участков мозаичного изображения, что должно повысить его качество за счёт снижения количества измененных объектов изображения. Дефект линии пореза должен быть заметен визуально — решение о подтверждении правильности обнаружения дефекта является задачей оператора. Дефект пореза может иметь произвольный перепад яркости, размер (длительность в количестве элементов), ориентацию и форму.

Дефект линий пореза мозаичного изображения может проявляться в виде перепадов яркости различной амплитуды на границе совмещения изображения при различной яркости областей совмещения. Рассмотрим два примера автоматически проведённой линии пореза мозаичного изображения и полученных в результате дефектов (рис. 3.9).

Ориентация, размер в элементах и форма перепада яркости также являются произвольными [169]. Перепад может принадлежать как границе объекта наблюдаемого на изображении, так и быть перепадом яркости одного объекта на двух изображениях. Задача выделения дефектов пореза мозаичного изображения состоит в обнаружении таких перепадов яркости с отделением их от естественных границ объектов изображений.

При формировании изображения космическим аппаратом функция рассеяния края границы наблюдаемых объектов определяется в основном функцией рассеяния точки сквозного информационного тракта, в состав которой входит функция рассеяния среды передачи оптического сигнала, объектива и ПЗС-матрицы съёмочного устройства, движения во время интегрирования сигнала, сжатия сигнала изображения [170] (а также попаданием границ с близкой к горизонтальной и вертикальной ориентацией на фазу фотоприёмных элементов). Все это приводит к тому, что границы реальных объектов изображений являются в различной степени размытыми [2].

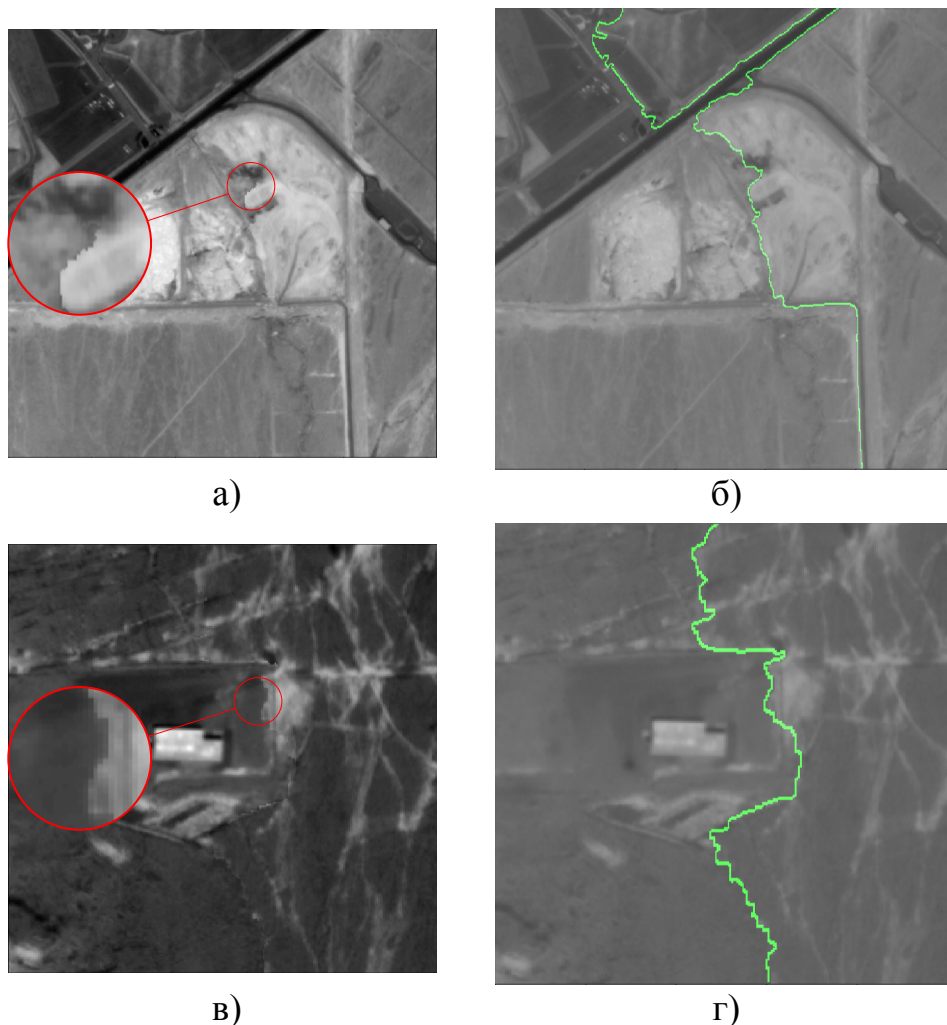


Рисунок 3.9 — Примеры дефектов линии пореза: а, в — фрагменты мозаичного изображения; б, г — фрагменты мозаичного изображения с нанесённой линией пореза

Задача выделения контуров (границ) требует использования операторов над соседними элементами, которые чувствительны к изменениям яркости и подавляют области постоянных уровней яркости. Таким образом, формируется изображение признака, в котором те части изображения, где возникают изменения, становятся светлыми, в то время как остальные части остаются темными. Выделение контуров (границ) основывается на дифференцировании в той или иной форме.

3.3.3. Рассмотрим мозаичное изображение и полученные из него изображения методом дискретных разностей первого порядка по всем направлениям на основе двухэлементных масок. Разностные фильтры нечетного размера обладают свойством симметрии, не сдвигают положения определяемой границы и при увеличении их размера позволяют надежнее определить ориентацию, но

ошибки, связанные с точностью определения положения и ориентации контура (границы) не требуют рассмотрения, важен только сам факт наличия границы.

Для каждого изображения рассчитаем градиенты по следующим направлениям: 0° , 45° , 90° , минус 45° . Из каждого изображения градиента возьмем максимальное значение. Если максимальное значение в некоторой точке превышает заданный порог, будем считать, что в этой точке присутствует дефект линии пореза. В результате выполнения указанной процедуры получим следующие изображения (рис. 3.10).

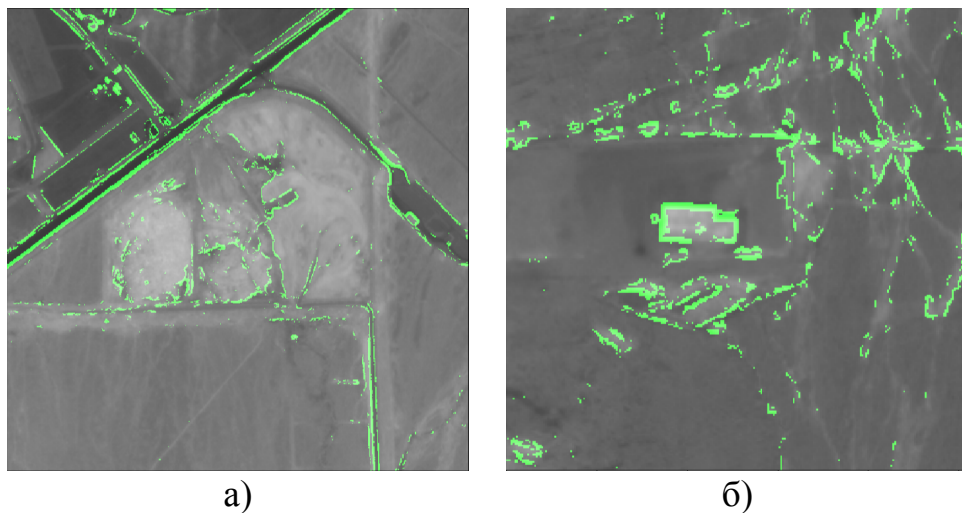


Рисунок 3.10 — Маски дефектов линии пореза на основе градиента изображения:
а — для изображения на рис. 3.9а; б — для изображения на рис. 3.9в

Как видно из полученного результата градиент позволяет определить пиксели изображения, принадлежащие линии пореза, вносящей дефект. При этом выделен ряд областей изображения вдоль линии пореза, где до этого она была визуальна незаметна оператору. Подход выделяет на изображениях в основном больше перепады объектов, а не дефекты пореза. Причина заключается в том, что перепад на границе естественных границ изображения больше перепада дефекта пореза.

Введём понятие меры насыщения границы объектов [171] на изображении. Определим следующие асимметричные фильтры (рис. 3.11). При обработке очередного значения яркости пикселя a_1 вычислим значения α , β и γ для каждого фильтра, определяемых как

$$\alpha = |a_1 - a_2|, \quad \beta = |b_1 - b_2|, \quad \gamma = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta}, & \text{если } \beta \neq 0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3.14)$$

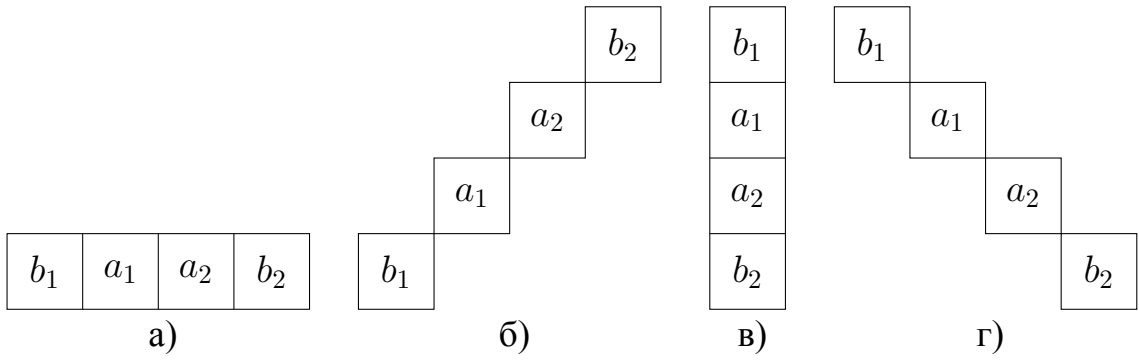


Рисунок 3.11 — Предлагаемые фильтры насыщения границ: а — 0° ; б — 45° ; в — 90° ; г — минус 45°

где a_2, b_1, b_2 — значения яркости соседних пикселей в соответствии с фильтрами на рис. 3.11. В результате получим ряд показателей $\alpha_{0^\circ}, \alpha_{45^\circ}, \alpha_{90^\circ}, \alpha_{-45^\circ}, \beta_{0^\circ}, \beta_{45^\circ}, \beta_{90^\circ}, \beta_{-45^\circ}, \gamma_{0^\circ}, \gamma_{45^\circ}, \gamma_{90^\circ}, \gamma_{-45^\circ}$.

3.3.4. Входными данными алгоритма (рис. 3.12) являются: мозаичное изображение $I^T(m, n)$ с размерами $M \times N$; фрагменты мозаики $I_i^T(m_i, n_i), i \in \{k, k+1\}$, с координатами левого верхнего угла в системе координат мозаики $m_i^{(0)}, n_i^{(0)}$ и размерами $M_i \times N_i$; маски изображений $e_i(m, n)$, найденные алгоритмом проведения линии пореза. Результатом выполнения алгоритма являются маска дефектов $Q^T(m, n)$ и интегральный критерий качества Υ . Предлагаемый алгоритм состоит из четырёх этапов.

На первом этапе (символ 1) сформируем множество координат линии пореза S мозаики в области пересечения фрагментов $I_k^T(m_k, n_k)$ и $I_{k+1}^T(m_{k+1}, n_{k+1})$ в соответствии с правилом (3.9).

На втором этапе (символы 2–6) выполним сбор статистики для критериев оценки качества линии пореза. Для каждого элемента $s_j = (m_j, n_j)$ множества S ($j = \overline{1, |S|}$) извлечём скользящее окно (символ 3) размером 11×11 с центром в (m_j, n_j) из исходных изображений и мозаичного изображения, получим соответственно $W_{k,j}(m', n'), W_{k+1,j}(m', n')$ и $W_j(m', n')$, где $m' = \overline{m_j - 5, m_j + 5}$, $n' = \overline{n_j - 5, n_j + 5}$. На основе извлеченных окон рассчитаем следующие значения:

- 1) для критерия SSIM (символ 4): индекс структурного сходства SSIM z_j фрагментов изображений $W_{k,j}(m', n')$ и $W_{k+1,j}(m', n')$,

$$z_j = \xi(W_{k,j}(m', n'), W_{k+1,j}(m', n')), \quad (3.15)$$

где ξ — функция расчёта индекса структурного сходства, принимающая значение в диапазоне $[-1; 1]$, для пары изображений;

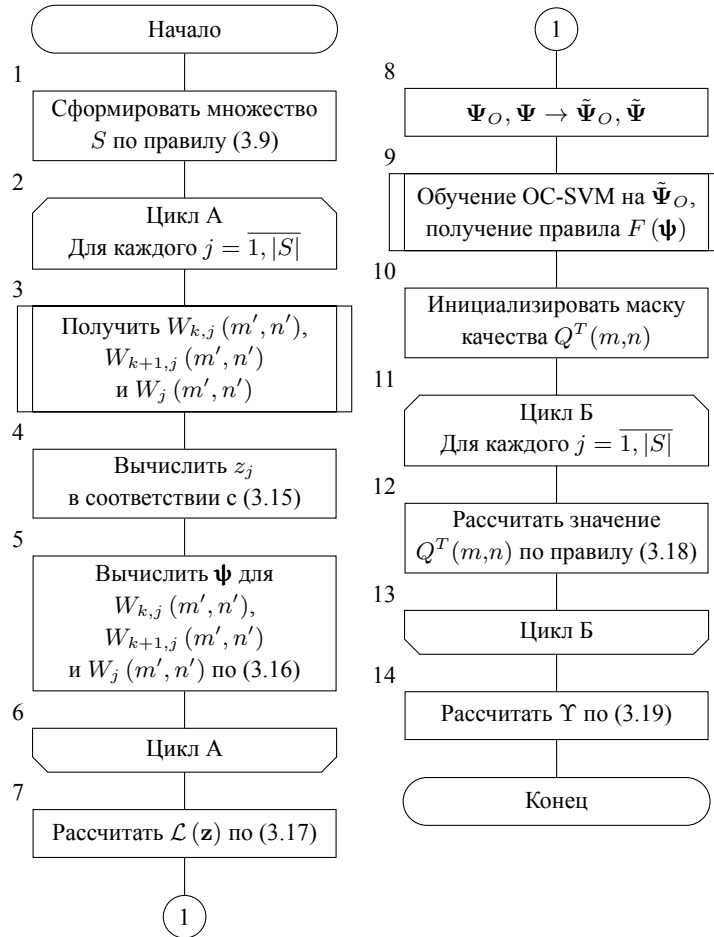


Рисунок 3.12 — Предлагаемый алгоритм автоматической оценки качества линии пореза мозаичных снимков

- 2) для критерия насыщения границы (символ 5): градиентные показатели α , β , γ в направлениях 0° , 45° , 90° и минус 45° (рис. 3.11) для каждого окна $W_{k,j}(m', n')$, $W_{k+1,j}(m', n')$, $W_j(m', n')$, рассчитанные по (3.14), где элементу изображения, обозначенному как a_1 , соответствует центральный пиксель скользящего окна с координатами (m_j, n_j) . Для каждого окна получим вектор признаков ψ ,

$$\psi = \begin{bmatrix} \alpha_{0^\circ} & \beta_{0^\circ} & \gamma_{0^\circ} & \alpha_{45^\circ} & \beta_{45^\circ} & \gamma_{45^\circ} \\ \alpha_{90^\circ} & \beta_{90^\circ} & \gamma_{90^\circ} & \alpha_{-45^\circ} & \beta_{-45^\circ} & \gamma_{-45^\circ} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

В результате получим вектор значений индекса структурного сходства \mathbf{z} и матрицы признаков насыщения границы Ψ_k , Ψ_{k+1} и Ψ для окон, извлечённых из изображений $I_k^T(m, n)$, $I_{k+1}^T(m, n)$ и $I^T(m, n)$ соответственно.

На третьем этапе (символы 7–9) выполним обработку собранной статистики. По выборке значений индекса структурного сходства рассчитаем (символ 7)

внутреннюю нижнюю границу межквартильного размаха $\mathcal{L}(\mathbf{z})$ [172] как,

$$\mathcal{L}(\mathbf{z}) = Q_1 - 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1), \quad (3.17)$$

где Q_1 — нижний выборочный квартиль, соответствующий 25-му процентилю; Q_3 — верхний выборочный квартиль, соответствующий 75-му процентилю. Полученное значение используем в качестве порогового значения для индекса структурного сходства.

Для каждого столбца объединённой матрицы признаков $\Psi_O = \begin{bmatrix} \Psi_k \\ \Psi_{k+1} \end{bmatrix}$ оценим параметры квантильного преобразования [173], затем применим его к матрицам Ψ_O и Ψ и получим нормализованные матрицы $\tilde{\Psi}_O$ и $\tilde{\Psi}$ соответственно (символ 8). Обучим (символ 9) одноклассовый классификатор на основе алгоритма опорных векторов (One-Class Support Vector Machine, OC-SVM) [174] для решения задачи выявления аномалий по матрице признаков $\tilde{\Psi}_O$. Поиск субоптимального значения параметра ν OC-SVM алгоритма выполним следующим образом. Матрица признаков $\tilde{\Psi}_O$ многократно разбивается на обучающие и валидационные подвыборки, и для каждого значения ν оценивается доля объектов из валидационной подвыборки, классифицированных как аномалии. Далее отбирается только та модель классификатора, для которой оценённая доля ложных выбросов на $\tilde{\Psi}_O$ не превышает заранее заданный порог; и максимизирована разделимость распределений значений решающей функции между $\tilde{\Psi}_O$ и $\tilde{\Psi}$. В результате обучения получим классифицирующее правило $F(\boldsymbol{\psi})$, возвращающее значение минус 1, если вектор признаков $\boldsymbol{\psi}$ классифицирован как аномалия, иначе — значение 1.

На четвёртом этапе (символы 10–14) синтезируем маску качества линии пореза $Q^T(m, n)$. Для каждого элемента (m_j, n_j) множества S ($j = \overline{1, |S|}$) рассчитаем соответствующее значение функции $Q^T(m, n)$ (символ 12), по правилу,

$$\forall (m_j, n_j) \in S: \quad Q^T(m_j, n_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } F(\boldsymbol{\psi}_{M,j}) = 1 \text{ и } z_j \geq \mathcal{L}(\mathbf{z}), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3.18)$$

где $\boldsymbol{\psi}_{M,j}$ — вектор признаков (3.16), рассчитанный по скользящему окну I_j^T для j -го элемента линии пореза S . Тогда интегральный критерий дефектности Υ линии пореза может быть оценён как доля дефектных пикселей от общей длины линии пореза (символ 14), то есть,

$$\Upsilon = \frac{\sum_{j=1}^{|S|} [Q^T(m_j, n_j) = 0]}{|S|}, \quad (3.19)$$

где $[\cdot]$ — скобка Айверсона. При этом меньшие значения Υ (меньшая доля дефектных пикселей) соответствуют более высокому качеству линии пореза.

3.3.5. Для практической оценки результатов применения предлагаемого алгоритма использованы материалы площадной съёмки высокого пространственного разрешения от отечественного КА серии «Ресурс-П» [21]. Предварительно данные уровня обработки L0 приведены к уровню обработки L1 применением операций геометрической и радиометрической коррекции [65]. В результате блочного уравнивания маршрутов по одноимённым и опорным точкам обеспечена точность совмещения маршрутов 0,63 пикс. в одноимённых точках. Найденные после блочного уравнивания поправки в модель съёмки использованы при ортотрансформировании маршрутов в картографическую проекцию с использованием высокоточной цифровой модели рельефа. Для формирования мозаичного изображения используются геометрически совмещённые изображения уровня обработки L2B с пространственным разрешением 0,76 м. Схема взаимного расположения анализируемых маршрутов представлена на рис. 1.7.

Выполнено автоматическое проведение линии пореза с использованием алгоритма [94] со следующими параметрами: радиус морфологического градиента — 2 пикс.; связность водораздельного алгоритма сегментации — 8. Оператором сформирована эталонная маска дефектных пикселей линии пореза $Q_3^T(m,n)$, используемая для сравнения с маской $Q^T(m,n)$, синтезированной предлагаемым алгоритмом.

На рис. 3.13 визуализированы полученные результаты. Рассматривается фрагмент мозаичного изображения (рис. 3.13а), сформированный с учётом проведённой линии пореза и содержащий дефектные области. На рис. 3.13б показан фрагмент мозаичного изображения в формате RGB, значения яркости красного канала выделены для элементов линии пореза s_j , для которых выполнено условие критерия насыщения границы, а синего канала — при выполнении условия критерия SSIM (3.18). На основе полученных результатов визуализации могут быть сделаны следующие выводы:

- 1) критерий насыщения границы выделяет фрагменты линии пореза, характеризующиеся неестественно резким перепадом яркости;
- 2) критерий SSIM срабатывает на фрагментах линии пореза, вдоль которых наблюдается значительное искажение сцены, а именно зданий и дорог для рассматриваемого примера.

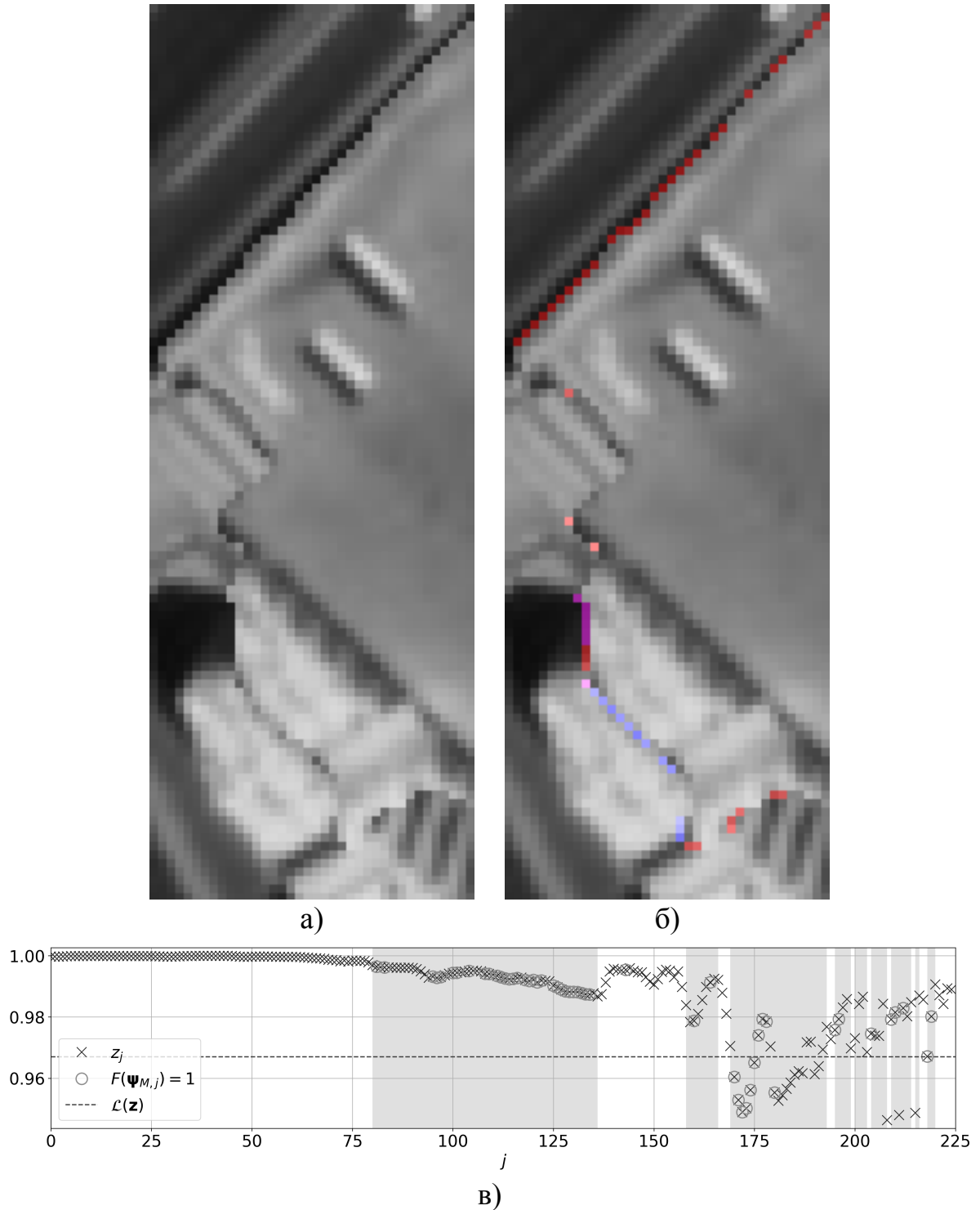


Рисунок 3.13 — Результаты применения предлагаемого алгоритма на фрагменте мозаики, полученной с использованием некачественной линии пореза: а — фрагмент мозаичного изображения; б — фрагмент мозаичного изображения с нанесённой маской дефектов линии пореза: в синем канале — срабатывание критерия SSIM, в красном — критерия насыщения границы; в — профиль значений критериев вдоль линии пореза

Совместное применение разработанных критериев позволяет определять отклонения от рекомендаций, изложенных в нормативных документах.

На рис. 3.13в представлен график профиля значений критериев вдоль линии пореза. По оси абсцисс отложен порядковый номер элемента линии пореза j , по оси ординат — значение индекса структурного сходства. Маркером «х» отмечены значения индекса структурного сходства вдоль линии пореза. Для рассматриваемого фрагмента мозаики значение $\mathcal{L}(\mathbf{z})$ составляет 0,967, и отмечено пунктирной линией. Если очередное значение z_j меньше порогового значения $\mathcal{L}(\mathbf{z})$, то фиксируется дефект по критерию SSIM. Также на графике маркером «о» отмечены срабатывания критерия насыщения границы. Если элемент линии пореза $s_j = (m_j, n_j)$ имеет ненулевое значение в эталонной маске дефектных пикселей $Q_{\Xi}^T(m_j, n_j)$, то соответствующий диапазон значений по оси абсцисс $[j, j + 1)$ закрашивается фоном. На основе полученного профиля значений вдоль линии пореза можно отметить, что срабатывания критерия SSIM и критерия насыщения границы совпадают с дефектными областями, размеченными оператором. Это подтверждает, что полученная в автоматическом режиме оценка качества согласуется с визуальной оценкой эксперта.

3.3.6. Предложен алгоритм автоматической оценки качества линии пореза мозаичных изображений земной поверхности (Положение 4). Алгоритм основан на анализе локальных структурных различий и насыщения границы вдоль линии пореза с применением методов машинного обучения. Разработанные критерии дефектов линии пореза соответствуют результатам экспертной оценки оператора и нормативным документам формирования мозаичных покрытий по данным ДЗЗ. Экспериментальные результаты на натуральных данных от отечественных КА высокого разрешения подтверждают принципиальную работоспособность предложенного подхода.

Предлагаемый алгоритм позволит решить следующие актуальные задачи при организации автоматической обработки материалов площадной съёмки: 1) принятие решения о применении найденной линии пореза в выходном продукте для предотвращения ухудшения геометрических качеств мозаики; 2) получение маски дефектов линии пореза для локального вмешательства оператора; 3) адаптивное ретуширование линии пореза в областях выявленных дефектов; 4) выполнение сравнительного анализа алгоритмов формирования линии пореза.

3.4 Методика оценки точности геопривязки мозаичных снимков на основе статистических показателей

3.4.1. В результате выполнения процедур обработки данных ДЗЗ в НКПОР формируется оперативная картографическая информация о подстилающей поверхности. Такая информация представляется в виде растровых изображений, прошедших этап геометрической коррекции и трансформированных в картографическую проекцию. В ходе геометрической коррекции устраняются геометрические искажения изображений, обусловленные оптико-механическими характеристиками камеры и условиями съёмки, а также осуществляется геопривязка видеоданных с учётом рельефа подстилающей поверхности. Исходными данными для выполнения данной операции служат измерения линейных и угловых элементов внешнего ориентирования камеры, формируемые автономной навигационной системой спутника. Неизбежно присутствующие случайные и систематические ошибки в определении элементов внешнего ориентирования обуславливают отклонения координат объектов, вычисленных по снимкам, от их истинных значений.

В этой связи оценка точности координатной привязки материалов съёмки, получаемых в ходе наземной обработки, представляет собой практически важную задачу и является одной из основных характеристик космической системы ДЗЗ. В рамках настоящего раздела ставится задача разработки методического обеспечения оценки точности геопривязки изображений площадной съёмки для оценки адекватности применяемых моделей геометрической обработки.

3.4.2. При разработке статистического аппарата оценки точности координатной привязки одиночных и мозаичных изображений высокого пространственного разрешения [175] необходимо принимать во внимание особенности процесса их геометрической обработки. Ошибки в измерениях линейных элементов внешнего ориентирования космического аппарата обуславливают смещения снимка относительно истинного положения в строчном и кадровом направлениях; при этом ошибка определения координат КА вдоль направления визирования оказывает пренебрежимо малое влияние на точность геопривязки. Ориентация камеры по углам крена, тангажа и рыскания определяется по измерениям астродатчиков и датчиков угловых скоростей в момент съёмки. Ошибки в определении углов крена и тангажа приводят как к общему смещению снимка, так

и к его внутрикадровым искажениям; влияние ошибки угла рыскания на точность геопривязки пренебрежимо мало по сравнению с указанными составляющими. Ввиду высокой степени корреляции измерений аппаратуры ГЛОНАСС/GPS и астродатчиков КА в течение одного сеанса съёмки статистически представительное распределение ошибок координатной привязки может быть получено лишь на выборке разновременных изображений.

Оценка точности геопривязки мозаичных изображений, формируемых в результате обработки данных площадной съёмки, основывается на точности геопривязки составляющих их одиночных снимков. При формировании мозаики уровня обработки L3 объединяются изображения уровня L2B, как правило обладающие различной точностью геопривязки ввиду сложного углового движения КА в процессе съёмки; попарная область пересечения маршрутов при этом должна составлять не менее 15 % условного кадра. В результате блочного уравнивания модель геопривязки корректируется, а ошибка геопривязки по совокупности входящих в мозаику изображений усредняется. Для получения интегральной оценки точности геопривязки мозаичного изображения необходим контроль динамики точности привязки одиночных снимков уровня L2B, входящих в его состав. В связи с этим в дальнейшем изложении предполагается наличие двух наборов данных: одиночных снимков уровня L2B, входящих в состав мозаики, и мозаичных изображений уровня L3, сформированных из них. Применение единого статистического аппарата к обоим наборам данных обеспечивает сопоставимость получаемых оценок точности геопривязки: обобщённой оценки для совокупности одиночных снимков и обобщённой оценки для мозаичных изображений. Точность геопривязки мозаичных изображений не должна быть хуже точности геопривязки одиночных снимков, входящих в их состав.

Для оценки точности координатной привязки геокодированных изображений известен подход [176; 177], в соответствии с которым искомая величина рассчитывается как среднеквадратическое отклонение координат в J опорных точках между вычисленными по снимку и эталонными значениями,

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2)}, \quad (3.20)$$

где Δx_j , Δy_j — координатные рассогласования в метрах по широте и долготе j -й опорной точки изображения соответственно. Вместе с тем данный подход

обладает рядом существенных недостатков: не обеспечивает вероятностной интерпретации получаемой оценки δ ; ограничен оценкой точности геопривязки одиночных снимков и не распространяется на мозаичные изображения; не позволяет характеризовать точностные показатели космической системы ДЗЗ в целом.

В мировой практике и в соответствии с [178] для оценки точности определения плановых координат по снимкам используется величина круговой вероятной ошибки $CE90$ [178—180]. Величина $CE90$ представляет собой радиус круга, в пределах которого с вероятностью 90 % находится отклонение наблюдаемых по снимку координат точки от её истинного положения.

Данный критерий основан на предположении о том, что систематические составляющие ошибок в ходе наземной обработки устранены, а случайные ошибки координат Δx , Δy независимы, нормально распределены и имеют одинаковую дисперсию σ^2 , то есть $\overline{\Delta x} = \overline{\Delta y} = 0$ и $\sigma_{\Delta x} = \sigma_{\Delta y} = \sigma$. При выполнении данных условий плотность совместного распределения случайных ошибок плановых координат имеет вид:

$$W(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.21)$$

откуда следует соотношение

$$CE90 \approx 2,146 \sigma. \quad (3.22)$$

Вместе с тем в литературе критерий $CE90$ рассматривается применительно к одиночным снимкам и не распространяется на группу изображений, а также не позволяет оценить уровень внутрикадровых искажений. Помимо этого, на практике условие равенства среднеквадратических отклонений $\sigma_{\Delta x} = \sigma_{\Delta y}$ не всегда выполняется, а отдельные снимки могут характеризоваться неустрашёнными систематическими составляющими ошибок геопривязки. В связи с этим актуальной является задача разработки статистического аппарата, позволяющего в соответствии с [178] формировать комплексные оценки геометрической точности выходных информационных продуктов систем ДЗЗ как для одиночных снимков, так и для мозаичных изображений, а также вырабатывать рекомендации по их интерпретации.

3.4.3. Пусть имеется K изображений опорных полигонов земной поверхности, обладающих высокой плановой и высотной точностью представленных на них объектов. Для проведения оценки подготавливается не менее трёх опорных полигонов, размеры каждого из которых примерно соответствуют размерам

условного кадра съёмочной аппаратуры. На каждый полигон подготавливается измерительная информация: опорные точки, идентифицируемые по абрисам характерных объектов с известными плановыми и высотными координатами, а также высокоточная цифровая модель рельефа на территорию полигона. Средне-квадратическая погрешность ОТ в плане и по высоте должна составлять не более 0,2 м и 0,3 м соответственно; пространственное разрешение абрисов ОТ — не более 0,5 м, число ОТ в пределах одного полигона — порядка 100. Для каждой ОТ должны быть известны геодезические координаты (B_0, L_0) в системе координат WGS-84 и высота H_0 в геодезической системе координат. Доля облачности на снимках не должна превышать 10 %.

На каждом изображении отождествим J_k опорных точек с метрическими координатами $(x_{kj}^{\text{оп}}, y_{kj}^{\text{оп}})$ и соответствующими им координатами, вычисленными по снимку, (x_{kj}, y_{kj}) , где $j = \overline{1, J_k}$, $k = \overline{1, K}$. Для достижения статистической значимости результатов в соответствии с [181] число наборов маршрутов площадной съёмки должно составлять не менее $K \geq 15$, а число опорных точек на каждом снимке — не менее $J_k \geq 15$; при этом точки должны быть равномерно распределены по полю снимка.

Определим координатные рассогласования в опорных точках в метрах:

$$\Delta x_{kj} = x_{kj} - x_{kj}^{\text{оп}}, \quad \Delta y_{kj} = y_{kj} - y_{kj}^{\text{оп}}, \quad \Delta_{kj} = \sqrt{\Delta x_{kj}^2 + \Delta y_{kj}^2}. \quad (3.23)$$

Для каждого снимка рассчитаем среднюю ошибку определения координат и среднеквадратическое отклонение этой ошибки в метрах:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta x_k} &= \frac{1}{J_k} \sum_{j=1}^{J_k} \Delta x_{kj}, & \overline{\Delta y_k} &= \frac{1}{J_k} \sum_{j=1}^{J_k} \Delta y_{kj}, & \overline{\Delta_k} &= \frac{1}{J_k} \sum_{j=1}^{J_k} \Delta_{kj}, \\ \sigma_{xk} &= \sqrt{\frac{1}{J_k - 1} \sum_{j=1}^{J_k} (\Delta x_{kj} - \overline{\Delta x_k})^2}, & \sigma_{yk} &= \sqrt{\frac{1}{J_k - 1} \sum_{j=1}^{J_k} (\Delta y_{kj} - \overline{\Delta y_k})^2}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Проверку на наличие грубых ошибок в оценке координатных рассогласований, которые могут возникнуть в процессе отождествления опорных точек, выполним в соответствии с критерием Граббса [181; 182]. Для этого вычислим следующие показатели:

$$G_{xk} = \frac{\max_j |\Delta x_{kj} - \overline{\Delta x_k}|}{\sigma_{xk}}, \quad G_{yk} = \frac{\max_j |\Delta y_{kj} - \overline{\Delta y_k}|}{\sigma_{yk}}. \quad (3.25)$$

Если $G_{xk} > G_T$ или $G_{yk} > G_T$, где G_T — табличное значение порогового критерия Граббса, то из расчётов исключается опорная точка с наибольшим абсолютным отклонением по соответствующей координате. После исключения параметры $\overline{\Delta x_k}$, $\overline{\Delta y_k}$, $\overline{\Delta k}$, σ_{xk} , σ_{yk} пересчитываются заново.

Параметры σ_{xk} и σ_{yk} позволяют оценить уровень внутрикадровых искажений и качество геометрической обработки снимка. При условии высокой точности опорной информации данные величины должны характеризовать погрешность отождествления опорных точек и находиться в пределах 1,5–2 пикселей. Невыполнение данного условия свидетельствует о наличии на снимке высокочастотных искажений, обусловленных угловым движением КА и не учтённых в строгой модели съёмки при геокодировании.

Получим оценки математических ожиданий и среднеквадратических отклонений ошибок плановых координат по группе из K изображений:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \overline{\Delta x_k}, & \bar{Y} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \overline{\Delta y_k}, \\ \sigma_X &= \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\overline{\Delta x_k} - \bar{X})^2}, & \sigma_Y &= \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\overline{\Delta y_k} - \bar{Y})^2}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Выполним проверку гипотезы о равенстве нулю значений \bar{X} и \bar{Y} на основе t -критерия Стьюдента [183; 184]:

$$t_X = \frac{|\bar{X}|}{\sigma_X} \sqrt{K}, \quad t_Y = \frac{|\bar{Y}|}{\sigma_Y} \sqrt{K}. \quad (3.27)$$

Если значения t_X и t_Y не превышают квантиль распределения Стьюдента $t_{\alpha, K-1}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,9$ и числом степеней свободы $K - 1$, то гипотеза о равенстве нулю математических ожиданий принимается.

В случае подтверждения условия $\bar{X} = \bar{Y} = 0$ проверим равенство дисперсий ошибок σ_X^2 и σ_Y^2 с помощью критерия Фишера [183; 184]:

$$F = \frac{\max(\sigma_X^2, \sigma_Y^2)}{\min(\sigma_X^2, \sigma_Y^2)}. \quad (3.28)$$

Если значение F не превышает квантиль распределения Фишера $F_{\alpha, (K-1, K-1)}$, то гипотеза о равенстве дисперсий принимается.

При одновременном выполнении условий $\bar{X} = \bar{Y} = 0$ и $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$ итоговая оценка точности координатной привязки геокодированных изображений определяется по критерию CE90 в соответствии с (3.22).

3.4.4. Рассмотрим подход к определению вероятностной оценки ошибки координатной привязки материалов съёмки, обладающий большей общностью и свободный от ограничений на равенство нулю математических ожиданий и равенство среднеквадратических отклонений ошибок геопривязки. Для определения 90 %-го перцентиля ошибки координатной привязки используем алгоритм непараметрической оценки [177].

Упорядочим средние отклонения координат $\overline{\Delta}_k$ по группе из K изображений в порядке возрастания:

$$\overline{\Delta}_{(1)} \leq \overline{\Delta}_{(2)} \leq \dots \leq \overline{\Delta}_{(K)}. \quad (3.29)$$

Положение искомого перцентиля в упорядоченном ряду определяется величиной

$$P = 0,9 K + 0,5. \quad (3.30)$$

Обозначим через j и f целую и дробную части числа P соответственно, $1 \leq j < K$. Тогда несмещённая оценка 90 %-го перцентиля ошибки координатной привязки определяется методом линейной интерполяции:

$$P90 = (1 - f) \overline{\Delta}_{(j)} + f \overline{\Delta}_{(j+1)}. \quad (3.31)$$

3.4.5. Таким образом, в настоящем разделе разработан статистический аппарат оценки точности координатной привязки геокодированных изображений, свободный от ограничений на равенство среднеквадратических отклонений и математических ожиданий ошибок геопривязки.

Для одиночных снимков методика предусматривает последовательное выполнение следующих этапов: вычисление координатных рассогласований в опорных точках; отбраковку грубых ошибок по критерию Граббса; оценку внутрикадровых искажений по параметрам σ_{xk} и σ_{yk} ; формирование обобщённых оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений по группе из $K \geq 15$ одновременных изображений; проверку статистических гипотез о равенстве нулю математических ожиданий и равенстве дисперсий по критериям Стьюдента и Фишера соответственно; вычисление итоговой вероятностной оценки точности геопривязки — СЕ90 либо непараметрического перцентиля $P90$.

Применительно к формируемым по результатам площадной съёмки мозаичным изображениям, разработанный статистический аппарат применяется независимо к двум наборам данных: совокупности одиночных снимков, входящих в состав мозаики, и совокупности мозаичных изображений, сформированных

из них. Это позволяет получить две сопоставимые вероятностные оценки точности геопривязки: $P90_O$ — для совокупности одиночных снимков, $P90_M$ — для совокупности мозаичных изображений.

Корректность выполненной геометрической обработки, включая процедуру блочного уравнивания по RPC-модели с двухкомпонентной моделью поправок без привлечения наземной опорной информации, подтверждается выполнением условия

$$P90_M \leq P90_O, \quad (3.32)$$

означающего, что синтез мозаики не приводит к ухудшению точности геопривязки по сравнению с исходными одиночными снимками. Невыполнение данного условия свидетельствует о неадекватности применяемой модели геометрической обработки и требует её пересмотра.

Выводы по главе 3

1. Рассмотрена задача синтеза мозаичных снимков по материалам площадной съёмки. Показана структурная схема синтеза, связывающая результаты геометрической обработки с дальнейшей обработкой. Изложены аспекты синтеза, обеспечивающие геометрическое и радиометрическое согласование объединяемых изображений.

2. Разработан алгоритм автоматического построения линии пореза мозаичного изображения, основанный на комбинированной стоимостной функции, объединяющей морфологический градиент фрагментов и маску рассогласований, формируемую нейронной сетью по совокупности радиометрических признаков и карт диспаратности, характеризующих трёхмерную структуру сцены (Положение 3). Алгоритм позволяет обнаруживать и обходить при проведении линии пореза области геометрических рассогласований высотных объектов и изменений сюжета, не выявляемые известными алгоритмами, оперирующими исключительно яркостными признаками.

3. Выполнен анализ задачи оценки качества линии пореза мозаичных изображений. Задача сформулирована как поиск аномальных границ на мозаичном снимке.

Разработан алгоритм численной оценки качества линии пореза мозаичных изображений, основанный на анализе локальных структурных различий фрагментов в области перекрытия, оценке насыщенности границы вдоль линии пореза и последующей обработке результатов (Положение 4). По результатам работы алгоритма синтезируется маска дефектов и вычисляется интегральный показатель качества как доля дефектных пикселей линии пореза.

4. Разработана методика оценки точности геопривязки мозаичных изображений. Применительно к мозаичным изображениям, формируемым по результатам площадной съёмки, разработанный статистический аппарат применяется независимо к двум наборам данных: совокупности одиночных снимков, входящих в состав мозаики, и совокупности мозаичных изображений, сформированных из них. Корректность выполненной геометрической обработки подтверждается выполнением условия сохранения точностных характеристик исходных изображений.

5. Материалы главы опубликованы в работах [162; 167; 168; 171; 175; 185—188].

Глава 4. Практическая реализация алгоритмов обработки данных площадной съёмки

4.1 Структура программного комплекса обработки

4.1.1. Разработанное в главах 2 и 3 математическое и алгоритмическое обеспечение реализовано в виде разделяемых библиотек для функционирования в составе программного комплекса (ПК) обработки данных площадной съёмки (ОДПС). ПК создан на базе платформы «Er-Set» [189; 190], предназначенной для разработки высокопроизводительного специализированного программного обеспечения обработки данных систем ДЗЗ. В рамках настоящего раздела необходимо решить следующие задачи:

- 1) обосновать структуру программного комплекса, которая позволит выполнять обработку материалов площадной съёмки в автоматическом режиме, а также автоматизированном режиме для контроля наиболее значимых этапов оператором;
- 2) разработать схему взаимодействия компонентов программных (КП) при выполнении обработки материалов площадной съёмки в автоматическом и автоматизированном режимах;
- 3) разработать принципы организации распределённой многосерверной обработки, предусматривающей декомпозицию вычислительного процесса на совокупность взаимосвязанных подзадач, включая вычислительно трудоёмкие этапы, с обеспечением их независимого и масштабируемого исполнения.

4.1.2. ПК ОДПС архитектурно представляет собой модульный монолит [191]. Входящие в его состав модули согласно Единой системе программной документации [192] агрегированы в программные компоненты (КП) и функционально относятся к одному из трех слоев (рис. 4.1):

- слой Представления (Presentation) — пользовательский интерфейс, средства визуализации и инструменты контроля обработки;
- слой Предметной логики (Domain) — алгоритмы геометрической обработки, синтеза мозаичных изображений и классификации данных;

– слой Источника данных (Data Source) — подсистема доступа к файлам изображений, паспортов маршрутов, цифровым моделям рельефа и вспомогательным наборам данных.

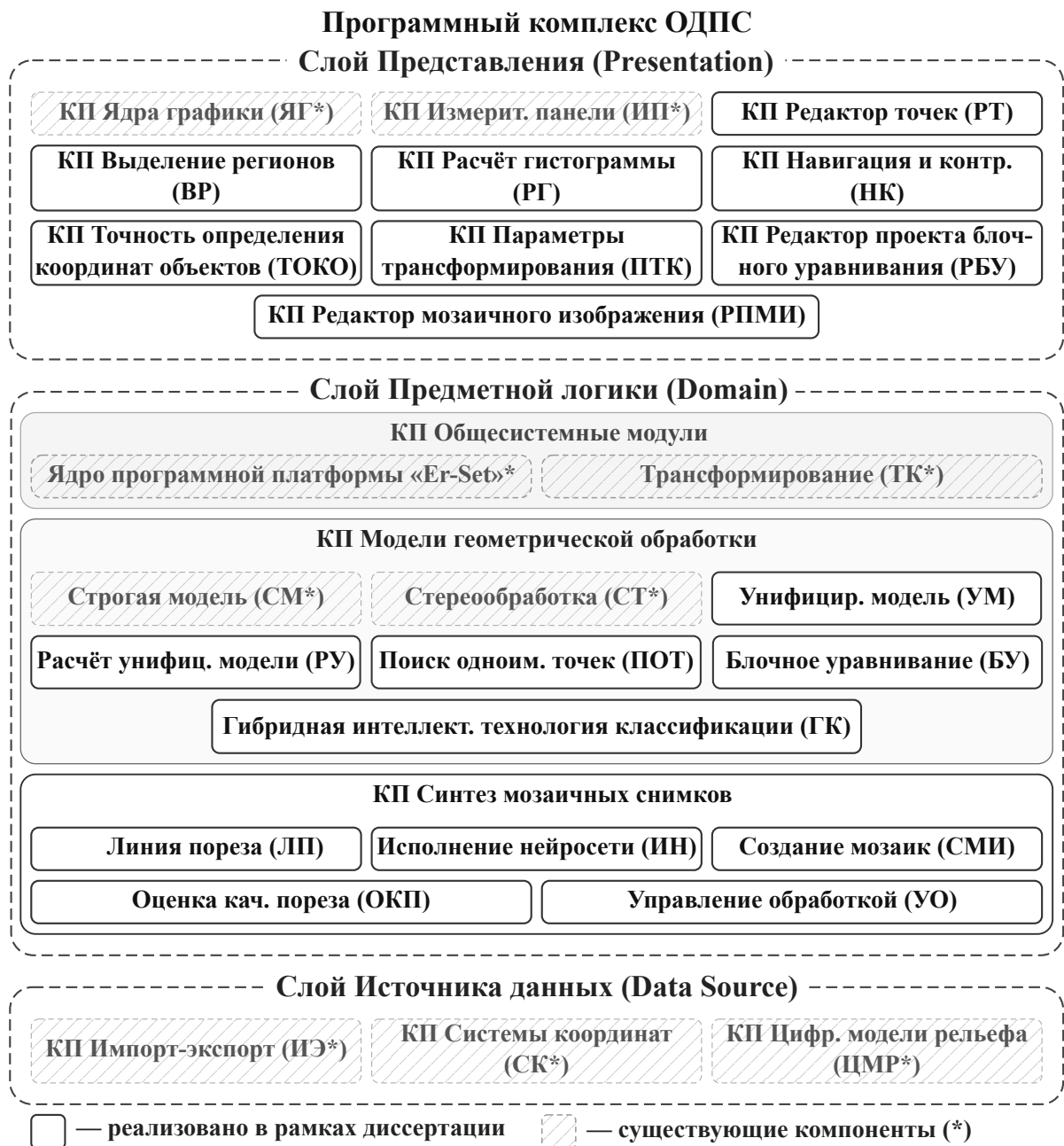


Рисунок 4.1 — Трёхслойная структура ПК ОДПС

Выбор монолитной архитектуры вместо микросервисной [193] обусловлен особенностями решаемой задачи:

- 1) материалы площадной съёмки представляют собой набор из 2–5 маршрутов, обрабатываемых как единое целое, что не требует горизонтального масштабирования процесса обработки;
- 2) в соответствии с рекомендациями, изложенными в [65], при выполнении процедур обработки следует придерживаться принципа минимизации

числа передискретизаций, что предполагает последовательное выполнение геометрических преобразований в рамках единого адресного пространства без промежуточной сериализации растровых данных;

- 3) обеспечение быстродействия пользовательского интерфейса при работе оператора в автоматизированном режиме предъявляет строгие требования к задержкам при взаимодействии между слоем представления и слоем предметной логики, которые затруднительно выполнить при наличии сетевого обмена между компонентами ПО.

Вместе с тем принятое архитектурное решение не исключает возможности эффективного использования ПК ОДПС в составе многосерверных центров обработки данных ДЗЗ в полностью автоматическом режиме, при котором задействуются только слой предметной логики и слой источника данных, а распределение заданий между экземплярами ПК осуществляется внешней управляющей программой.

Рассмотрим состав КП, сгруппированных по слоям архитектуры, с указанием функционального назначения каждого модуля. Компоненты, реализованные в рамках диссертации, отмечены отдельно.

Слой Источника данных обеспечивает унифицированный доступ к входным и выходным данным программного комплекса. Выделение данного слоя позволяет модулям слоя предметной логики оперировать абстракциями данных, не зависящими от конкретных форматов хранения и источников. Слой включает КП импорта-экспорта (ИЭ) — набор библиотек для работы с растровыми данными в формате GeoTIFF и паспортами маршрутов, а также для формирования паспортов выходной продукции с метаданными; КП систем координат (СК) — набор библиотек для работы с параметрами систем координат и картографических проекций; КП цифровых моделей рельефа (ЦМР) — набор библиотек, обеспечивающих унифицированный доступ к различным источникам данных ЦМР, включая тайлированное представление и единый растр, а также преобразование высот между геодезическими и ортометрическими системами. Все компоненты данного слоя являются частью базовой программной платформы.

Слой Предметной логики содержит алгоритмическое ядро программного комплекса и подразделяется на три группы КП: общесистемные модули, модели геометрической обработки и синтез мозаичных снимков. Центральным элементом слоя является ядро программной платформы «Er-Set» [189; 190], предоставляющее компонентам комплекса доступ к объектам, создаваемым

мым в процессе функционирования. Основным типом объекта ядра является объект-изображение, содержащий дочерние структуры для решения целевых задач: геодезической привязки, работы с атрибутивной информацией и т. д. Межпрограммное взаимодействие компонентов комплекса осуществляется через ассоциативный интерфейс [194]. К общесистемным модулям также относится КП трансформирования в картографические проекции (ТК), обеспечивающий трансформирование изображений на среднюю высоту или с привлечением ЦМР с заданными параметрами: системой координат, размером пикселя, типом интерполяции и др.

КП моделей геометрической обработки объединяет модули, реализующие математические модели геометрической привязки изображений и процедуры блочного уравнивания. Модули данного КП образуют последовательный конвейер обработки: 1) по строгой модели съёмки рассчитываются коэффициенты унифицированной модели; 2) унифицированная модель используется для геопривязки; 3) блочное уравнивание уточняет параметры модели поправок для материалов площадной съёмки изображений.

Модуль геопривязки по строгой модели съёмки (СМ) обеспечивает преобразование координат между системой координат сканирующего устройства и геодезической системой координат WGS-84 на основании строгой модели сканерной съёмки, реализованной для конкретной аппаратуры по данным измерительной информации о состоянии и положении КА в процессе съёмки. Данный модуль является частью базовой программной платформы.

Модуль расчёта параметров унифицированной модели (РУ), реализованный в рамках диссертации, выполняет аппроксимацию строгой модели съёмки рациональными полиномами (RPC-модель). Модуль включает расчёт статистических показателей точности аппроксимации для принятия решения о корректности применения унифицированной модели к материалам съёмки.

Модуль геопривязки по унифицированной модели (УМ), реализованный в рамках диссертации, обеспечивает преобразование координат между системой координат сканирующего устройства (или растровыми координатами трансформированного изображения на среднюю высоту) и геодезической системой координат WGS-84 на основе набора аппроксимирующих коэффициентов и найденных параметров модели поправок.

Модуль блочного уравнивания (БУ), реализованный в рамках диссертации, осуществляет поиск параметров разработанной математической модели:

истинных геодезических координат одноимённых и опорных точек, а также параметров заданной модели поправок. Исходными данными служит проект блочного уравнивания. Модуль реализует Положение 2, выносимое на защиту: численно устойчивый алгоритм блочного уравнивания изображений.

Модуль поиска одноимённых точек (ПОТ), реализованный в рамках диссертации, выполняет автоматический поиск одноимённых точек на паре изображений площадной съёмки. Модуль реализует Положение 1, выносимое на защиту: трёхэтапный алгоритм фильтрации областей ключевых точек перед блочным уравниванием. Для классификации корректности сопоставления ключевых точек модуль использует интерфейс КП обучения и применения ГИТКД (ГК). Автоматическое формирование обучающей выборки обеспечивается алгоритмом ожидания-максимизации, моделирующим смесь распределения Райса и равномерного распределения на основе длин векторов невязок пар ключевых точек.

Модуль обучения и применения гибридной интеллектуальной технологии классификации данных (ГК), реализованный в рамках диссертации, предоставляет другим модулям комплекса унифицированный интерфейс для обучения и использования составного классификатора, сочетающего SVM-классификатор и классификатор на основе окна Парзена. Интерфейс ГК используется модулем ПОТ для классификации корректности сопоставления ключевых точек.

Модуль стереообработки (СТ) обеспечивает формирование карт диспаратности по RPC-модели съёмки, включая построение эпиполярно выпрямленных изображений, формирование карт диспаратности по осям x и y , а также обратное трансформирование в исходную систему координат сканирующего устройства. Модуль является частью базовой программной платформы.

КП синтеза мозаичных снимков объединяет модули, обеспечивающие формирование мозаичных изображений из материалов площадной съёмки. Все модули данного КП реализованы в рамках диссертации.

Модуль проведения линии пореза (ЛП) реализует проведение линии пореза с использованием нейронной сети, принимающей на вход исходные изображения и карту диспаратности для формирования стоимостной функции, позволяющей обходить рассогласования высотных объектов. Модуль реализует Положение 3, выносимое на защиту: модифицированный алгоритм формирования линии пореза при синтезе мозаичных изображений площадной съёмки.

Модуль исполнения нейронной сети (ИН) представляет собой библиотеку выполнения предобученной сверточной нейронной сети сегментации, используемой при проведении линии пореза.

Модуль оценки качества линии пореза (ОКП) реализует оценку качества на основе одноклассового SVM-классификатора признаков меры насыщения границы и статистического анализа индексов структурного сходства. Модуль реализует критерий оценки качества Положение 4, выносимого на защиту: критерий обнаружения дефектных границ с использованием анализа статистических показателей и метода искусственного интеллекта, применяемый в алгоритме оценки качества линии пореза.

Модуль создания мозаичных изображений (СМИ) выполняет объединение трансформированных в картографическую проекцию изображений маршрутов в единый мозаичный снимок. Модуль обеспечивает наложение изображений в заданном порядке маршрутов с применением линии пореза, сформированной модулем ЛП, и радиометрическое выравнивание яркостей в зоне перекрытия для достижения визуальной непрерывности результирующего изображения.

Модуль управления обработкой (УО) обеспечивает управление процессом обработки материалов площадной съёмки в соответствии с заданием, которое может включать выполнение полного цикла от изображений уровня L1 до изображений уровня L3 либо отдельных процедур для организации многосерверной обработки. Модуль поддерживает передачу управления оператору при обработке в автоматизированном режиме при наличии слоя Представления.

Слой Представления обеспечивает интерактивное взаимодействие оператора с программным комплексом. КП ядра графической подсистемы (ЯГ) реализует главное окно графического интерфейса и событийную модель обмена сообщениями. КП измерительных панелей (ИП) предоставляет средства интерактивного измерения растровых и географических координат, значений кодов яркости, расстояний в пикселях и метрах. Указанные компоненты являются частью базовой программной платформы.

Компоненты НК, РГ и ВР, реализованные в рамках диссертации, совместно обеспечивают визуальный контроль качества данных на каждом этапе обработки. КП навигации и контрастирования (НК) обеспечивает интерактивное контрастирование 16-битных изображений для визуализации в экранных яркостях (8 бит) и оперативную навигацию по области изображения. КП расчёта гистограммы (РГ) обеспечивает расчёт гистограммы, статистических характеристик и распределе-

ния яркостей по всему снимку и для выделенного региона, анализ динамического диапазона изображений, их сравнение и экспорт результатов. КП выделения регионов (ВР) предоставляет средства выделения произвольных регионов интереса для локальной обработки изображения, нанесения векторных полигонов и базовых операций с ними.

Все компоненты интерактивной обработки реализованы в рамках диссертации и обеспечивают управление процедурами обработки в автоматизированном режиме. КП редактора точек (РТ) предоставляет средства ввода (скальвания) опорных и одноимённых точек, используемых при блочном уравнивании, с возможностью импорта и экспорта в форматы ГИС-систем для грубой оценки точности геопривязки, а также инструменты автоматизации процедур скальвания на основе корреляционного анализа.

КП оценки точности определения координат объектов (ТОКО) реализует предлагаемую методику. Методика включает сбор статистических показателей по одиночным и мозаичным снимкам опорных полигонов; ключевой составляющей методики является критерий (Положение 4), позволяющий на основе сопоставления полученных вероятностных статистических оценок сделать вывод о корректности выполняемой геометрической обработки. КП обеспечивает экспорт результатов оценки для дальнейшего анализа и получение базовых статистических показателей точности геопривязки.

КП параметров трансформирования в картографические проекции (ПТК) предоставляет средства выбора параметров трансформирования и запуска процедуры на среднюю высоту или с учётом ЦМР.

КП редактора проекта блочного уравнивания (РБУ) обеспечивает управление процедурой блочного уравнивания: формирование и редактирование проекта блока (набора уравниваемых изображений, параметров моделей поправок, массивов одноимённых и опорных точек, параметров алгоритма оптимизации), запуск блочного уравнивания в соответствии с предложенным численно стабильным алгоритмом, а также визуализацию невязок в опорных и одноимённых точках.

КП редактора проекта мозаичного изображения (РПМИ) обеспечивает управление процедурой формирования мозаичного изображения и включает три функциональных этапа. На этапе подготовки проекта оператор задаёт порядок маршрутов, систему координат, габариты и параметры мозаики, а также выполняет настройку контрастирования и фотовыравнивания. На этапе обработки осуществляется запуск автоматического проведения линии пореза предлагаемым

алгоритмом с возможностью ручной коррекции проблемных областей. На этапе контроля выполняется автоматическая оценка качества с визуализацией дефектов линии пореза для дальнейшего анализа и адаптивного ретуширования.

4.1.3. На рис. 4.2 представлена реализованная в ПК ОДПС схема взаимодействия компонентов и модулей при обработке материалов площадной съёмки. Входными данными являются K маршрутов уровня обработки L1 и цифровая модель рельефа.

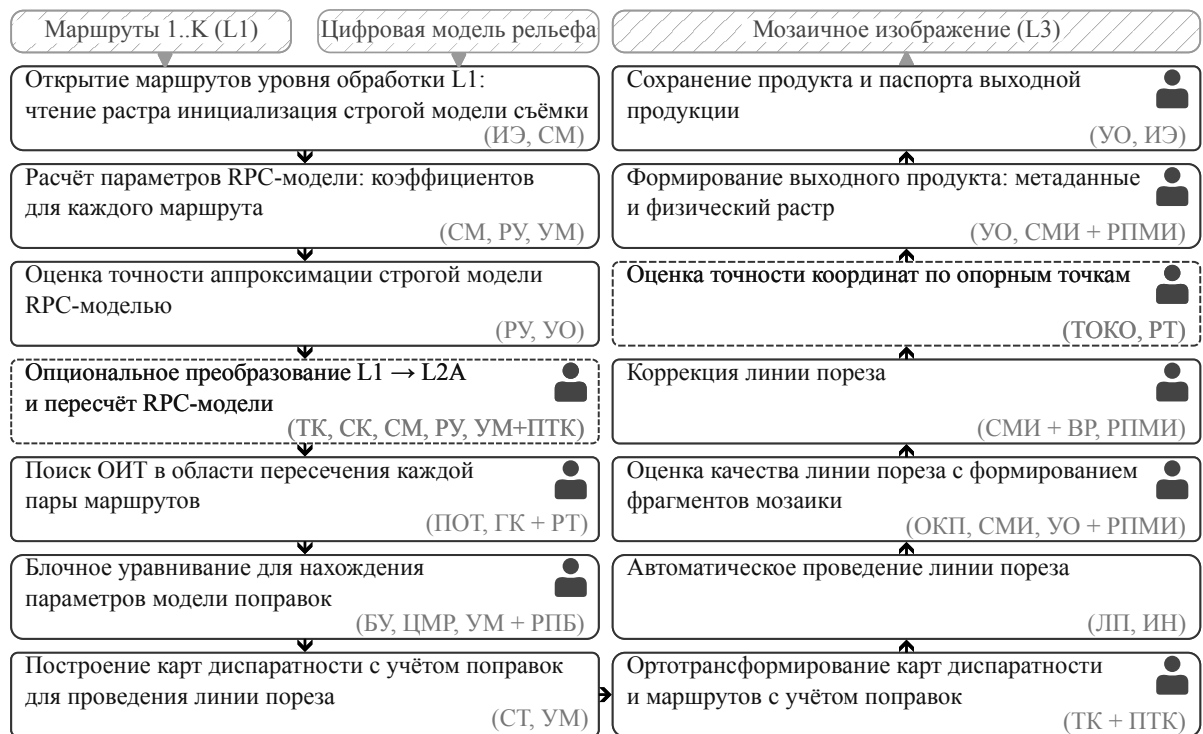


Рисунок 4.2 — Схема взаимодействия компонентов и модулей ПК ОДПС при формировании мозаичного снимка

Технологический процесс обработки представляет собой единый последовательный конвейер, идентичный для автоматического и автоматизированного режимов работы [195]. Различие между режимами состоит в интерпретации специально помеченных шагов конвейера: в автоматическом режиме все шаги выполняются без участия оператора; в автоматизированном режиме помеченные шаги являются точками останова, при достижении которых конвейер приостанавливается и оператор получает возможность проконтролировать промежуточные результаты, скорректировать параметры обработки или выполнить ручное вмешательство. После подтверждения оператором выполнение конвейера возобновляется. Такое построение позволяет использовать единую реализацию процесса обработки как в составе многосерверных центров (автоматический режим), так

и при работе оператора с графическим интерфейсом (автоматизированный режим). Отдельные шаги конвейера выполняются по условию, определяемому результатом предшествующей процедуры. На всех этапах, допускающих участие оператора, доступны средства визуального контроля (НК, РГ), обеспечивающие инструменты визуализации и анализа изображений.

Обработка начинается с открытия файлов маршрута и инициализации геопривязки по строгой модели съёмки (ИЭ, СМ), затем выполняется расчёт параметров RPC-модели путём аппроксимации строгой модели съёмки (СМ, РУ, УМ). Далее выполняется оценка точности аппроксимации (РУ, УО): при неудовлетворительном результате маршруты предварительно трансформируются на среднюю высоту ($L1 \rightarrow L2A$) с пересчётом параметров RPC-модели для трансформированных изображений (ТК, СК, СМ, РУ, УМ; параметры трансформирования задаются оператором через ПТК).

На следующем этапе выполняется автоматический поиск одноимённых точек в области пересечения маршрутов (ПОТ, ГК) с возможностью контроля и коррекции оператором (РТ). По найденным одноимённым точкам проводится блочное уравнивание по RPC-модели с привлечением ЦМР и нахождением параметров модели поправок (БУ, ЦМР, УМ; управление — через РБУ).

С учётом найденных поправок строятся карты диспаратности (СТ, УМ), после чего выполняется ортотрансформирование исходных маршрутов и карт (ТК; параметры задаются оператором через ПТК).

На этапе синтеза мозаичного изображения автоматически проводится линия пореза (ЛП, ИН), после чего выполняется оценка качества линии пореза с локальным формированием фрагментов мозаики для выявления визуально заметных перепадов яркости на границе (ОКП, СМИ, УО; управление — через РПМИ). При обнаружении дефектов оператор выполняет локальную коррекцию линии пореза (СМИ, ВР, РПМИ) при необходимости.

Далее проводится оценка точности определения координат объектов по опорным точкам (ТОКО, РТ). Формирование выходного продукта мозаики включает расчёт метаданных и формирование физического растра из виртуального представления (УО, СМИ; управление — через РПМИ). Завершающим шагом является сохранение выходного продукта мозаики и метаданных в паспорт выходной продукции (УО, ИЭ).

4.1.4. Архитектура ПК ОДПС допускает использование в составе многосерверных центров обработки данных ДЗЗ. Такой режим эксплуатации обеспе-

чивается декомпозируемостью конвейера обработки: модуль УО поддерживает выполнение как полного цикла обработки, так и отдельных этапов или их групп, что позволяет распределять вычислительную нагрузку между несколькими экземплярами комплекса. Декомпозиция на отдельные этапы целесообразна с точки зрения эффективности использования вычислительных ресурсов: этапы конвейера обладают существенно различными характеристиками по интенсивности использования центрального процессора, оперативной памяти и дисковой подсистемы, что позволяет назначать узлам задания, соответствующие их аппаратным характеристикам, и параллельно обрабатывать независимые наборы данных.

Распределённая обработка организуется с участием внешней управляющей программы, выступающей в роли планировщика заданий. Планировщик определяет необходимость распределения, формирует очередь заданий и выполняет подготовку исходных данных для конкретного этапа или группы этапов в обменной директории, доступной всем узлам многосерверного центра через сетевую файловую систему или объектное хранилище. Для выполнения задания запускается ОСИ-совместимый контейнер [196; 197], содержащий слой источника данных и слой предметной логики ПК ОДПС. Использование контейнеризации обеспечивает воспроизводимость окружения исполнения, независимость от конфигурации конкретного вычислительного узла и совместимость с распространёнными системами оркестрации контейнеров [196]. Промежуточные результаты каждого этапа сохраняются в обменную директорию и становятся доступны для последующих этапов, выполняемых на том же или ином вычислительном узле; такая организация взаимодействия не требует прямого сетевого обмена между экземплярами комплекса и обеспечивает возможность повторного запуска отдельных этапов при сбоях без перезапуска всего конвейера.

Параметры задания на обработку передаются в контейнер через аргументы командной строки или переменные окружения, что соответствует принятым практикам конфигурирования контейнеризованных приложений и позволяет интегрировать комплекс без модификации программного кода. После полной инициализации ядра и модулей комплекса модуль УО выполняет разбор полученного задания и определяет подмножество этапов конвейера, подлежащих выполнению в рамках текущего запуска. По завершении обработки или при возникновении ошибки контейнер завершает работу с соответствующим кодом возврата, используемым планировщиком для принятия решений о продолжении обработки или повторном запуске задания.

Журналы работы комплекса выводятся в стандартный поток вывода в формате, совместимом со стеком ELK [198] или аналогичными системами централизованного сбора и анализа журналов. Такой способ журналирования обеспечивает интеграцию с инфраструктурой мониторинга многосерверного центра без необходимости прямой записи в файловую систему или сетевые сервисы ведения журналов, что упрощает развёртывание и соответствует принципу независимости контейнера от состояния внешних систем. Структурированный формат журналов позволяет автоматически выявлять сбои, оценивать продолжительность выполнения отдельных этапов и собирать статистику использования комплекса.

Выходным продуктом конвейера является геометрически и радиометрически бесшовное мозаичное изображение в формате GeoTIFF, сопровождаемое файлом метаданных. При выполнении отдельных этапов выходными продуктами являются промежуточные данные соответствующего этапа, размещаемые в обменной директории в форматах, определённых интерфейсом взаимодействия между этапами конвейера.

4.1.5. Таким образом, представлена программная реализация математического и алгоритмического обеспечения, разработанного в главах 2 и 3, в составе программного комплекса обработки данных площадной съёмки, построенного на базе платформы «Er-Set». Обоснована структура ПК ОДПС в виде трёхслойной архитектуры монолитного программного обеспечения, включающей слой представления, слой предметной логики и слой источника данных, служащие для логической группировки компонентов программных в соответствии с требованиями ЕСПД.

Предложенная структура обеспечивает выполнение обработки как в полностью автоматическом режиме, так и в автоматизированном режиме с возможностью контроля оператором наиболее значимых этапов. Разработана схема взаимодействия компонентов программных при выполнении обработки материалов площадной съёмки, представляющая собой единый последовательный конвейер, идентичный для автоматического и автоматизированного режимов.

Разработаны принципы организации распределённой многосерверной обработки, основанные на декомпозируемости конвейера и поддержке модулем УО выполнения как полного цикла, так и отдельных этапов или их групп. Распределение заданий между экземплярами комплекса осуществляется внешним планировщиком с использованием обменной директории и ОСИ-совместимых контейнеров, что обеспечивает воспроизводимость окружения исполнения, на-

значение заданий узлам в соответствии с их аппаратными профилями и возможность повторного запуска отдельных этапов при сбоях без перезапуска всего конвейера.

4.2 Инструменты выполнения и контроля геометрической обработки

4.2.1. Автоматизированный режим предоставляет оператору инструментальный контроль 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. В рамках настоящего раздела решаются следующие задачи:

- 1) обосновать состав и функциональное назначение инструментальных средств автоматизированного режима, реализующих все этапы геометрической обработки материалов площадной съёмки, представленные в главе 2;
- 2) представить графический интерфейс, обеспечивающий управление процедурами поиска одноимённых точек, блочного уравнивания и ортотрансформирования, а также визуальный контроль их результатов;
- 3) описать средства апостериорной оценки точности геопривязки отдельных маршрутов, позволяющие подтвердить корректность геометрической обработки до этапа синтеза мозаичного изображения.

4.2.2. Инструментальные средства автоматизированного режима реализуются компонентами слоя представления, описанными в разделе 4.1, и обеспечивают оператору последовательный доступ к ключевым этапам конвейера обработки в точках останова. Главное окно ПК ОДПС, формируемое КП ядра графической подсистемы (ЯГ), организовано в соответствии с архитектурой MDI (Multiple Document Interface) и предусматривает одновременное отображение нескольких маршрутов в совмещённых окнах просмотра с поддержкой режима геопривязанной визуализации, при котором перемещение по одному из маршрутов автоматически сопровождается синхронным позиционированием остальных окон просмотра на точки с идентичными геодезическими координатами. Указанный режим, обеспечиваемый средствами КП измерительных

панелей (ИП), используется оператором для оперативного визуального контроля качества геопривязки и корректности сопоставления одноимённых точек на всех этапах обработки.

4.2.3. Скол опорных и одноимённых точек выполняется средствами КП редактора точек (РТ), который интегрирован с окнами просмотра маршрутов главного окна ПК ОДПС. Применительно к опорным точкам РТ функционирует в конфигурации редактора опорных точек местности (Редактор ОТМ). Этот редактор предоставляет расширенную структуру данных, включающую: тип точки («плановая», «плановая-высотная», «контрольная»); растровые координаты измерения с ассоциированной СКО измерения (пикс.); эталонные геодезические координаты с ассоциированной СКО плановых координат (м); высоту точки с указанием системы высот (нормальная, геодезическая, ортометрическая) и ассоциированной СКО высоты (м); геодезическую систему координат опорных значений (WGS-84, СК-42 или ПЗ-90.11), с автоматическим преобразованием координат между указанными системами. Поддерживается импорт-экспорт сформированного множества точек в текстовом формате «`gsrxml`», обеспечивающем совместимость с ГИС-системами и автоматизированными средствами оценки точности геопривязки.

Оператор имеет возможность интерактивного указания соответствующих пикселей на паре пересекающихся изображений с субпиксельной точностью на основе корреляционного уточнения положения точки в окрестности измерения. Для повышения эффективности интерактивного скола при формировании обширных наборов точек реализован режим повторного скола, при котором после ввода координат очередной точки автоматически создаётся новая запись и активируется режим скола её измеренной части, что исключает необходимость явного инициирования каждой операции оператором. При подключении к редактору цифровой модели рельефа высота сколотой опорной точки автоматически заполняется по значениям ЦМР с соответствующим указанием системы высот, что обеспечивает корректность дальнейшего использования точки в процедурах блочного уравнивания и оценки точности геопривязки.

4.2.4. Управление процедурой блочного уравнивания осуществляется средствами КП редактора проекта блочного уравнивания (РБУ). Проект блока представляет собой совокупность уравниваемых маршрутов, параметров моделей поправок, массивов одноимённых и опорных точек, а также настроек алгорит-

ма оптимизации. Интерфейс редактора (рис. 4.3) выполнен в виде закрепляемой панели с тремя вкладками: «Данные», «Опорные точки» и «Общие точки».

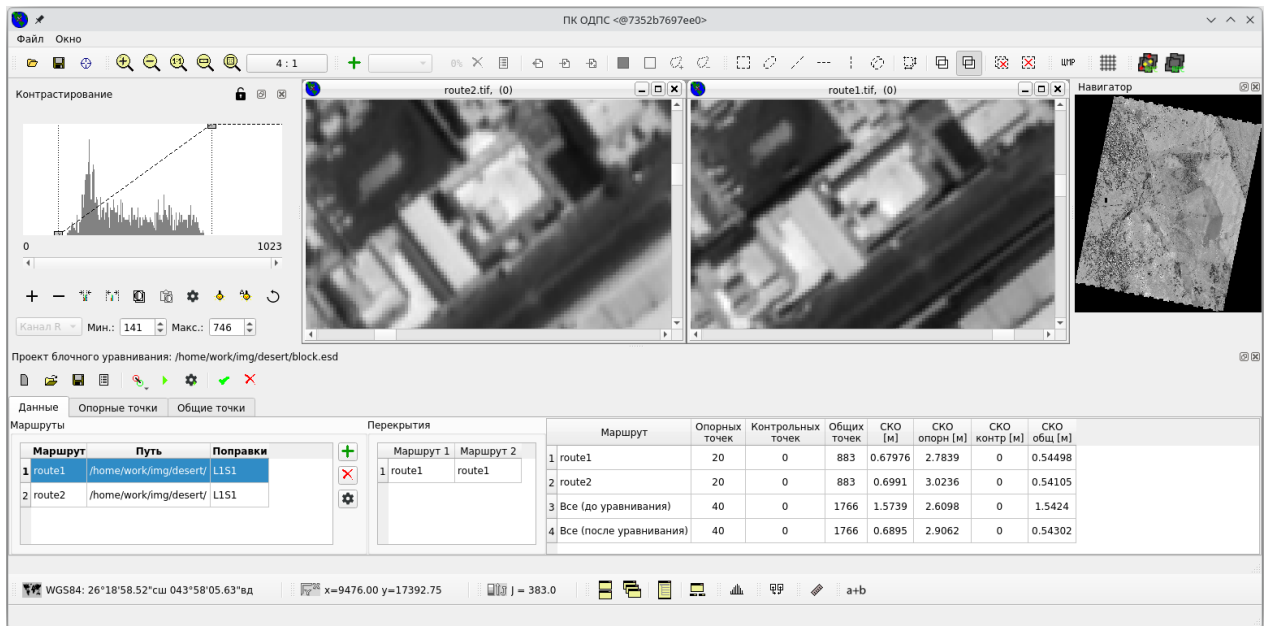


Рисунок 4.3 — Главное окно ПК ОДПС с активной вкладкой «Данные» редактора проекта блочного уравнивания

Вкладка «Данные» предназначена для формирования состава проекта блока и предъявления оператору сводных показателей качества уравнивания. В левой части вкладки расположена таблица маршрутов, в которой для каждого изображения отображаются: путь к файлу маршрута и условное обозначение применяемой модели поправок. Принятое обозначение модели поправок имеет вид « $LTSR$ », где параметр T определяет степень полиномиальной составляющей модели (2.57) в строчном направлении, а параметр R — в кадровом направлении. Такая нотация позволяет оператору задавать различные степени полинома по двум координатным направлениям независимо, что является существенным с учётом выявленной в главе 2 полиномиальной зависимости невязок от номера строки маршрута. Для каждой пары маршрутов формируется строка таблицы перекрытий, определяющая область пересечения, в которой выполняется поиск одноимённых точек. Правая часть вкладки содержит таблицу обобщённых статистических показателей, в которой для каждого маршрута и для блока в целом приводятся число опорных, контрольных и общих точек, а также среднеквадратические отклонения (СКО) невязок в метрах, рассчитанные отдельно по опорным, контрольным и общим точкам. Принципиальной особенностью представленной таблицы является выделение строк «Все (до уравнивания)» и «Все (после уравнивания)»,

позволяющих оператору непосредственно оценить эффективность применённой модели поправок: на рис. 4.3 приведён пример обработки двух маршрутов площадной съёмки, при которой суммарное СКО по общим точкам снижается с 1,5424 м до значения 0,54302 м, не превышающего значений СКО исходных маршрутов; при этом СКО по опорным точкам сохраняется на уровне исходных маршрутов, что подтверждает выполнение условия сохранения точностных характеристик геопривязки.

4.2.5. Запуск процедуры блочного уравнивания осуществляется с помощью панели инструментов редактора. По завершении процедуры формируется детализированный отчёт о ходе оптимизации, включающий: норму суммы квадратов невязок, рассчитанную отдельно для опорных и общих точек; норму невязки и норму неизвестных в линеаризованной системе уравнений; число выполненных итераций алгоритма Левенберга-Марквардта, используемого на втором этапе предложенного численно устойчивого алгоритма блочного уравнивания (Положение 2) для минимизации функционала (2.55); признак условия останова (достижение допустимого приращения вектора неизвестных или превышение предельного числа итераций); решающий определитель матрицы нормальных уравнений как индикатор её обусловленности; среднее и СКО невязок по группам опорных и общих точек. Совместный анализ указанных показателей позволяет оператору подтвердить численную устойчивость выполненной процедуры уравнивания.

Найденные параметры модели поправок отображаются в таблице маршрутов в явном виде в формате коэффициентов полинома по двум координатным направлениям, что обеспечивает оператору возможность контроля их физической адекватности: значения коэффициентов нулевого порядка соответствуют постоянным сдвигам в строчном и кадровом направлениях, значения коэффициентов первого порядка — линейным составляющим аффинной модели, коэффициентов высших порядков — нелинейным составляющим. После подтверждения оператора выполняется применение найденных параметров модели поправок к RPC-моделям обрабатываемых маршрутов: обновлённые модели геопривязки становятся доступны для последующих этапов обработки — построения карт диспаратности и ортотрансформирования.

4.2.6. Вкладка «Общие точки» (рис. 4.4) обеспечивает детальный анализ распределения невязок по отдельным одноимённым точкам и предназначена для локализации точек, в окрестности которых наблюдаются аномальные значения невязок.

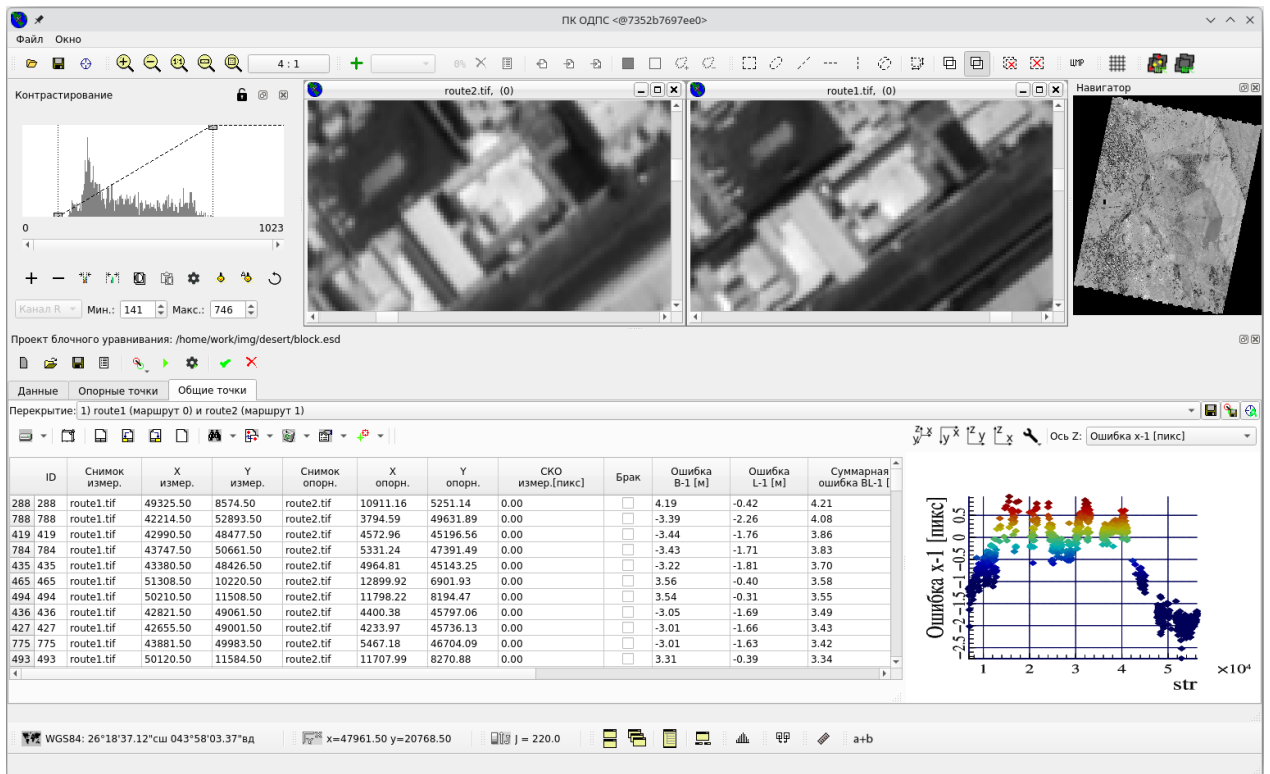


Рисунок 4.4 — Главное окно ПК ОДПС с активной вкладкой «Общие точки» редактора проекта блочного уравнивания: таблица невязок одноимённых точек и их визуализация в функции номера строки маршрута

Для выбранного оператором перекрытия таблица содержит для каждой одноимённой точки: растровые координаты измерения на обоих маршрутах, расчётную СКО измерения, отметку браковки, невязки в строчном и кадровом направлениях после уравнивания (Δn , Δm), а также суммарную длину вектора невязки. Особенностью реализации является интерактивная связь таблицы с окнами просмотра главного окна: выбор строки таблицы автоматически центрирует окна просмотра на соответствующей точке на обоих маршрутах, что позволяет оператору визуально оценить корректность сопоставления ключевых точек, выполненного алгоритмом фильтрации одноимённых точек (Положение 1), и при необходимости вручную отметить точку как бракованную, исключив её из процедуры уравнивания.

В правой части вкладки расположена область визуализации невязок одноимённых точек на диаграмме рассеяния, ось абсцисс которой соответствует выбранной оператором координате одноимённой точки (номер строки или столбца на маршруте), а ось ординат — одной из компонент вектора невязки. Точки на диаграмме окрашены в соответствии с значением невязки. Указанная визуализация позволяет оператору непосредственно идентифицировать систематические

зависимости невязок, характерные для материалов площадной съёмки и описываемые второй компонентой двухкомпонентной модели поправок (2.59).

4.2.7. После завершения процедуры блочного уравнивания и подтверждения оператором качества совмещения по показателям невязок выполняется ортотрансформирование маршрутов в картографическую проекцию. Указанная процедура управляется средствами КП параметров трансформирования в картографические проекции (ПТК), отображаемого в виде модального окна (рис. 4.5).

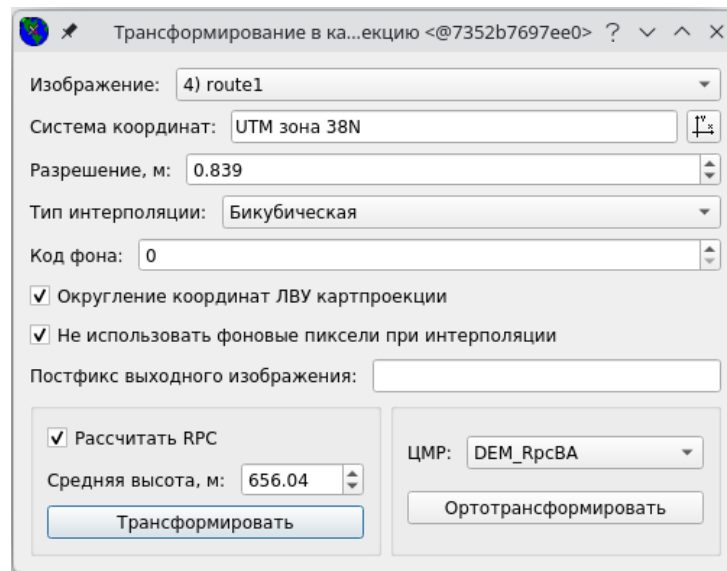


Рисунок 4.5 — Панель параметров трансформирования маршрута в картографическую проекцию

Панель предусматривает задание параметров, определяющих геометрию и радиометрию выходного трансформированного изображения: систему координат картографической проекции с поддержкой выбора стандартизованных проекций (в примере на рис. 4.5 — «UTM, зона 38N»); пространственное разрешение пикселя выходного изображения (0,839 м); тип интерполяции яркости (бикубическая интерполяция, обеспечивающая компромисс между радиометрической точностью и вычислительными затратами); код яркости фоновых пикселей вне области исходного изображения. Опция округления координат левого верхнего угла картографической проекции обеспечивает согласование сеток отсчётов выходных изображений соседних маршрутов, что является необходимым условием их последующего объединения без дополнительной яркостной интерполяции в соответствии с принципом минимизации числа передискретизаций. Опция исключения фоновых пикселей при интерполяции предотвращает возникновение артефактов на границе области валидных данных маршрута.

Панель поддерживает два режима трансформирования, реализуемых модулем ТК. В режиме трансформирования на среднюю высоту выходное изображение формируется как проекция исходного маршрута на горизонтальную плоскость заданной высоты (656,04 м в примере), что соответствует переходу к уровню обработки L2A; при активированной опции «Рассчитать RPC» для полученного изображения автоматически рассчитываются коэффициенты RPC-модели в соответствии с алгоритмом, разработанным в разделе 2.1, что обеспечивает сохранение совместимости трансформированного изображения с последующими процедурами обработки на основе унифицированной модели съёмки. В режиме ортотрансформирования выходное изображение формируется с привлечением ЦМР (в примере — «DEM_RpcBA»), что соответствует переходу к уровню обработки L2B и используется для формирования промежуточных продуктов, участвующих в синтезе мозаичного изображения уровня L3.

4.2.8. Завершающим инструментом контроля геометрической обработки отдельных маршрутов является средство апостериорной оценки точности геопривязки, реализуемое в составе КП оценки точности определения координат объектов (ТОКО). Оценка выполняется по множеству опорных точек, измеренных оператором или импортированных из внешних источников, и предьявляется в виде формализованного отчёта (рис. 4.6).

Координаты точек												
№	строка	пикс.	Широта (изобр.), град.мин.сек., CK WGS84	Широта (изобр.), град.мин.сек., CK WGS84	Долгота (изобр.), град.мин.сек., CK WGS84	Долгота (изобр.), град.мин.сек., CK WGS84	Широта (опорн.), град.мин.сек., CK WGS84	Широта (опорн.), град.мин.сек., CK WGS84	Долгота (опорн.), град.мин.сек., CK WGS84	Долгота (опорн.), град.мин.сек., CK WGS84	Отклонение по широте, м	Отклонение по долготе, м
01	1628.375	13462.313	26°27'19.721"с.ш.	26.45547819	43°40'39.694"в.д.	43.67769286	26°27'19.699"с.ш.	26.45547196	43°40'39.733"в.д.	43.67770353	0.693	-1.062
02	8141.000	51782.000	26°24'30.753"с.ш.	26.40854245	43°59'58.438"в.д.	43.99956598	26°24'30.690"с.ш.	26.40852500	43°59'58.470"в.д.	43.99957500	1.940	-0.898
03	57023.625	41769.125	26° 2'20.055"с.ш.	26.03890431	43°55' 8.604"в.д.	43.91905664	26° 2'19.938"с.ш.	26.03887168	43°55' 8.575"в.д.	43.91904866	3.628	0.797
04	51748.125	1456.750	26° 4'33.193"с.ш.	26.07588707	43°34'53.509"в.д.	43.58153035	26° 4'33.132"с.ш.	26.07587009	43°34'53.489"в.д.	43.58152479	1.888	0.556
05	29534.875	30326.375	26°14'45.061"с.ш.	26.24585015	43°49'16.705"в.д.	43.82130698	26°14'45.099"с.ш.	26.24586073	43°49'16.699"в.д.	43.82130538	-1.177	0.160
06	13005.000	18247.875	26°22'11.352"с.ш.	26.36982011	43°43' 7.519"в.д.	43.71875528	26°22'11.363"с.ш.	26.36982302	43°43' 7.381"в.д.	43.71871703	-0.324	3.811
07	54922.000	25643.875	26° 3'13.479"с.ш.	26.05374416	43°47' 2.648"в.д.	43.78406894	26° 3'13.428"с.ш.	26.05373008	43°47' 2.612"в.д.	43.78405892	1.566	1.001
08	36261.125	15490.125	26°11'38.285"с.ш.	26.19396805	43°41'51.365"в.д.	43.69760149	26°11'38.285"с.ш.	26.19396814	43°41'51.307"в.д.	43.69758535	-0.010	1.610
09	45946.125	41423.750	26° 7'21.056"с.ш.	26.12251564	43°54'55.380"в.д.	43.91538344	26° 7'21.009"с.ш.	26.12250253	43°54'55.410"в.д.	43.91539166	1.458	-0.821
10	41255.875	29408.000	26° 9'25.789"с.ш.	26.15716367	43°48'52.130"в.д.	43.81448064	26° 9'25.743"с.ш.	26.15715078	43°48'52.153"в.д.	43.81448704	1.434	-0.639
11	22794.625	13703.000	26°17'43.913"с.ш.	26.29553141	43°40'53.345"в.д.	43.68148482	26°17'43.976"с.ш.	26.29554896	43°40'53.360"в.д.	43.68148888	-1.951	-0.405
12	13249.250	41812.000	26°22'10.124"с.ш.	26.36947881	43°54'58.771"в.д.	43.91632528	26°22'10.130"с.ш.	26.36948053	43°54'58.743"в.д.	43.91631761	-0.192	0.764
13	25098.500	43952.500	26°16'49.002"с.ш.	26.28027822	43°56' 6.535"в.д.	43.93514874	26°16'49.000"с.ш.	26.28027789	43°56' 6.545"в.д.	43.93515139	0.037	-0.265
14	43453.750	19626.500	26° 8'23.811"с.ш.	26.13994740	43°43'58.150"в.д.	43.73281953	26° 8'23.914"с.ш.	26.13997601	43°43'58.230"в.д.	43.73284165	-3.181	-2.208
15	19173.250	32826.250	26°19'26.944"с.ш.	26.32415120	43°50'29.114"в.д.	43.84142048	26°19'27.035"с.ш.	26.32417635	43°50'29.100"в.д.	43.84141672	-2.796	0.375
16	35997.000	41575.250	26°11'51.980"с.ш.	26.19777228	43°54'57.542"в.д.	43.91598390	26°11'52.001"с.ш.	26.19777805	43°54'57.567"в.д.	43.91599084	-0.641	-0.693
17	43922.000	3832.500	26° 8' 6.802"с.ш.	26.13522268	43°36' 2.557"в.д.	43.60071026	26° 8' 6.749"с.ш.	26.13520814	43°36' 2.497"в.д.	43.60069371	1.617	1.652
18	48943.375	25866.125	26° 5'56.208"с.ш.	26.09894675	43°47' 7.696"в.д.	43.78547106	26° 5'56.329"с.ш.	26.09898025	43°47' 7.673"в.д.	43.78546486	-3.725	0.620
19	8273.375	32667.000	26°24'23.477"с.ш.	26.40652143	43°50'21.408"в.д.	43.83928003	26°24'23.410"с.ш.	26.40650275	43°50'21.396"в.д.	43.83927654	2.077	0.348
20	31752.000	11355.000	26°13'39.616"с.ш.	26.22767115	43°39'45.272"в.д.	43.66257560	26°13'39.683"с.ш.	26.22768978	43°39'45.253"в.д.	43.66257027	-2.072	0.532

Обобщенные оценки:
Среднеквадратическое отклонение по широте: 1.9543 м.
Среднеквадратическое отклонение по долготе: 1.2637 м.
СКО планового положения: 2.3273 м.

Рисунок 4.6 — Окно апостериорной точности геопривязки маршрута: таблица координатных рассогласований и обобщённые статистические оценки

Содержание отчёта включает две функционально различные части. Первая часть — таблица координатных рассогласований, в которой для каждой опорной точки приводятся растровые координаты её положения на маршруте («строка», «пикс.»), геодезические координаты, вычисленные по RPC-модели изображения («Широта (изобр.)», «Долгота (изобр.)») в представлении градус-минута-секунда и в десятичных градусах для автоматизированной обработки, эталонные геодезические координаты опорной точки («Широта (опорн.)», «Долгота (опорн.)») и их покомпонентные отклонения в метрах («Отклонение по широте», «Отклонение по долготе»). Двойное представление геодезических координат обеспечивает наглядность отчёта при ручном анализе и совместимость с автоматизированными системами оценки качества.

Вторая часть отчёта — обобщённые оценки точности геопривязки маршрута: среднеквадратическое отклонение по широте, по долготе и СКО планового положения. Указанные оценки используются как промежуточные показатели при формировании итоговой вероятностной оценки точности геопривязки в соответствии с разработанной методикой (Положение 4), требующей сбора статистики по совокупности разновременных снимков. Оператор имеет возможность экспорта таблицы координатных рассогласований и обобщённых оценок в форматах, пригодных для дальнейшего статистического анализа и формирования сводных отчётов точности геопривязки группы маршрутов.

4.2.9. Принципиальной особенностью разработанного инструментария является возможность последовательного выполнения апостериорной оценки точности дважды: до блочного уравнивания — для определения точностных характеристик исходной геопривязки по строгой модели съёмки и аппроксимирующей её унифицированной RPC-модели, и после — для подтверждения сохранения точностных характеристик после применения параметров модели поправок. Сопоставление полученных оценок позволяет оператору проверить выполнение условия $P_{90M} \leq P_{90O}$, лежащего в основе критерия определения корректности геометрической обработки материалов площадной съёмки (Положение 4), на уровне отдельных маршрутов до этапа синтеза мозаичного изображения.

4.2.10. Таким образом, представлен реализованный в составе ПК ОДПС инструментальный геометрической обработки материалов площадной съёмки, обеспечивающий выполнение и контроль обработки в автоматизированном режиме. Разработанные инструментальные средства обеспечивают: интерактивное изме-

рение опорных и одноимённых точек средствами редактора точек с поддержкой основных геодезических систем координат и систем высот, применяемых в отечественной практике дистанционного зондирования; формирование и ведение проекта блочного уравнивания с отдельной настройкой моделей поправок по строчному и кадровому направлениям; запуск процедуры блочного уравнивания по численно устойчивому алгоритму (Положение 2) с предоставлением оператору детализированного отчёта о ходе оптимизации для верификации численной устойчивости; визуализацию невязок одноимённых точек на диаграмме рассеяния для выявления систематических зависимостей, описываемых разработанной двухкомпонентной моделью поправок; параметрическое управление ортотрансформированием маршрутов в картографические проекции для перехода между уровнями обработки L1, L2A и L2B; апостериорную оценку точности геопривязки маршрутов до и после блочного уравнивания с формированием формализованных отчётов, предоставляющих оператору достаточные основания для принятия решения о допуске обработанных маршрутов к этапу синтеза мозаичного изображения.

4.3 Средства автоматизированной оценки качества мозаичных изображений

4.3.1. По завершении геометрической обработки маршрутов, описанной в разделе 4.2, выполняется синтез мозаичного изображения и оценка его качества. Автоматизированный режим ПК ОДПС предоставляет оператору инструментарий, обеспечивающий: ручную коррекцию линии пореза; анализ её дефектов в соответствии с разработанным алгоритмом (Положение 4, критерий 1); апостериорную оценку точности геопривязки мозаичного изображения с формированием отчётов по разработанной методике (Положение 4, критерий 2). В рамках настоящего раздела решаются следующие задачи:

- 1) обосновать состав и функциональное назначение инструментальных средств, обеспечивающих формирование мозаичного изображения по ортотрансформированным маршрутам, проведение линии пореза и её локальную коррекцию оператором;
- 2) представить инструментальные средства экспертной настройки параметров меры насыщения границы, разработанной в рамках Положения 4,

выносимого на защиту, и автоматизированной оценки качества линии пореза мозаичного изображения;

- 3) описать организационно-программные средства накопления статистики для апостериорной оценки точности геопривязки мозаичных изображений в соответствии с разработанной методикой (Положение 4).

4.3.2. Управление процедурой формирования мозаичного изображения осуществляется средствами КП редактора проекта мозаичного изображения (РПМИ). Проект мозаичного изображения представляет собой совокупность ортотрансформированных изображений-фрагментов, масок, а также набор параметров, включающий порядок наложения, настройки визуализации и радиометрического выравнивания. Рабочее окно ПК ОДПС при работе с проектом мозаичного изображения приведено на рис. 4.7.

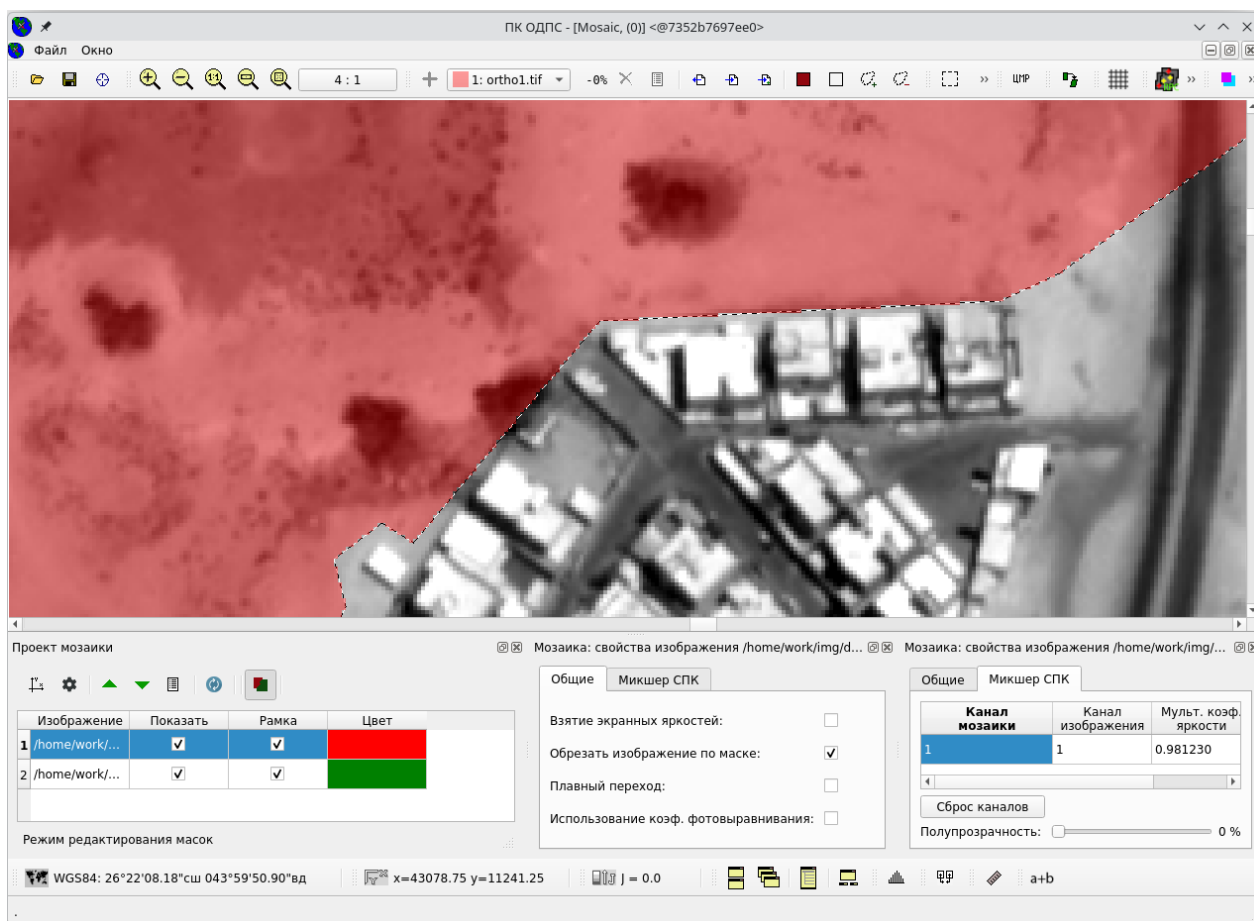


Рисунок 4.7 — Главное окно ПК ОДПС в режиме редактирования проекта мозаичного изображения: окно просмотра мозаики, закрепляемая панель «Проект мозаики» и окна свойств фрагментов мозаики

4.3.3. Закрепляемая панель «Проект мозаики» содержит таблицу фрагментов проекта, в которой для каждого ортотрансформированного маршрута

отображаются: путь к файлу изображения, признак отображения фрагмента в окне просмотра мозаики, признак отображения границ маски фрагмента и подписи пути к файлу, а также цвет границы маски, используемый при визуализации. В примере на рис. 4.7 проект содержит два фрагмента с красной и зелёной цветовой маркировкой границ масок соответственно. При активном режиме редактирования масок, индицируемом строкой состояния панели, фрагменты отображаются с полупрозрачной заливкой цветом маски. Это обеспечивает оператору возможность визуальной идентификации принадлежности пикселей мозаики к исходным маршрутам.

Запуск автоматического проведения линии пореза в соответствии с разработанным модифицированным алгоритмом (Положение 3) осуществляется с панели инструментов проекта мозаики. Результат проведения линии пореза представляется в виде обновлённых масок фрагментов мозаичного изображения, а сама линия пореза соответствует границе указанных масок. Оператор имеет возможность интерактивной коррекции линии пореза в областях, где автоматический алгоритм по результатам оценки качества или визуального анализа признан недостаточно эффективным; коррекция выполняется редактированием масок фрагментов средствами КП выделения регионов (ВР) с использованием операций добавления и удаления выделенной области из маски, заполнения и очистки маски по всему фрагменту. Подобная организация позволяет комбинировать автоматическое и ручное проведение линии пореза, что существенно повышает производительность работы оператора с мозаичными изображениями высокого пространственного разрешения, в которых остаточные геометрические рассогласования в отдельных областях не могут быть устранены автоматически.

4.3.4. Свойства каждого фрагмента мозаичного изображения отображаются в отдельных закрепляемых панелях «Мозаика: свойства изображения» с двумя вкладками: «Общие» и «Микшер спектральных каналов». Вкладка «Общие» содержит параметры формирования фрагмента в мозаичном изображении: признак обрезки изображения по маске фрагмента, активирующий применение маски при формировании выходного растра; признак плавного перехода между фрагментами, реализующий полупрозрачный переход на основе нормализованного евклидова расстояния до границы маски, описанный в главе 3 и снижающий визуальный эффект остаточных искажений в области линии пореза; признак использования коэффициентов фотовыравнивания, активирующий радиометрическую коррекцию фрагмента по параметрам, найденным в результате согласования

яркостей фрагментов в зоне их перекрытия. Вкладка «Микшер спектральных каналов» содержит таблицу соответствия каналов мозаичного изображения каналам исходного фрагмента, а также коэффициенты фотовыравнивания яркости для каждого канала, применяемые при переносе фрагмента в мозаику. Совместное применение коэффициентов фотовыравнивания и полупрозрачного перехода в окрестности линии пореза обеспечивает формирование радиометрически бесшовного мозаичного изображения, соответствующего требованиям нормативных документов на информационные продукты уровня обработки L3.

4.3.5. Панель определения насыщения границы (рис. 4.8) включает инструменты оператора для осуществления экспертной настройки соответствующих параметров.

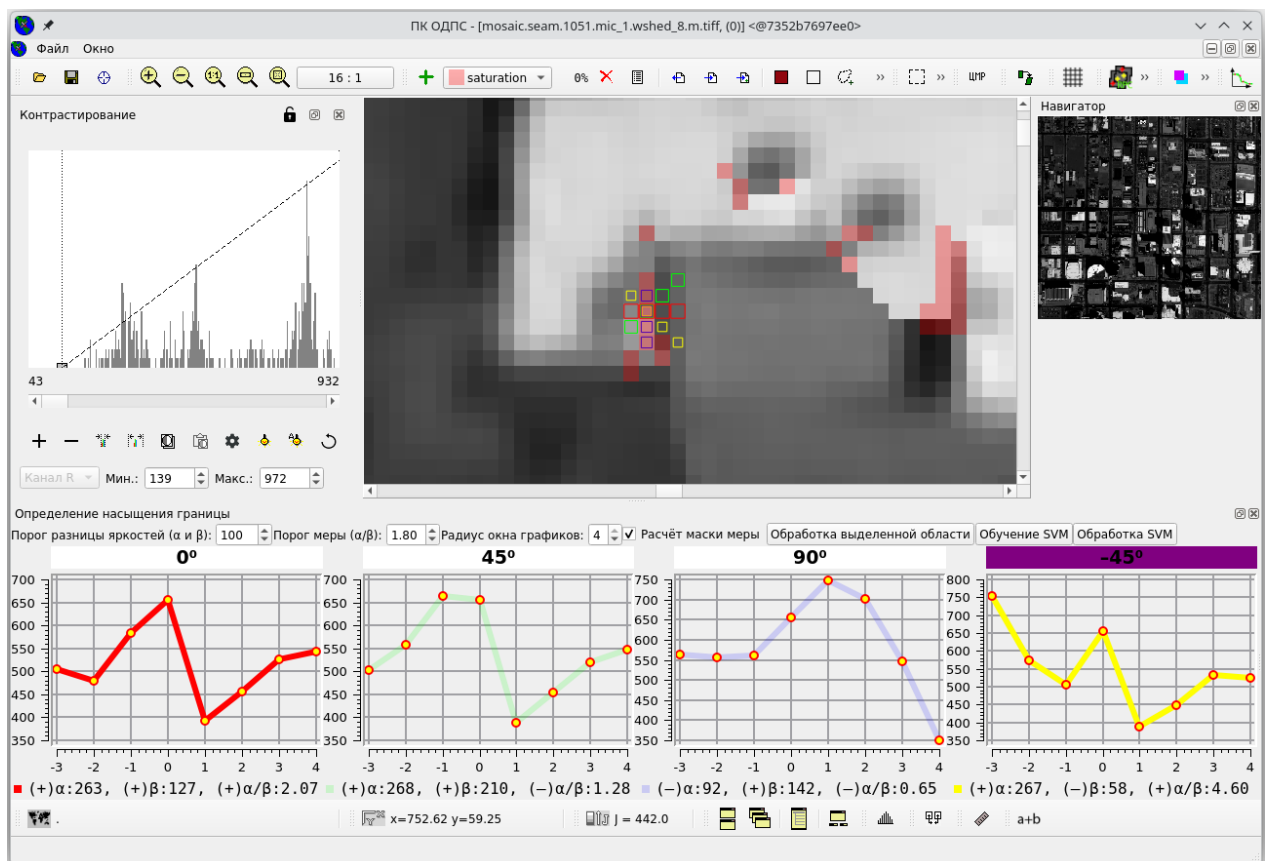


Рисунок 4.8 — Главное окно ПК ОДПС с активной панелью определения насыщения границы: распределения яркостей в окрестности выбранного пикселя по четырём асимметричным направлениям и рассчитанные компоненты вектора признаков

Панель содержит элементы управления параметрами меры насыщения границы и рабочую область с четырьмя графиками распределения яркостей по направлениям асимметричных фильтров. К настраиваемым параметрам относятся:

порог разницы яркостей α и β , определяющий минимальное изменение яркости в окрестности анализируемого пикселя для признания наличия перепада (в примере — 100 ед. яркости); порог отношения мер α/β , определяющий асимметрию перепада яркости, при которой граница признаётся насыщенной (в примере — 1,80); радиус окна графиков, определяющий длину окна анализа по каждому направлению (в примере — 4 пикселя в каждую сторону).

Каждый из четырёх графиков соответствует одному из направлений асимметричного фильтра и отображает распределение яркости вдоль соответствующей оси в окрестности выбранного оператором пикселя. Графики ориентированы таким образом, что центральный отсчёт совпадает с положением выбранного пикселя, а отсчёты со знаком «−» соответствуют одному полуокну, со знаком «+» — противоположному. Под каждым графиком выводятся рассчитанные значения компонент вектора признаков ψ . Совместно по четырём направлениям формируются 12 компонент вектора ψ , используемых в качестве признакового описания границы при обучении одноклассового классификатора ОС-SVM, реализующего обнаружение дефектных границ в рамках разработанного алгоритма оценки качества линии пореза.

4.3.6. Панель обеспечивает инструментальную поддержку полного цикла экспертной настройки. Оператор имеет возможность последовательно указать на мозаичном изображении пиксели, заведомо относящиеся к дефектным участкам линии пореза или к естественным границам объектов; для каждого указанного пикселя по текущим параметрам меры рассчитываются и отображаются графики и компоненты вектора ψ . Анализируя различия в отклике по четырём направлениям, оператор уточняет значения порогов и радиуса окна графиков таким образом, чтобы для естественных границ объектов значение хотя бы одной из компонент α/β оставалось ниже порогового, а для дефектных границ — превышало его; тем самым обеспечивается селективность меры насыщения границы по отношению к различным типам перепадов яркости. Зафиксированные параметры сохраняются в файле конфигурации программного комплекса и используются при автоматизированной оценке качества линии пореза.

Применение меры насыщения границы реализуется кнопками «Расчёт маски меры», «Обучение SVM» и «Обработка SVM». Кнопка «Расчёт маски меры» запускает расчёт растровой бинарной маски дефектных границ $Q^T(x_j, y_j)$ в соответствии с формулой (3.19) главы 3, причём для снижения вычислительных затрат при интерактивной настройке предусмотрен режим обработки выделен-

ной оператором области изображения. Результат расчёта маски визуализируется на мозаичном изображении наложением полупрозрачной окраски на пиксели, отнесённые к дефектным границам, что позволяет оператору непосредственно оценить полноту обнаружения дефектов и отсутствие ложных срабатываний на естественных границах. Кнопка «Обучение SVM» запускает обучение одноклассового классификатора ОС-SVM на совокупности векторов признаков ψ , накопленной по указанным оператором пикселям; кнопка «Обработка SVM» — применение обученного классификатора к мозаичному изображению или его выделенному фрагменту с формированием итоговой маски дефектных границ.

В совокупности описанные функциональные возможности обеспечивают полный цикл экспертной настройки и применения алгоритма оценки качества линии пореза, разработанного в рамках Положения 4, выносимого на защиту, а также практическую реализацию интегрального критерия качества Υ .

4.3.7. Завершающим средством автоматизированной оценки качества мозаичных изображений является инструментарий оценки точности их геопривязки, реализующий разработанную методику (Положение 4) и функционирующий на основе тех же средств КИ оценки точности определения координат объектов (ТОКО), которые описаны в разделе 4.2 применительно к отдельным маршрутам. Принципиальной особенностью применения указанных средств к мозаичным изображениям является необходимость накопления статистики по совокупности разновременных снимков объёмом не менее 15 единиц, требуемой для обеспечения статистической достоверности проверки гипотез о параметрах распределения координатных ошибок.

4.3.8. Для реализации указанной особенности в составе инструментальных средств ПК ОДПС предусмотрено ведение файловой базы данных результатов оценки точности, организованной в виде структурированного хранилища отчётов по отдельным снимкам и их сводных представлений. База данных содержит два функционально различных раздела: раздел одиночных снимков уровня L2B, в котором накапливаются результаты апостериорной оценки точности геопривязки маршрутов, входящих в состав сформированных мозаичных изображений; раздел мозаичных изображений уровня L3, в который заносятся результаты оценки точности по итоговым мозаикам. Каждая запись базы данных включает идентификатор снимка, дату съёмки, координатные рассогласования в опорных точках, обобщённые статистические показатели по отдельному снимку (средние

и среднеквадратические отклонения по широте, долготе, плановому положению), а также метаданные об опорном полигоне, по которому выполнена оценка.

По мере поступления новых снимков оператор пополняет базу данных результатами оценки, рассчитанными средствами, описанными в разделе 4.2. При достижении объёма выборки, достаточного для статистического анализа, оператор запускает процедуру формирования сводной оценки, в ходе которой выполняются: отбраковка грубых ошибок по критерию Граббса; оценка уровня внутрикадровых искажений по среднеквадратическим отклонениям ошибок в пределах каждого снимка; формирование обобщённых оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений по совокупности разновременных снимков; проверка статистических гипотез о равенстве нулю математических ожиданий по критерию Стьюдента и равенстве дисперсий по критерию Фишера; вычисление итоговой вероятностной оценки точности — CE_{90} при выполнении условий параметрической модели либо непараметрического процентиля P_{90} в общем случае. Результаты сводной оценки формируются отдельно для раздела одиночных снимков (P_{90O}) и раздела мозаичных изображений (P_{90M}), после чего автоматически проверяется условие $P_{90M} \leq P_{90O}$, лежащее в основе критерия определения корректности геометрической обработки материалов площадной съёмки (Положение 4).

Подобная организация базы данных обеспечивает накопление статистики по мере штатного функционирования наземного комплекса обработки данных и позволяет получать обновляемые в процессе эксплуатации вероятностные оценки точности геопривязки информационных продуктов уровней L2B и L3, формируемых из материалов площадной съёмки от отечественных высокодетальных КА ДЗЗ.

4.3.9. Таким образом, представлены инструментальные средства автоматизированной оценки качества мозаичных изображений, реализованные в составе ПК ОДПС и обеспечивающие практическое применение алгоритмов и методик, разработанных в рамках Положений 3 и 4, выносимых на защиту. Разработанные средства обеспечивают: формирование проекта мозаичного изображения по ортотрансформированным маршрутам с автоматическим проведением линии пореза модифицированным алгоритмом (Положение 3) и возможностью интерактивной коррекции масок фрагментов оператором; радиометрическое выравнивание фрагментов средствами фотовыравнивания и микшера спектральных каналов, обеспечивающее радиометрическую бесшовность мозаичного изображения; экс-

пертную настройку параметров меры насыщения границы и автоматизированную оценку качества линии пореза с использованием одноклассового классификатора ОС-SVM, реализующего критерий обнаружения дефектных границ (Положение 4); ведение файловой базы данных результатов оценки точности геопривязки одиночных и мозаичных снимков с автоматическим формированием сводных вероятностных оценок и проверкой выполнения условия сохранения точностных характеристик геопривязки при синтезе мозаичного изображения.

4.4 Результаты экспериментальной апробации

4.4.1. Разработанные в главах 2 и 3 алгоритмы реализованы в составе ПК ОДПС, описанного в разделах 4.1–4.3. Настоящий раздел посвящён проверке работоспособности полученных решений на натурных данных от КА серии «Ресурс» и модельных данных перспективных КА, а также получению количественных оценок качества синтеза мозаичных изображений на каждом этапе разработанной технологии. В рамках настоящего раздела решаются следующие задачи:

- 1) представить характеристики исходных материалов площадной съёмки, выбранных для экспериментальной апробации, и обосновать достаточность выбранной выборки для демонстрации работоспособности разработанной технологии;
- 2) привести количественные результаты выполнения каждого этапа разработанной технологии формирования мозаичных изображений, включая аппроксимацию строгой модели RPC-моделью, поиск одноимённых точек, блочное уравнивание и ортотрансформирование;
- 3) представить результаты синтеза мозаичных изображений и их оценки качества по критериям, разработанным в рамках Положения 4, выносимого на защиту;
- 4) подтвердить корректность применённого математического и алгоритмического аппарата по совокупности полученных количественных и качественных результатов.

4.4.2. Для экспериментальной апробации привлечены две пары панхроматических маршрутов площадной съёмки от отечественных КА серии «Ресурс»,

полученных аппаратурой «Геотон» (пара № 1 — от КА «Ресурс-П» № 1, пара № 2 — от КА «Ресурс-П» № 5), а также 20 пар маршрутов, смоделированных на основе материалов стереосъёмки, и модельные данные перспективных КА. Натурные пары соответствуют территориям с различным характером подстилающей поверхности и получены различными экземплярами аппаратуры, что обеспечивает проверку работоспособности алгоритмов на различающихся условиях съёмки и демонстрирует независимость предложенных решений от конкретного КА. Ниже рассматриваются результаты обработки натуральных маршрутов; количественные оценки на смоделированных и модельных данных согласуются с представленными результатами. Основные характеристики натуральных материалов приведены в таблице 9.

Таблица 9 — Характеристики исходных материалов площадной съёмки

Характеристика	Пара № 1	Пара № 2
КА	«Ресурс-П» № 1	«Ресурс-П» № 5
Объём маршрутов уровня L1, ГБ	4,4 и 4,5	8,2 и 8,5
Объём маршрутов уровня L2A, ГБ	5,2 и 5,2	12 и 12
Точность геопривязки одиночных маршрутов (СКО планового положения), м	2,33 и 2,86	8,96 и 6,81

4.4.3. В пределах каждой натурной пары число одноимённых точек в области пересечения маршрутов составляет порядка 10^3 , число опорных точек для апостериорной оценки точности геопривязки — порядка 10, что достаточно для статистически достоверной оценки средних и дисперсий координатных рассогласований. Привлечение цифровой модели рельефа обеспечивает дополнительную проверку алгоритмов на различных значениях высоты рельефа в пределах региона съёмки. Полноценная вероятностная оценка точности геопривязки по разработанной методике (Положение 4) требует выборки не менее 15 разновременных снимков и выполняется в процессе штатной эксплуатации наземного комплекса обработки; в настоящем разделе приводится сокращённая оценка по имеющимся парам.

4.4.4. Для маршрутов уровня обработки L1 выполнен расчёт коэффициентов унифицированной RPC-модели в соответствии с алгоритмом, разработанным в разделе 2.1. Усреднённое по двум парам маршрутов значение среднеквадратической ошибки аппроксимации $\sigma_k^{(m,n)}$ составило 2,0344 пикс., что не обеспечивает

требуемой точности аппроксимации вследствие высокочастотных геометрических искажений, вызванных угловым движением КА в режиме площадной съёмки и не описываемых унифицированной RPC-моделью. На основании указанной оценки принято решение о переходе к уровню обработки L2A посредством ортотрансформирования на среднюю высоту с последующим пересчётом коэффициентов RPC-модели для трансформированных изображений. Усреднённое значение $\sigma_k^{(m,n)}$ для маршрутов уровня L2A составило 0,0068 пикс., что подтверждает достаточную точность аппроксимации для последующих процедур обработки.

Для каждой пары маршрутов выполнен поиск одноимённых точек в областях пересечения с применением трёхэтапного алгоритма фильтрации, разработанного в рамках Положения 1, выносимого на защиту. Время поиска одноимённых точек, предварительное сопоставление методом FANN в пространстве признаков SIFT и последующую фильтрацию с использованием гибридной интеллектуальной технологии классификации данных, не превысило 1 минуты для каждой пары маршрутов. Доля бракованных одноимённых точек в сформированном множестве не превысила 2 %, в то время как известный подход на основе алгоритма RANSAC обеспечивает соответствующие значения 16 % для пары № 1 и 30 % для пары № 2, что подтверждает практическую эффективность разработанного алгоритма фильтрации одноимённых точек в условиях площадной съёмки.

По найденным множествам одноимённых точек выполнено блочное уравнение маршрутов численно устойчивым алгоритмом, разработанным в рамках Положения 2, выносимого на защиту, с применением разреженной модификации алгоритма Левенберга-Марквардта на втором этапе оптимизации. В соответствии с постановкой задачи апробации опорные точки не использовались, что соответствует автоматическому режиму функционирования наземного комплекса обработки и подтверждает работоспособность алгоритма в условиях отсутствия опорной информации. Применённая модель поправок — двухкомпонентная: аффинная составляющая с независимыми коэффициентами в строчном и кадровом направлениях и составляющая устранения остаточных невязок по методу резинового листа (rs), задаваемая в общих настройках проекта блочного уравнения. С целью обеспечения численной устойчивости и ограничения области поиска решения в отсутствие опорной информации использованы виртуальные опорные точки, формируемые по разработанному алгоритму.

Время выполнения процедуры блочного уравнивания с привлечением цифровой модели рельефа составило около 20 секунд для каждой пары маршрутов. Среднеквадратическая ошибка совмещения в одноимённых точках после уравнивания составила 0,65 пикс. для пары № 1 и 0,38 пикс. для пары № 2, что соответствует субпиксельной точности совмещения и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к исходным данным для синтеза мозаичных изображений уровня обработки L3.

По уточнённым моделям геопривязки выполнено ортотрансформирование маршрутов в единую картографическую проекцию UTM с привлечением цифровой модели рельефа. Параметры ортотрансформирования заданы таким образом, чтобы обеспечить согласование сеток отсчётов выходных изображений и минимизацию числа передискретизаций в соответствии с принципом, изложенным в разделе 3.1. Применено радиометрическое выравнивание яркостей фрагментов средствами фотовыравнивания, обеспечивающее радиометрическую однородность последующего мозаичного изображения. Время ортотрансформирования обоих маршрутов составило 1,5 минуты.

4.4.5. Для каждой пары пересекающихся ортотрансформированных маршрутов выполнено построение карт диспаратности в системе координат эпиполярно выпрямленных изображений, используемых при формировании входных данных для свёрточной нейронной сети, формирующей маску рассогласований в соответствии с разработанным модифицированным алгоритмом проведения линии пореза (Положение 3). Время построения карт диспаратности составило 15 минут на пару маршрутов при использовании графического ускорителя NVIDIA GeForce RTX 4070 для выполнения нейронной сети.

Линия пореза мозаичного изображения сформирована автоматически разработанным модифицированным алгоритмом (Положение 3). Программная реализация комбинированной стоимостной функции на основе морфологического градиента и маски рассогласований с последующей маркированной сегментацией по алгоритму водораздела выполнена на языке программирования C++ и обеспечивает производительность 3,065 млн пикс./с. Указанная производительность подтверждает применимость разработанного алгоритма для оперативной обработки материалов площадной съёмки в составе наземного комплекса обработки данных ДЗЗ.

По найденным линиям пореза и маскам фрагментов синтезированы мозаичные изображения уровня обработки L3 для каждой пары маршрутов. Общий вид

сформированных мозаичных изображений приведён на рис. 4.9 и 4.10, где заливкой обозначена область одного из фрагментов мозаики, ограничиваемая линией пореза, что позволяет визуально оценить взаимное расположение маршрутов в составе мозаичного изображения.

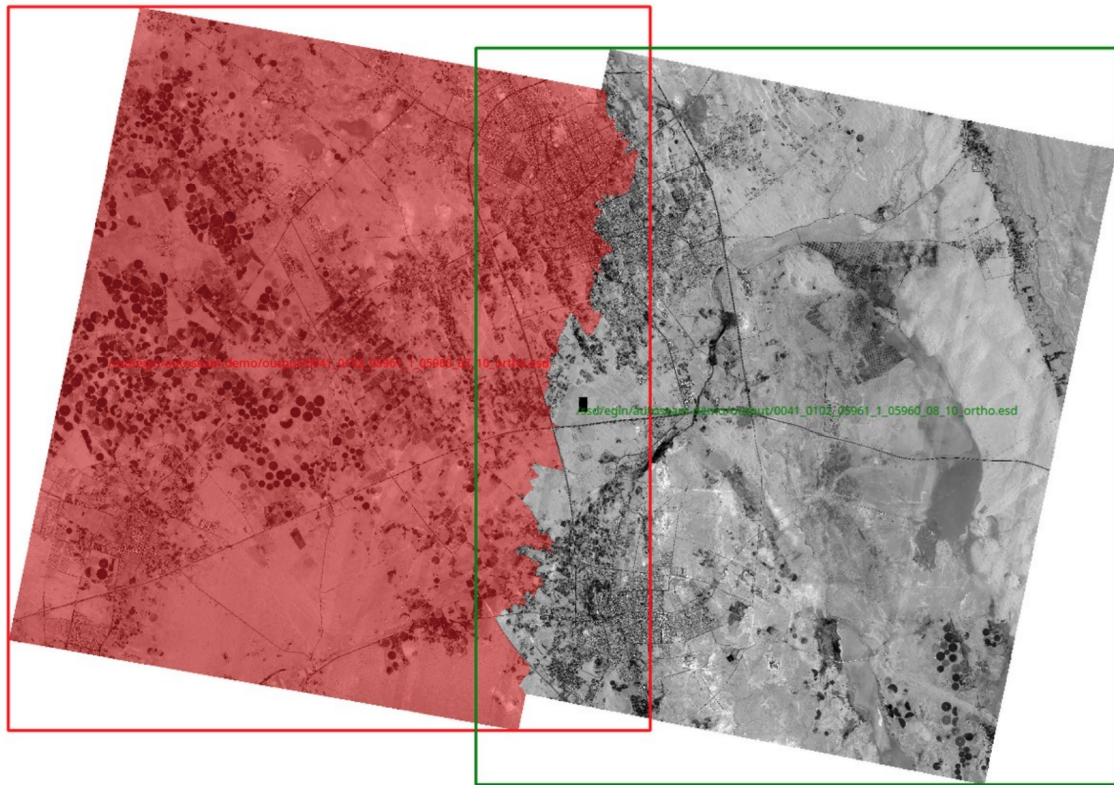


Рисунок 4.9 — Общий вид мозаичного изображения, синтезированного по паре маршрутов № 1; заливкой обозначена область одного из фрагментов мозаики, ограничиваемая линией пореза

Детализированное представление характерных областей мозаичных изображений в окрестности линии пореза приведено на рис. 4.10. Укрупнённые фрагменты, выделенные на общих видах мозаик и отображённые в отдельных областях иллюстрации, демонстрируют корректность обхода линией пореза высотных зданий и эстакад, что подтверждает практическую применимость разработанного модифицированного алгоритма (Положение 3) при синтезе мозаичных изображений на территории с плотной городской застройкой.

Для синтезированных мозаичных изображений выполнена автоматизированная оценка качества линии пореза в соответствии с алгоритмом, разработанным в рамках Положения 4, выносимого на защиту. По совокупности обработанных пикселей линии пореза в обоих парах маршрутов доля дефектных границ составила около 5 % от общей длины линии пореза, что соответствует значению интегрального критерия качества $\Upsilon \approx 0,95$. Анализ распределения

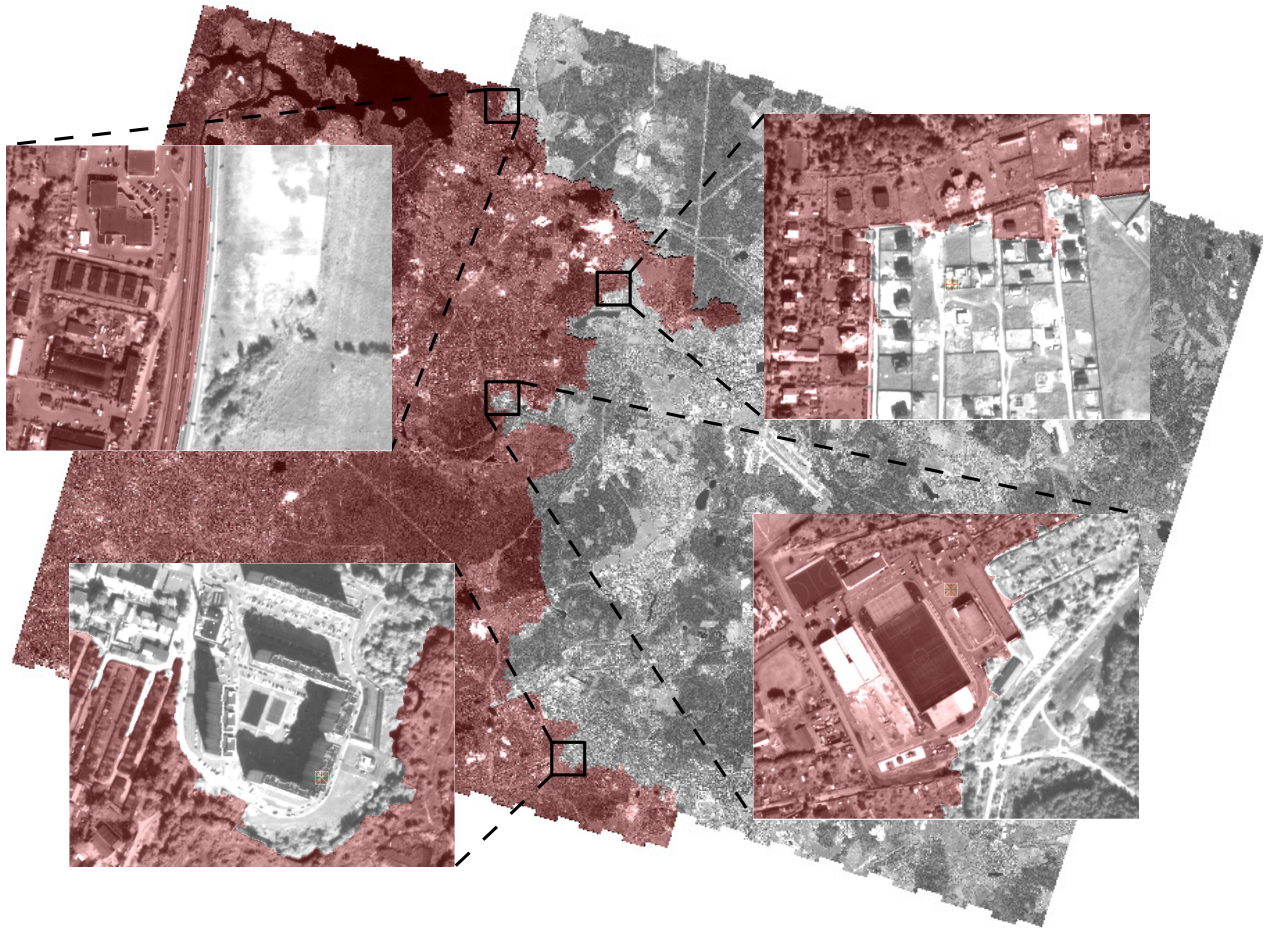


Рисунок 4.10 — Детализированное представление характерных областей мозаичных изображений в окрестности линии пореза: обход высотных объектов и эстакад

дефектов по двум используемым критериям показал, что подавляющее большинство выявленных дефектов (порядка 99,99 % от общего числа) приходится на срабатывание критерия меры насыщения границы, тогда как структурные искажения, выявляемые критерием структурного сходства SSIM, составляют около 0,01 %. Указанное распределение свидетельствует о преобладании в остаточных дефектах радиометрических перепадов яркости над структурными искажениями сюжета, что соответствует физической природе ограничений алгоритма проведения линии пореза при значительно различающихся углах визирования.

Выполнена также проверка корректности геометрической обработки в соответствии с критерием (Положение 4). Поскольку объём выборки разновременных снимков из двух пар маршрутов недостаточен для полноценного применения методики (требуется не менее 15 снимков), оценка выполнена в сокращённом объёме — сопоставлением среднеквадратических отклонений координатных

рассогласований в опорных точках для одиночных маршрутов уровня L2B и синтезированных мозаичных изображений уровня L3. Установлено, что СКО для мозаичных изображений не превышают соответствующих значений для входящих в их состав одиночных маршрутов, что подтверждает сохранение точностных характеристик геопривязки при синтезе по разработанной технологии.

4.4.6. Таким образом, выполнена экспериментальная апробация разработанного математического и алгоритмического обеспечения на натуральных данных от КА серии «Ресурс» и смоделированных данных; дополнительная апробация на смоделированных из стереопар маршрутах и модельных данных перспективных КА подтверждает согласованность получаемых результатов. Полноценная вероятностная оценка точности геопривязки по методике Положения 4 выполняется в процессе штатной эксплуатации наземного комплекса при накоплении требуемой выборки.

Полученные количественные результаты подтверждают практическую работоспособность и эффективность разработанного обеспечения. Трёхэтапный алгоритм фильтрации одноимённых точек (Положение 1) обеспечивает долю бракованных точек на уровне 2 % при соответствующих значениях 16 % и 30 % для подхода на основе RANSAC. Численно устойчивый алгоритм блочного уравнивания (Положение 2) в отсутствие опорной информации обеспечивает субпиксельную точность совмещения за время порядка 20 секунд. Модифицированный алгоритм проведения линии пореза (Положение 3) обеспечивает обход высотных объектов при производительности 3,065 млн пикс./с. Алгоритм оценки качества и критерий корректности геометрической обработки (Положение 4) подтверждают автоматизированное обнаружение дефектных границ и сохранение точностных характеристик геопривязки при синтезе мозаичных изображений. По совокупности результатов подтверждается корректность применённого аппарата и возможность его использования в составе наземных комплексов обработки данных от отечественных высокодетальных КС ДЗЗ.

Выводы по главе 4

1. В настоящей главе решена задача практической реализации разработанных в главах 2 и 3 математических и алгоритмических решений в виде

специального программного обеспечения, а также выполнена его апробация на натуральных данных от высокодетальных КА ДЗЗ.

2. Обоснована структура программного комплекса обработки данных площадной съёмки (ПК ОДПС), реализованного на базе платформы «Er-Set» в виде трёхслойной архитектуры монолитного программного обеспечения, включающей слой представления, слой предметной логики и слой источника данных. Предложенная структура обеспечивает выполнение обработки как в полностью автоматическом режиме в составе многосерверных центров обработки данных ДЗЗ, так и в автоматизированном режиме с возможностью контроля оператором наиболее значимых этапов. Разработана схема взаимодействия компонентов программных средств, представляющая собой единый последовательный конвейер, идентичный для обоих режимов, и предусматривающая декомпозицию вычислительного процесса на совокупность независимых этапов с поддержкой распределённого многосерверного исполнения.

3. Разработан комплекс инструментальных средств автоматизированного режима, обеспечивающих выполнение и контроль геометрической обработки материалов площадной съёмки, включая: средства интерактивного измерения опорных и одноимённых точек; редактор проекта блочного уравнивания с отдельной настройкой моделей поправок и визуализацией невязок; средства управления ортотрансформированием в картографические проекции; средства апостериорной оценки точности геопривязки отдельных маршрутов. Разработаны средства автоматизированной оценки качества мозаичных изображений, включающие: редактор проекта мозаичного изображения с автоматическим проведением и ручной коррекцией линии пореза; панель экспертной настройки параметров меры насыщения границы и автоматизированной оценки качества линии пореза; средства ведения файловой базы данных результатов оценки точности геопривязки для накопления статистики в процессе штатной эксплуатации наземного комплекса обработки.

4. Выполнена экспериментальная апробация разработанного программного обеспечения на натуральных данных от КА серии «Ресурс», представленных двумя парами панхроматических маршрутов площадной съёмки, соответствующих различающимся натурным условиям и получаемых различными экземплярами аппаратуры. Дополнительная апробация на маршрутах, смоделированных из стереопар, и модельных данных перспективных КА подтверждает согласованность получаемых результатов. Полученные количественные результаты

подтверждают практическую работоспособность и эффективность всех разработанных алгоритмов, реализованных в рамках Положений 1–4, выносимых на защиту: обеспечивается доля бракованных одноимённых точек на уровне 2 %, субпиксельная точность совмещения маршрутов в условиях отсутствия опорной информации, корректный обход линией пореза высотных объектов и эстакад при производительности 3,065 млн пикс./с, автоматизированное обнаружение дефектных границ, а также сохранение точностных характеристик геопривязки при синтезе мозаичных изображений. Полноценная вероятностная оценка точности геопривязки по разработанной методике (Положение 4) выполняется в процессе штатной эксплуатации наземного комплекса при накоплении выборки требуемого объёма.

5. Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанного специального программного обеспечения в составе наземных комплексов приёма, обработки и распространения данных от отечественных высокодетальных КА серии «Ресурс» и «Аист», а также перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

6. Материалы главы опубликованы в работах [84; 161; 195; 199]. Разработаны программы для ЭВМ [153; 165].

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 натуральных 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. Достига-

ется унификация обработки данных от разных видов отечественных космических аппаратов.

В заключение автор выражает благодарность руководству и коллегам НИИ «Фотон» РГРТУ за поддержку, а также Преснякову О. А., Пошехонову В. И. и Князькову П. А. — за ценные обсуждения и обмен профессиональным опытом в ходе исследования. Особую признательность автор выражает Демидовой Л. А. за рекомендации и совместные исследования в области искусственного интеллекта, а также научному руководителю Кузнецову А. Е. — за руководство диссертационным исследованием и поддержку при выполнении работы.

Список сокращений и условных обозначений

CE	Circular Error, круговая ошибка
EM	Expectation-Maximization, ожидание-максимизация
FANN	Fast Approximate Nearest Neighbor, быстрый приближённый метод ближайших соседей
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, генетический алгоритм недоминируемой сортировки
RANSAC	RANdOm SAMple Consensus, консенсус на случайной выборке
RPC	Rational Polynomial Coefficient, коэффициенты рациональных полиномов
SIFT	Scale Invariant Feature Transform, инвариантное к масштабу преобразование признаков
SSIM	Structure SIMilarity, индекс структурного сходства
SVM	Support Vector Machine, метод опорных векторов
WGS 84	World Geodetic System 1984, всемирная система геодезических параметров Земли 1984
ВОТ	виртуальная опорная точка
ГА	генетический алгоритм
ГИТКД	гибридная интеллектуальная технология классификации данных
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
КА	космический аппарат
КП	компонент программный
КС	космическая система
КШМСА	комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры
KoSVM	классификатор на основе SVM
КоМОП	классификатор на основе метода окна Парзена
НКПОР	наземный комплекс приёма, обработки и распространения
ОИТ	одноимённая точка
ОТ	опорная точка
ПЗС	прибор с зарядовой связью
ПК ОДПС	программный комплекс обработки данных площадной съёмки
СКО	среднеквадратическое отклонение
ЦМР	цифровая модель рельефа

Список литературы

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли [Текст] / С. В. Антонушкина [и др.] ; под ред. В. В. Еремеева. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
2. Технологии анализа и оценки качества космических изображений [Текст] / В. В. Еремеев [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2010. — № 3. — С. 37—43.
3. Технология потоковой обработки данных ДЗЗ высокого разрешения [Текст] / В. В. Еремеев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 1. — С. 11—18.
4. *Злобин, В. К.* Обработка аэрокосмических изображений [Текст] / В. К. Злобин, В. В. Еремеев. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
5. *Кузнецов, А. Е.* Организация процесса формирования мозаичных изображений земной поверхности [Текст] / А. Е. Кузнецов, О. А. Пресняков // Цифровая обработка сигналов. — 2011. — Т. 3. — С. 47—52.
6. Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» [Текст] / А. Е. Кузнецов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — Т. 11, № 1. — С. 287—300.
7. *Кузнецов, А. Е.* Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА «Landsat-8» [Текст] / А. Е. Кузнецов, В. И. Пошехонов, А. С. Рыжиков // Цифровая обработка сигналов. — 2015. — № 3. — С. 37—42.
8. *Кашницкий, А. В.* Технология создания безоблачных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 [Текст] / А. В. Кашницкий, М. А. Бурцев, А. А. Прошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19, № 5. — С. 76—85.
9. *Плотников, Д. Е.* Автоматический метод субпиксельной географической привязки спутниковых изображений КМСС-М на основе анализируемого эталона низкого пространственного разрешения [Текст] / Д. Е. Плотников, П. А. Колбудаев, Е. А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 46, № 5. — С. 818—827.
10. Потоковая технология корреляционной географической привязки спутниковых изображений высокого пространственного разрешения [Текст] / В. А. Егоров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7, № 4. — С. 97—103.
11. Построение систем, обеспечивающих динамическое формирование комплексных информационных продуктов на основе данных дистанционного зонди-

рования [Текст] / И. В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2009. — Т. 6, № 2. — С. 513—520.

12. Автоматическая обработка данных космической съёмки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ [Текст] / Д. И. Федоткин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2024. — Т. 21, № 3. — С. 9—30.

13. ЕТРИС ДЗЗ — современные решения в развитии отечественной наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли из космоса [Текст] / В. В. Ромашкин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 3. — С. 220—227.

14. Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ [Текст] / А. Н. Марков [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2020. — Т. 7, № 1. — С. 72—83.

15. Технология создания бесшовного сплошного покрытия территории России по данным космических аппаратов «Канопус-В» [Текст] / А. Н. Марков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2024. — Т. 21, № 5. — С. 97—115.

16. Особенности технологий онлайн предоставления мозаичных сплошных покрытий российских КА ДЗЗ [Текст] / А. И. Васильев [и др.] // Информация и Космос. — 2024. — № 2. — С. 132—140.

17. Mosaicking Copernicus Sentinel-1 Data at Global Scale [Text] / V. Syrris [et al.] // IEEE Transactions on Big Data. — 2018. — P. 1—1.

18. *Bielski, C.* Order Independent Image Compositing [Text] / C. Bielski, P. Soille // Image Analysis and Processing – ICIAP 2005. — Springer Berlin Heidelberg, 2005. — P. 1076—1083.

19. Remote Sensing Image Mosaicking: Achievements and Challenges [Text] / X. Li [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. — 2019. — Vol. 7, no. 4. — P. 8—22.

20. *Ma, Y.* In-Memory Distributed Mosaicking for Large-Scale Remote Sensing Applications with Geo-Gridded Data Staging on Alluxio [Text] / Y. Ma, J. Song, Z. Zhang // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14, no. 23.

21. Организация высокоточной геодезической привязки изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» [Текст] / Р. Н. Ахметов [и др.] // Исследование Земли из космоса. — 2017. — № 1. — С. 46—55.

22. Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА «Ресурс-П» [Текст] / Р. Н. Ахметов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2020. — Т. 17, № 3. — С. 41—47.

23. Научный подход к повышению точности геодезической привязки изображений от космических аппаратов высокодетальной оптико-электронной съёмки Земли [Текст] / Р. Н. Ахметов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 1. — С. 43—52.

24. *Кузнецов, А. Е.* Организация геометрической калибровки съёмочных систем ДЗЗ [Текст] / А. Е. Кузнецов, В. И. Пошехонов // Цифровая обработка сигналов. — 2021. — № 4. — С. 63—66.

25. *Tao, C.* A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [Text] / C. Tao, Y. Hu // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. — 2001. — Dec. — Vol. 67, no. 12. — P. 1347—1357.

26. *Fraser, C.* Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery [Text] / C. Fraser, H. Hanley // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. — 2005. — Aug. — Vol. 71. — P. 909—915.

27. A Strip Adjustment Approach for Precise Georeferencing of ALOS Optical Imagery [Text] / F. Rottensteiner [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2009. — Vol. 47, no. 12. — P. 4083—4091.

28. PLEIADES-HR 1A&1B image quality commissioning: innovative geometric calibration methods and results [Text] / D. Greslou [et al.] // Earth Observing Systems XVIII. Vol. 8866 / ed. by J. J. Butler, X. Xiong, X. Gu. — SPIE, 09/2013. — P. 886611.

29. *Lowe, D. G.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [Text] / D. G. Lowe // International Journal of Computer Vision. — 2004. — Nov. — Vol. 60, no. 2. — P. 91—110.

30. *Bay, H.* SURF: Speeded Up Robust Features [Text] / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Computer Vision — ECCV 2006. — Springer Berlin Heidelberg, 2006. — P. 404—417.

31. *Rosten, E.* Machine Learning for High-Speed Corner Detection [Text] / E. Rosten, T. Drummond // Computer Vision — ECCV 2006. — Springer Berlin Heidelberg, 2006. — P. 430—443.

32. BRIEF: Computing a Local Binary Descriptor Very Fast [Text] / M. Calonder [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2012. — July. — Vol. 34, no. 7. — P. 1281—1298.

33. *Muja, M.* Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration [Text] / M. Muja, D. Lowe // Vol. 1. — 01/2009. — P. 331—340.

34. *Fischler, M. A.* Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [Text] / M. A. Fischler, R. C. Bolles // Communications of the ACM. — 1981. — June. — Vol. 24, no. 6. — P. 381—395.

35. *Lebeda, K.* Fixing the Locally Optimized RANSAC [Text] / K. Lebeda, J. Matas, O. Chum // Proceedings of the British Machine Vision Conference 2012. — British Machine Vision Association, 2012. — P. 1—11. — (BMVC 2012).

36. *Grodecki, J.* Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials [Text] / J. Grodecki, G. Dial // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 2003. — Vol. 69, no. 1. — P. 59—68.

37. Enhancement of RPC Positioning Accuracy Using Affine Transformation with Different Number of Ground Control Points [Text] / M. Tawfeik [et al.] // International

Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology. — 2017. — Apr. — Vol. 17, AEROSPACE SCIENCES. — P. 1—12.

38. A Novel RPC Bias Model for Improving the Positioning Accuracy of Satellite Images [Text] / Y. Dong [et al.] // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2020. — P. 35—41.

39. *d'Angelo, P.* DSM Based Orientation of Large Stereo Satellite Image Blocks [Text] / P. d'Angelo, P. Reinartz // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2012. — July. — P. 209—214.

40. Optimal selection of virtual control points with planar constraints for large-scale block adjustment of satellite imagery [Text] / X. Tong [et al.] // The Photogrammetric Record. — 2020. — Vol. 35, no. 172. — P. 487—508. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/phor.12339>.

41. Automatic Seamline Determination for Urban Image Mosaicking Based on Road Probability Map from the D-LinkNet Neural Network [Text] / S. Yuan [et al.] // Sensors. — 2020. — Mar. — Vol. 20, no. 7. — P. 1832.

42. *Saito, S.* Seamline Determination Based on Semantic Segmentation for Aerial Image Mosaicking [Text] / S. Saito, R. Arai, Y. Aoki // IEEE Access. — 2015. — Vol. 3. — P. 2847—2856.

43. Optimal Seamline Detection for Orthoimage Mosaicking by Combining Deep Convolutional Neural Network and Graph Cuts [Text] / L. Li [et al.] // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9, no. 7.

44. *Chon, J.* Seam-line determination for image mosaicking: A technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost [Text] / J. Chon, H. Kim, C.-S. Lin // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2010. — Jan. — Vol. 65, no. 1. — P. 86—92.

45. *Sudorgin, A.* Seam Line Optimization for Remote Sensing Image Mosaicking Based on Graph Shortest Path Finding [Text] / A. Sudorgin // GraphHPC-2017: Parallel Large-Scale Graph Processing. — 2017. — P. 8.

46. Seamline Determination for High Resolution Orthoimage Mosaicking Using Watershed Segmentation [Text] / M. Wang [et al.] // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. — 2016. — Feb. — Vol. 82, no. 2. — P. 121—133.

47. *Afek, Y.* Mosaicking of Orthorectified Aerial Images [Text] / Y. Afek, A. Brand // Photogrammetric Eng. Remote Sensing. Vol. 64. — 1998. — P. 115—124.

48. *Davis, J.* Mosaics of scenes with moving objects [Text] / J. Davis // Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No.98CB36231). — IEEE Comput. Soc, 1998.

49. *Wang, L.* Automated Seamline Detection in Orthophoto Mosaicking Using Improved Snakes [Text] / L. Wang, H. Ai, L. Zhang // 2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science. — IEEE, 12/2010.

50. *Kerschner, M.* Seamline detection in colour orthoimage mosaicking by use of twin snakes [Text] / M. Kerschner // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2001. — June. — Vol. 56, no. 1. — P. 53—64.

51. *Kass, M.* Snakes: Active contour models [Text] / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos // International Journal of Computer Vision. — 1988. — Jan. — Vol. 1, no. 4. — P. 321—331.
52. *Fernandez, E.* GRASP for seam drawing in mosaicking of aerial photographic maps [Text] / E. Fernandez, R. Marti // Journal of Heuristics. — 1999. — Vol. 5, no. 2. — P. 181—197.
53. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов [Текст] : ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. — М. : ЦНИИГАиК, 2002.
54. ГОСТ Р 70663-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Общие требования к созданию динамических и мозаичных покрытий [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2023.
55. *Giudici, R.* An Advanced Benchmarking for Image Compositing Evaluation [Text] / R. Giudici, L. Courtrai, S. Lefèvre // ISPRS International Workshop on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics (UAV-g). — Enschede, Netherlands, 2019. — P. 303—308.
56. Optimizing Local Alignment along the Seamline for Parallax-Tolerant Orthoimage Mosaicking [Text] / H. Yin [et al.] // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14, no. 14.
57. ГОСТ Р 70155-2022. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Космические системы дистанционного зондирования Земли. Типовые режимы съемки космического аппарата оптико-электронного наблюдения [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2022.
58. ГОСТ Р 59754-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Обработка данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Термины и определения [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2021.
59. *Jacobsen, K.* Systematic geometric image errors of very high resolution optical satellites [Text] / K. Jacobsen // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2018. — P. 233—238.
60. *Pan, H.* Precise georeferencing using the rigorous sensor model and rational function model for ZiYuan-3 strip scenes with minimum control [Text] / H. Pan, C. Tao, Z. Zou // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 119. — P. 259—266.
61. Космический аппарат «Ресурс-П» [Текст] / Р. Н. Ахметов [и др.] // Геома-тика. — 2010. — 4(9). — С. 23—26.
62. GeoEye-1 Satellite [Текст] / European Space Imaging. — URL: <https://www.euspaceimaging.com/wp-content/uploads/2020/11/GeoEye-1-Data-Sheet-2020.pdf> (дата обр. 15.01.2026).
63. *Services, G.-I.* Pléiades Imagery – User Guide [Text] / G.-I. Services. — As- trium GEO-Information Services, 10/18/2012.

64. eoPortal [Текст] / European Space Agency. — URL: <https://www.eoportal.org> (дата обр. 15.01.2026).
65. ГОСТ Р 59480-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Уровни обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2021.
66. High Resolution Optical Satellite Imagery [Text] / I. Dowman [et al.]. — 1st ed. — Whittles Publishing, 2012.
67. Методика сравнительной оценки эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с различными оптико-электронными телескопическими комплексами [Текст] / Н. Н. Стратилатова [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2016. — Июль. — Т. 15, № 2. — С. 80.
68. Кузнецов, А. Е. Структурное восстановление изображений от многоматричных сканерных датчиков дистанционного зондирования Земли [Текст] / А. Е. Кузнецов, О. А. Пресняков, Г. Н. Мятлов // Цифровая обработка сигналов. — 2015. — Т. 3. — С. 29—36.
69. Шилов, Л. Б. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли разработки АО «РКЦ ”ПРОГРЕСС» [Текст] / Л. Б. Шилов // Арктика: перспективы, инновации и развитие регионов: IX Международный Арктический саммит: сборник материалов. — Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2025. — С. 209—215.
70. Халилюлин, И. Р. Космические системы и комплексы дистанционного зондирования Земли [Текст] / И. Р. Халилюлин, А. Б. Желубенкова // Материалы Тринадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — 2025. — С. 12—14.
71. Bielski, C. Automated morphological image composition for mosaicing large image data sets [Text] / C. Bielski, J. Grazzini, P. Soille // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — 07/2007. — P. 4068—4071.
72. Soille, P. Seamless mosaicing of very high resolution satellite data at continental scale [Text] : tech. rep. / P. Soille ; European Commission, Joint Research Centre (JRC). — 2014. — P. 2.
73. PBC, Planet Labs. Planet Basemaps documentation [Текст] / PBC, Planet Labs. — 2026. — URL: <https://developers.planet.com/docs/data/basemaps/> (дата обр. 17.01.2026).
74. Copernicus Land Monitoring Service. Sentinel-2 Global Image Mosaic (S2GM) [Текст] / Copernicus Land Monitoring Service. — URL: <https://land.copernicus.eu/en/products/global-image-mosaic> (дата обр. 17.01.2026).
75. MODIS Standard L2 Global Mosaics [Текст] / NASA Earth Observing System (EOS). — URL: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/images/l2-global-mosaics>.

76. *Observation, Earth Resources and Center, Science (EROS)*. Global Land Survey [Text] / Observation, Earth Resources and Center, Science (EROS). — 2017.
77. Банк базовых продуктов [Текст] / Научный центр оперативного мониторинга Земли. — URL: <https://bbp.ntsomz.ru/>.
78. Геопортал Роскосмоса [Текст] / Госкорпорация «Роскосмос». — URL: <https://gptl.ru/>.
79. Геометрический синтез мозаичных снимков с использованием рациональных полиномов [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2025. — № 3. — С. 10—16.
80. Развитие ЕТРИС ДЗЗ с применением облачных технологий [Текст] / П. А. Лошкарев [и др.] // Геоматика. — 2013. — № 4. — С. 22—26.
81. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Формализация задачи [Текст] / А. В. Старков [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2021. — Т. 22, № 1. — С. 54—64.
82. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей [Текст] / А. В. Старков [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2021. — Т. 22, № 2. — С. 148—161.
83. Создание и практическая отработка программных технологий НКПОР российских КС ДЗЗ минимального состава [Текст] / А. И. Васильев [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2024. — Т. 11, № 4. — С. 8—19.
84. 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.
85. *Jacobsen, K.* Calibration of Optical Satellite Sensors [Text] / K. Jacobsen // Proceedings of International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW. — 2006. — Jan. — P. 1—7.
86. *Кузнецов, А. Е.* Алгоритмическое обеспечение комплекса создания опорных данных по спутниковым снимкам высокого пространственного разрешения [Текст] / А. Е. Кузнецов, А. С. Рыжиков // Цифровая обработка сигналов. — 2024. — № 3. — С. 59—65.
87. *Szeliski, R.* Computer Vision: Algorithms and Applications [Text] / R. Szeliski. — London; New York : Springer, 2011.
88. *Hartley, R.* Multiple View Geometry in Computer Vision [Text] / R. Hartley, A. Zisserman. — 2nd ed. — New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2003.
89. *Harris, C.* A Combined Corner and Edge Detector [Text] / C. Harris, M. Stephens // Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988. — Alvey Vision Club, 1988. — P. 147—151. — (AVC 1988).

90. Комплексование алгоритма SURF с навигационным алгоритмом RatSLAM беспилотного авиационного судна [Текст] / И. Лю, М. С. Селезнева, К. А. Неусыпин, Л. Фу // Авиакосмическое приборостроение. — 2025. — № 9. — С. 18—25.

91. Райченко, Б. В. Практическое применение методов ключевых точек на примере сопоставления снимков со спутника «Канопус-В» [Текст] / Б. В. Райченко, В. В. Некрасов // Геоматика. — 2013. — № 2. — С. 56—61.

92. Кузнецов, А. Е. Алгоритм поиска одноименных объектов на изображениях земной поверхности с учетом малоинформативных областей [Текст] / А. Е. Кузнецов, В. И. Пошихонов // Цифровая обработка сигналов. — 2021. — № 4. — С. 52—56.

93. Кузнецов, А. Е. Исследование быстродействия алгоритмов поиска на изображениях одноименных точек с использованием современной вычислительной техники [Текст] / А. Е. Кузнецов, А. С. Рыжиков // Цифровая обработка сигналов. — 2017. — № 3. — С. 40—44.

94. Soille, P. Morphological image compositing [Text] / P. Soille // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2006. — May. — Vol. 28, no. 5. — P. 673—683.

95. Optimal seamline detection for multiple image mosaicking via graph cuts [Text] / L. Li [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 113. — P. 1—16.

96. Superpixel-based optimal seamline detection in the gradient domain via graph cuts for orthoimage mosaicking [Text] / L. Li [et al.] // International Journal of Remote Sensing. — 2018. — Vol. 39, no. 12. — P. 3908—3925.

97. Milgram, D. L. Computer Methods for Creating Photomosaics [Text] / D. L. Milgram // IEEE Trans. Comput. — Washington, DC, USA, 1975. — Nov. — Vol. 24, no. 11. — P. 1113—1119.

98. Fernandez, E. Mosaicking of Aerial Photographic Maps Via Seams Defined by Bottleneck Shortest Paths [Text] / E. Fernandez, R. Garfinkel, R. Arbiol // Operations Research. — 1998. — June. — Vol. 46, no. 3. — P. 293—304.

99. Wen, H. An Improved Algorithm for Image Mosaic [Text] / H. Wen, J. Zhou // 2008 International Symposium on Information Science and Engineering. — IEEE, 12/2008.

100. Greig, D. M. Exact Maximum A Posteriori Estimation for Binary Images [Text] / D. M. Greig, B. T. Porteous, A. H. Seheult // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). — 1989. — Jan. — Vol. 51, no. 2. — P. 271—279.

101. ГОСТ Р 70778-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Типовые артефакты оптических данных [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2023.

102. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [Text] / Z. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Image Processing. — 2004. — Vol. 13, no. 4. — P. 600—612.

103. An automatic and modular stereo pipeline for pushbroom images [Text] / C. de Franchis [et al.] // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2014. — Aug. — P. 49—56.
104. *Qin, R.* Automated 3D recovery from very high resolution multi-view satellite images [Text] / R. Qin // CoRR. — 2019. — arXiv: 1905.07475.
105. *Gao, J.* A general deep learning based framework for 3D reconstruction from multi-view stereo satellite images [Text] / J. Gao, J. Liu, S. Ji // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2023. — Vol. 195. — P. 446—461.
106. *Wang, X.* An optical flow-based terrain extraction framework of VHR optical satellite stereo images [Text] / X. Wang, M. Wang, Y. Pi // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2023. — Vol. 124. — P. 103543.
107. *Jabari, S.* RPC-Based Coregistration of VHR Imagery for Urban Change Detection [Text] / S. Jabari, Y. Zhang // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. — 2016. — July. — Vol. 82. — P. 521—534.
108. *Draper, N.* Applied Regression Analysis [Text] / N. Draper, H. Smith. — Wiley, 1966. — (Applied Regression Analysis ; v. 1).
109. *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.
110. Космическая система дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» [Текст] / А. Н. Кирилин [и др.] // Материалы 17-й Международной научно-технической конференции «От снимка к цифровой реальности: ДЗЗ и фотограмметрия». — 2017. — С. 15—21.
111. *Bishop, C. M.* Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics) [Text] / C. M. Bishop. — 1st ed. — Springer, 2007. — P. 758.
112. *Мэрфи, К. П.* Вероятностное машинное обучение [Текст] / К. П. Мэрфи. — ДМК Пресс, 2022. — С. 990.
113. *Мерков, А. Б.* Введение в методы статистического обучения [Текст] / А. Б. Мерков. — Едиториал УРСС, 2019. — С. 256.
114. *Журавлёв, Ю. И.* «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения [Текст] / Ю. И. Журавлёв, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. — М.: ФАЗИС, 2006.
115. Calculating Viewing Angles Pixel by Pixel in Optical Remote Sensing Satellite Imagery Using the Rational Function Model [Text] / K. Xu [et al.] // Remote Sensing. — 2018. — Mar. — Vol. 10, no. 3. — P. 478.
116. A Piecewise Approach to Epipolar Resampling of Pushbroom Satellite Images Based on RPC [Text] / J. Oh [et al.] // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. — 2010. — Dec. — Vol. 76, no. 12. — P. 1353—1363.
117. *Seber, G. A. F.* Nonlinear Regression [Текст] / G. A. F. Seber, C. J. Wild. — Wiley, 02.1989.

118. *Rice, S. O.* Mathematical Analysis of Random Noise [Text] / S. O. Rice // Bell System Technical Journal. — 1944. — July. — Vol. 23, no. 3. — P. 282—332.

119. *Zaharescu, A.* Robust Factorization Methods Using a Gaussian/Uniform Mixture Model [Text] / A. Zaharescu, R. Horaud // International Journal of Computer Vision. — 2008. — Sept. — Vol. 81, no. 3. — P. 240—258.

120. Robust Estimation of Gaussian Mixture Models Using Anomaly Scores and Bayesian Information Criterion for Missing Value Imputation [Text] / F. Mouret [et al.] // 2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). — IEEE, 08/2022. — P. 827—831.

121. *Schwarz, G.* Estimating the Dimension of a Model [Text] / G. Schwarz // The Annals of Statistics. — 1978. — Mar. — Vol. 6, no. 2.

122. *Vapnik, V. N.* Statistical Learning Theory [Text] / V. N. Vapnik. — USA : John Wiley & Sons, Inc., 1988. — P. 732.

123. *Gunn, S. R.* Support Vector Machines for Classification and Regression [Text] / S. R. Gunn. — 1998.

124. Comparing different supervised machine learning algorithms for disease prediction [Text] / S. Uddin [et al.] // BMC Medical Informatics and Decision Making. — 2019. — Dec. — Vol. 19, no. 1.

125. A comparison study: Support vector machines for binary classification in machine learning [Text] / W. Zeng [et al.] // 2011 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI). Vol. 3. — 2011. — P. 1621—1625.

126. *Musa, M.* Comparative analysis of selected machine learning algorithms based on generated smart home dataset [Text] / M. Musa, L. Oghenekaro // International Journal of Computer Science and Information Technology. — 2022. — Oct. — Vol. 9. — P. 42—53.

127. *Соколова, Ю. С.* Методы и алгоритмы анализа данных на основе инструментария интеллектуальной обработки информации и биоинспирированного моделирования : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 [Текст] / Ю. С. Соколова. — Рязань, 2018.

128. *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.

129. *Hastie, T.* The Entire Regularization Path for the Support Vector Machine [Text] / T. Hastie, S. Rosset, R. Tibshirani // Journal of Machine Learning Research. — 2004. — Oct. — Vol. 5. — P. 1391—1415.

130. *Chang, C.-C.* LIBSVM: A Library for Support Vector Machines [Text] / C.-C. Chang, C.-J. Lin. — 2001.

131. *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.

132. *Демидова, Л. А.* Использование многоцелевого генетического алгоритма в задаче поиска оптимальных значений для набора показателей классификации

[Текст] / Л. А. Демидова, **М. М. Егин** // Прикладные исследования и технологии ART2017. Сборник трудов международной конференции. — 2017. — С. 123—129.

133. Демидова, Л. А. Анализ проблем SVM-классификации данных с применением статистических пакетов программ и их решение [Текст] / Л. А. Демидова, **М. М. Егин**, Ю. С. Соколова // Интеллектуальные и информационные системы: материалы международной научно-технической конференции. — 2017. — С. 75—81.

134. Егин, М. М. Модификация операторов NSGA-II в задаче поиска параметров SVM-классификатора [Текст] / **М. М. Егин** // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — 2017. — С. 60—61.

135. Демидова, Л. А. Использование классификатора на основе окна Парзена для повышения качества SVM-классификации [Текст] / Л. А. Демидова, **М. М. Егин** // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2018: сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 т. Т. 3. — 2018. — С. 68—73.

136. Demidova, L. Data classification based on the hybrid intellectual technology [Text] / L. Demidova, **М. Егин** // ITM Web of Conferences / ed. by E. Nikulchev, G. Bubnov. — 2018. — Vol. 18. — P. 1—5.

137. 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.

138. Демидова, Л. А. Классификация данных на основе SVM алгоритма и алгоритма k-ближайших соседей данных [Текст] / Л. А. Демидова, Ю. С. Соколова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2017. — № 62. — С. 119—132.

139. Jain, A. K. Classifier Design with Parzen Windows [Text] / A. K. Jain, M. D. Ramaswami // Pattern Recognition and Artificial Intelligence. Vol. 7 / ed. by E. S. Gelsema, L. N. Kanal. — North-Holland, 1988. — P. 211—228. — (Machine Intelligence and Pattern Recognition).

140. Parzen windows for multi-class classification [Text] / Z.-W. Pan [et al.] // Journal of Complexity. — 2008. — Vol. 24, no. 5. — P. 606—618.

141. Demidova, L. Big Data Classification Using the SVM Classifiers with the Modified Particle Swarm Optimization and the SVM Ensembles [Text] / L. Demidova, E. Nikulchev, Y. Sokolova // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. — 2016. — May. — Vol. 9.

142. Platt, J. Fast Training of Support Vector Machines Using Sequential Minimal Optimization [Text] / J. Platt // Advances in Kernel Methods: Support Vector Learning. — 1999. — Feb. — P. 185—208.

143. Селезнева, М. С. Методы построения математических моделей с использованием эволюционных алгоритмов [Текст] / М. С. Селезнева, Л. В. Григо-

рьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 6. — С. 41—45.

144. *Селезнева, М. С.* Алгоритм управления специальными критериями селекции алгоритма самоорганизации [Текст] / М. С. Селезнева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2024. — № 1. — С. 45—50.

145. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [Text] / K. Deb [et al.] // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2002. — Vol. 6, no. 2. — P. 182—197.

146. *Zhang, Q.* MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition [Text] / Q. Zhang, H. Li // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2007. — Vol. 11, no. 6. — P. 712—731.

147. *Zheng, W.* Mathematical runtime analysis for the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) [Text] / W. Zheng, B. Doerr // Artificial Intelligence. — 2023. — Vol. 325. — P. 104016.

148. *Jain, H.* An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point Based Nondominated Sorting Approach, Part II: Handling Constraints and Extending to an Adaptive Approach [Text] / H. Jain, K. Deb // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2014. — Vol. 18, no. 4. — P. 602—622.

149. *Das, I.* On characterizing the «knee» of the Pareto curve based on Normal-Boundary Intersection [Text] / I. Das // Structural Optimization. — 1999. — Oct. — Vol. 18, no. 2/3. — P. 107—115.

150. *Егин, М. М.* Алгоритм блочного уравнивания снимков, привязанных по RPC-модели [Текст] / М. М. Егин, А. Е. Кузнецов, В. И. Пошехонов // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2021: сборник трудов IV Международного научно-технического форума: в 10 т. Т. 6. — 2021. — С. 43—48.

151. *Levenberg, K.* A method for the solution of certain non-linear problems in least squares [Текст] / K. Levenberg // Quarterly of Applied Mathematics. — 1944. — Т. 2, № 2. — С. 164—168.

152. *Marquardt, D. W.* An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters [Text] / D. W. Marquardt // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. — 1963. — Vol. 11, no. 2. — P. 431—441.

153. *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 ; опубли. 15.07.2025, 2025667139 (Рос. Федерация).

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

155. *Демидова, Л. А.* Подход к самонастройке параметров многоцелевого генетического алгоритма в задаче разработки SVM-классификатора [Текст] / Л. А. Демидова, М. М. Егин // Интеллектуальные и информационные систе-

мы: материалы международной научно-технической конференции. — 2017. — С. 70—74.

156. *Егин, М. М.* Использование многоцелевого эволюционного алгоритма оптимизации для настройки параметров бинарного классификатора [Текст] / **М. М. Егин** // Математические методы и информационные технологии управления в науке, образовании и правоохранительной сфере: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. — 2017. — С. 17—19.

157. *Егин, М. М.* Особенности использования многоцелевого генетического алгоритма оптимизации в решении задачи бинарной классификации [Текст] / **М. М. Егин** // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Международной научно-технической конференции. Т. 1. — 2017. — С. 273—276.

158. *Егин, М. М.* Применение эволюционного алгоритма в задаче настройки параметров бинарного классификатора [Текст] / **М. М. Егин** // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2017: сборник трудов II Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 8 т. — 2017. — С. 283—286.

159. *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.

160. *Пошехонов, В. И.* Математический аппарат оценки точности RPC-модели геокодирования данных ДЗЗ [Текст] / В. И. Пошехонов, **М. М. Егин** // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов: в 2 т. Т. 2. — 2022. — С. 94—95.

161. *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.

162. *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.

163. *Ronneberger, O.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation [Text] / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // ArXiv. — 2015.

164. Deep-Learning-Based Semantic Segmentation of Remote Sensing Images: A Survey [Text] / L. Huang [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2024. — Vol. 17. — P. 8370—8396.

165. *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).
166. *Pratt, W. K. Digital Image Processing* [Text] / W. K. Pratt. — USA : John Wiley & Sons, Inc., 1978.
167. *Егин, М. М.* Разработка математического аппарата оценки качества линий пореза мозаичных изображений высокого разрешения [Текст] / **М. М. Егин**, А. Е. Кузнецов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — 2024. — С. 129—130.
168. *Егин, М. М.* Обнаружение дефектов линии порезов мозаичных изображений ДЗЗ [Текст] / **М. М. Егин**, П. А. Князьков // Материалы Тринадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — 2025. — С. 125—126.
169. *Marr, D. Theory of Edge Detection* [Text] / D. Marr, E. Hildreth // Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a Biological character. Royal Society (Great Britain). — 1980. — Feb. — Vol. 207. — P. 187—217.
170. *Schowengerdt, R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* [Text] / R. A. Schowengerdt. — Academic Press, 1997. — P. 522.
171. Алгоритм оценки качества совмещения мозаичных изображений земной поверхности [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2026. — № 1. — С. 32—37.
172. ГОСТ Р ИСО 16269-4. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2017.
173. *Beasley, T. M. Rank-Based Inverse Normal Transformations are Increasingly Used, But are They Merited?* [Text] / T. M. Beasley, S. Erickson, D. B. Allison // Behavior Genetics. — 2009. — June. — Vol. 39, no. 5. — P. 580—595.
174. Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution [Text] / B. Schölkopf [et al.] // Neural Computation. — 2001. — July. — Vol. 13, no. 7. — P. 1443—1471. — eprint: <https://direct.mit.edu/neco/article-pdf/13/7/1443/814849/089976601750264965.pdf>.
175. 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.
176. *Оньков, И. В.* Исследование геометрической точности ортотрансформированных снимков RapidEye [Текст] / И. В. Оньков // Геоматика. — 2009. — 4(5). — С. 21—27.

177. *Bresnahan, P. C.* Accuracy Re-Evaluation of Cosmo-Skymed Spotlight and Stripmap Imaging Mode Products [Text] / P. C. Bresnahan // Proc. of Joint Agency Commercial Imagery Evaluation (JACIE). — Boulder, Colorado, USA : Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, 03/2011.

178. ГОСТ Р 59475-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Качество данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень показателей качества данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2021.

179. *Tumarov, P. S.* Характеристики точности координат точек местности — CE и LE [Текст] / П. С. Титаров // Геопрофи. — 2010. — № 1. — С. 52—53.

180. *United States Defense Mapping Agency.* Error Theory as Applied to Mapping, Charting, and Geodesy [Text] / United States Defense Mapping Agency. — Defense Mapping Agency, 1991. — (DMA technical report).

181. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2011.

182. *Grubbs, F. E.* Sample Criteria for Testing Outlying Observations [Text] / F. E. Grubbs // The Annals of Mathematical Statistics. — 1950. — Vol. 21, no. 1. — P. 27—58.

183. *Коршунов, Ю. М.* Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Ю. М. Коршунов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 1987.

184. *Кобзарь, А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. [Текст] / А. И. Кобзарь. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — С. 816.

185. *Горобченко, А. С.* Исследование алгоритмов обнаружения изменений для обработки данных стерео и площадной съёмки [Текст] / А. С. Горобченко, **М. М. Егин** // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2025: Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. — 2025. — С. 123—130.

186. *Горобченко, А. С.* Применение алгоритмов обнаружения изменений для обработки данных площадной съёмки [Текст] / А. С. Горобченко, **М. М. Егин** // Материалы Тринадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — 2025. — С. 102—103.

187. *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.

188. *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.
189. Универсальная платформа быстрой разработки приложений для обработки данных дистанционного зондирования Земли «ER-Set» [Текст] : пат. 2013610968 Рос. Федерация / В. И. Побаруев (Российская Федерация) ; ФГБОУ ВО «РГРТУ» (RU). — Заявл. 09.01.2013.
190. *Побаруев, В. И.* Унифицированная программная платформа создания средств обработки данных дистанционного зондирования Земли — «Er-Set» [Текст] / В. И. Побаруев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2016. — № 55. — С. 95—103.
191. Patterns of Enterprise Application Architecture [Text] / M. Fowler [et al.]. — Addison-Wesley Professional, 2002. — P. 559.
192. ГОСТ 19.101-77. Единая система программной документации. Виды программ и программных документов [Текст]. — М. : Стандартинформ, 2010.
193. *Newman, S.* Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems [Текст] / S. Newman. — 1st. — O'Reilly Media, 02.2015. — С. 280.
194. *Побаруев, В. И.* Организация межпрограммного взаимодействия в сложных системах методом «ассоциативного» интерфейса [Текст] / В. И. Побаруев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2013. — № 2. — С. 56—60.
195. Алгоритм управления стандартной обработкой данных ДЗЗ [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Материалы Тринадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — 2025. — С. 94—95.
196. *Bernstein, D.* Containers and Cloud: From LXC to Docker to Kubernetes [Text] / D. Bernstein // IEEE Cloud Computing. — 2014. — Vol. 1. — P. 81—84.
197. *Open Container Initiative.* Image Format Specification [Текст] / Open Container Initiative ; Open Container Initiative. — Ver. 1.1.0. — 2024. — URL: <https://github.com/opencontainers/image-spec> (дата обр. 23.04.2026).
198. *Gormley, C.* Elasticsearch: The Definitive Guide [Text] / C. Gormley, Z. Tong. — O'Reilly, 2015.
199. *Егин, М. М.* Программный компонент анализа дефектов линии пореза мозаичных изображений [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. 130—131.

Приложение А

Акты об использовании результатов диссертационной работы



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ПРОГРЕСС»**
(АО «РКЦ «ПРОГРЕСС»)

ул. Земеца, д. 18, г. Самара, 443009, тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: mail@samspace.ru
ОКПО 43892776, ИНН 6312139922, КПП 631201001

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
генерального директора –
генеральный конструктор
АО «РКЦ «Прогресс», д.т.н.
Р.Н. Ахметов*
2026 г.



АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Егина М.М.
«Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных площадной
съёмки от высокодетальных систем ДЗЗ»

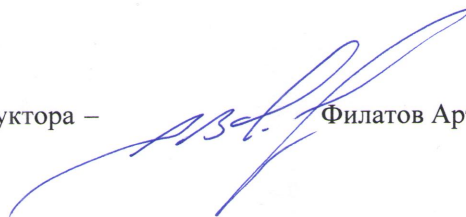
В рамках проектов по космическим аппаратам «Ресурс-П», «Ресурс-ПМ», «Аист-2Д» и «Аист-2Т» АО «РКЦ «Прогресс» совместно с ФГБОУ ВО «РГРТУ» ведет опытно-конструкторские работы по созданию математических и программных средств наземной обработки поступающей информации.

В кандидатской диссертации М. М. Егина предложен ряд новых алгоритмов, реализованных в программных комплексах формирования информационных продуктов разработки ФГБОУ ВО «РГРТУ» из состава НКПОР-РП, НКПОР-РПМ и СПО МКА:

- алгоритм предобработки областей ключевых точек на совмещаемых изображениях площадной съёмки;
- математическая модель и алгоритм оптимизации параметров блочного уравнивания группы снимков;
- алгоритм проведения линий пореза мозаичных изображений;
- алгоритмы оценки качества мозаичных изображений.

Предложенные соискателем технические решения используются при формировании информационных продуктов в виде мозаичных снимков от космических систем серий «Ресурс» и «Аист».

Первый заместитель
генерального конструктора –
первый заместитель
начальника ЦСКБ



Филатов Артем Викторович**

Заместитель главного
конструктора, к.т.н.



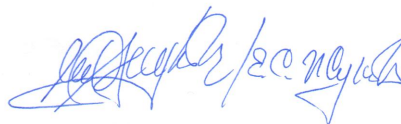
Шилов Лев Борисович***

* ул. Земяца, д.18 г. Самара, 443009; тел.: (846)992-65-29; e-mail ARN@samspace.ru

**ул. Земяца, д.18 г. Самара, 443009; тел.: (846)992-64-89; e-mail Filatov.AV@samspace.ru

***ул. Земяца, д.18 г. Самара, 443009; тел.(846)228-96-90; e-mail shilov@samspace.ru

Р.Н. Ахметов, А.В. Филатов, Л.Б. Шилов выражают согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата технических наук Егина Максима Михайловича и их дальнейшую обработку.





АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ» имени А.Г. ИОСИФЬЯНА»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



Хоромный тупик, д. 4, стр. 1, Москва, 107078
Тел.: (495) 608-84-67, (495) 365-56-10; Факс: (495) 624-86-65, (495) 366-26-38
e-mail: info@vniiem.ru; http://www.vniiem.ru
ОКПО 04657139; ОГРН 5117746071097; ИНН/КПП 7701944514/770101001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по научной работе АО «Корпорация
«ВНИИЭМ», д.т.н., проф.



В. Я. Геча

_____ 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертации Егина Максима Михайловича
«Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных
площадной съёмки от высокодетальных систем ДЗЗ»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности 2.3.1 - « Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика»

Результаты диссертации Егина М. М., в части создания алгоритмов и программного обеспечения обработки целевых данных съёмки КА (глава 2, 3), были использованы в ходе выполнения проекта по созданию Российско-белорусского космического аппарата высокодетального наблюдения Земли (РБКА).

В своей диссертации Егиным М. М. были предложены технические решения получения выходных информационных продуктов по материалам объектовой и широкозахватной (площадной) съёмки.

Представленные соискателем модели и алгоритмы, были использованы для оперативного синтеза бесшовных мозаичных снимков земной поверхности из отдельных изображений, формируемых на одном витке полёта спутника.

Начальник НТК «Программное
и информационное обеспечение КС и К»

О. А. Никонов

174275

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
и инновациям ФГБОУ ВО «РГРТУ»,
д-р техн. наук



С. И. Гусев

2026 г.

АКТ

об использовании в ФГБОУ ВО «РГРТУ» результатов кандидатской диссертации Егина М. М. «Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных площадной съёмки от высокодетальных систем ДЗЗ»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты исследований кандидатской диссертации Егина М. М. используются в ФГБОУ ВО «РГРТУ» в ОКР № 2-22, № 14-20, № 9-21, № 3-20, № 13-23, № 7-23 (исполнитель: НИИ «Фотон» РГРТУ), выполняемых в рамках Федеральной космической программы и Гособоронзаказа. Егин М. М., являясь сотрудником НИИ «Фотон» РГРТУ, участвует в указанных ОКР при создании наземных средств обработки данных площадной съёмки от высокодетальных космических систем наблюдения Земли. Разработанное в диссертации Егиным М. М. математическое и алгоритмическое обеспечение использовано для обработки данных от космических аппаратов серии «Ресурс-ПМ», серии «Аист», Российско-белорусского космического аппарат и др.

Директор НИИ «Фотон» ФГБОУ ВО «РГРТУ»,
д-р техн. наук, Заслуженный деятель науки РФ

В. В. Еремеев

Приложение Б

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025668197

Программа автоматического формирования линий
пореа мозаичного ортофотоплана

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (RU)*

Авторы: *Егин Максим Михайлович (RU), Кузнецов Алексей Евгеньевич (RU), Пресняков Олег Александрович (RU)*

Заявка № 2025667176

Дата поступления 17 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 июля 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 06926761a6300b1544240f670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025668405

Программа двухэтапного блочного уравнивания изображений ДЗЗ, привязанных по RPC-модели

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (RU)*

Авторы: *Егин Максим Михайлович (RU), Кузнецов Алексей Евгеньевич (RU), Пошехонов Василий Ильич (RU)*

Заявка № 2025667139

Дата поступления 17 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e761a6300b1544240f670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов