

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук

На правах рукописи



Мурынин Александр Борисович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ И ОКЕАНА**

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2023

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Методы повышения пространственного разрешения изображений при дистанционных измерениях	26
1.1. Основные понятия и классификация методов повышения разрешения изображений	27
1.2. Численные критерии оценки качества при повышении разрешения изображений	32
1.3. Пространственно-спектральный подход к анализу и синтезу изображений	37
1.4. Повышение разрешения космических изображений методом пространственно-спектрального синтеза с привлечением опорных изображений	47
1.5. Вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных изображений на основе опорного панхроматического	57
Выводы к Главе 1	74
Глава 2. Повышение информативности аэрокосмических изображений наземных антропогенных объектов	76
2.1. Разработка методов повышения пространственного разрешения изображений с использованием априорной информации о наблюдаемых объектах	77
2.2. Детектирование антропогенных объектов известной формы на цветных аэрокосмических изображениях	92
2.3. Метод нейросетевого сверхразрешения аэрокосмических изображений наземных антропогенных объектов	98

2.4. Исследовательский программный комплекс повышения информативности спутниковых изображений	116
Выводы к Главе 2	124
 Глава 3. Методы и алгоритмы комплексирования и анализа данных для определения трёхмерных характеристик объектов	
3.1. Основные направления развития методов трёхмерного машинного зрения	127
3.2. Выбор методов стереореконструкции	129
3.3. Стереореконструкция в реальном времени	133
3.4. Разработка метода вычисления трехмерных характеристик объектов по одиночным спутниковым изображениям	158
Выводы к Главе 3	171
 Глава 4. Методы дистанционного измерения пространственных спектров водной поверхности по оптическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости	
4.1. Пространственно-временная структура поверхностного волнения и возможности дистанционного измерения её характеристик	174
4.2. Анализ методов определения спектров волнения по оптическим изображениям	180
4.3. Разработка методов и алгоритмов восстановления спектров морской поверхности по аэрокосмическим оптическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости	188
4.4. Восстановление двумерных спектров морского волнения по спектрам космических изображений в широком диапазоне частот	217
4.5. Высокопроизводительная регистрация пространственных спектров морского волнения при оперативном космическом мониторинге обширных акваторий	228
Выводы к Главе 4	243

Глава 5. Валидация методов дистанционного измерений спектров морского волнения и результаты экспериментальных исследований	246
5.1. Подход к валидации методов восстановления спектров	246
5.2. Условия проведения экспериментов	254
5.3. Результаты экспериментов с использованием стационарной исследовательской платформы	261
5.4. Результаты экспериментов с использованием дрейфующих буёв .	286
5.5. Применение метода восстановления пространственных спектров морских волн для исследования обширных акваторий	290
Выводы к Главе 5	305
Заключение	308
Список литературы	317

Введение

В диссертации исследуются, разрабатываются и развиваются методы и алгоритмы цифровой обработки и анализа данных, получаемых при дистанционном зондировании Земли. Разрабатываются подходы к повышению информативности этих данных для извлечения требуемой информации о характеристиках антропогенных объектов и областей на поверхности Земли. Развиваются численные методы восстановления пространственных спектральных характеристик волн на морской поверхности по аэрокосмическим изображениям. Основные материалы диссертации получены автором в ходе работ, проведенных в Научно-исследовательском институте космического мониторинга «АЭРОКОСМОС» под руководством академика РАН Бондура Валерия Григорьевича.

Результаты работы актуальны при проведении крупных научных исследований для получения новых знаний о процессах и явлениях в океане и на суше, на основе данных дистанционного зондирования Земли и моделирования в интересах реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации [20–22].

Развитие методов дистанционного получения информации о морском волнении важно для исследования многих физических процессов и явлений, происходящих на границе раздела океан–атмосфера [19, 76, 109, 141]. Эта информация имеет важное прикладное значение для прогнозирования воздействия интенсивных поверхностных волн на морские объекты и береговые сооружения [97, 132] для обеспечения безопасности различных объектов, таких как суда, портовые и гидротехнические сооружения, объекты нефтегазового комплекса [9]. Мониторинг состояния морского волнения важен для разведки и добычи полезных ископаемых в зонах континентального шельфа; строительстве гидротехнических сооружений; обнаружении и ликвидации загрязнений морских акваторий; защите берегов от волновой эрозии; развитии морского туризма и рекреационной деятельности [9, 103, 132].

Актуальность темы исследования. Получение информации о процессах и явлениях на поверхности Земли и в акваториях Мирового океана, в том числе об антропогенных объектах и явлениях, актуально в связи с развитием методов и средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Актуальна разработка научных основ и новых методов космического мониторинга процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше. Методы исследования должны совершенствоваться с целью снижения неопределённости и ограничений в использовании дистанционных и наземных данных. Развитие методов спутникового мониторинга способствует противодействию угрозам, в том числе связанных с взаимодействием природы и человека, а также обеспечивать повышение качества жизни и снижение негативных воздействий на здоровье населения [22]. С помощью данных ДЗЗ производятся мониторинг стихийных бедствий и катастроф, картографирование, наблюдение за состоянием атмосферы и мирового океана, а также другие исследования.

Получением и обработкой данных ДЗЗ занимаются многие организации, в том числе крупные государственные космические агентства Роскосмос (Россия), NASA (США), ESA (Европа), а также частные компании, такие как Maxar Technologies (образована в 2017 году в результате слияния Digital Globe и MDA Holdings Company) (США), SPOT Image (Франция). Распространением изображений, полученных с космических аппаратов (КА) занимаются как сами операторы космических аппаратов, так и дилеры, в частности СканЭкс, СовЗонд и др. Всё более широко используется аэрофотосъёмка, в том числе с беспилотных летательных аппаратов. Аэрофотосъёмка позволяет получить данные с более высоким пространственным разрешением по сравнению с космической съёмкой, что важно при решении многих задач, в том числе связанных с мониторингом антропогенных объектов, хозяйственной инфраструктуры и т. д. Однако, такие данные имеют значительно меньшей зоной покрытия и не подходят для изучения поверхности суши и океана в глобальном масштабе.

Развитие методов обработки и анализа аэрокосмических данных позволяет извлекать из них необходимую информацию в автоматическом и автоматизированном режимах, что делает эту информацию более доступной для широкого круга пользователей.

Актуально развитие методов обработки аэрокосмических данных, которые позволяют значительно повысить качество и информативность этих данных. При этом наиболее важно развитие методов повышения пространственного разрешения космических изображений для обеспечения возможности изучения наблюдаемых объектов с большей детализацией, а также методов извлечения структурной информации о наблюдаемых объектах из одиночных спутниковых изображений [6, 22].

Актуальной задачей является разработка методов дистанционных измерений по данным, получаемым при мониторинге акваторий морей и океанов аэрокосмическими средствами дистанционного зондирования. Преимуществами аэрокосмических методов и средств дистанционного зондирования морей и океанов являются: большая обзорность, высокая оперативность, возможность работы в любых труднодоступных районах, высокая достоверность полученных данных. При этом для адекватной оценки характеристик поверхностных волн по оптическим изображениям должны быть развиты специальные методы восстановления характеристик поверхности по изображениям с учётом физических условий формирования поля яркости, регистрируемого на аэрокосмических изображениях.

Универсальный характер настоящей работы состоит в том, что исследуются и развиваются методы обработки данных дистанционного зондирования как суши, так и поверхности океана. Для поверхности суши развиваются методы, позволяющие повысить информативность данных дистанционного зондирования – улучшить пространственное разрешение и извлечь структурную информацию об исследуемых объектах и поверхностях. Для морской поверхности развиваются методы дистанционного измерения пространственных спектров волн-

нения, которые позволяют получать информацию о большом числе процессов и явлений как на поверхности океана, так и в приповерхностных слоях атмосферы и в водной толще.

Степень разработанности темы. Решением задач автоматической и автоматизированной обработки данных ДЗЗ занимаются многие научные организации. К основным научным учреждениям данного профиля относятся: НИИ «Аэрокосмос» под руководством академика РАН В. Г. Бондура, занимающийся проведением фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле с использованием аэрокосмических методов и технологий; Отдел «Технологии спутникового мониторинга» Института космических исследований РАН под руководством д.т.н. Е. А. Лупяна, занимающийся разработкой методов, технологий и систем дистанционного мониторинга состояния окружающей среды и антропогенных объектов; Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС) под руководством академика РАН С. Ю. Желтова и чл.-корр. РАН Г. Г. Себрякова; Самарский Государственный Аэрокосмический Университет и Институт обработки изображений под руководством академика РАН В. А. Сойфера; Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (лаборатория спутникового мониторинга); Научный Геоинформационный Центр РАН (научный руководитель чл.-корр. РАН В. В. Лебедев); Военно-воздушная инженерная академия имени профессора Н. Е. Жуковского, и другие. Значительный вклад в научные подходы к анализу данных дистанционных измерений внесли коллективы, занимающиеся развитием методов обработки изображений и распознавания образов: Федерального исследовательского центра "Информатика и управление" РАН (коллектив учеников академика РАН Ю. И. Журавлёва); Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК); Рязанского государственного радиотехнического университета имени В. Ф. Уткина (Кафедра "Космические технологии"); НИИ Системных исследований РАН под руководством академика РАН В. Б. Бетелина; Курского государственного университета

под руководством д. т. н. В. С. Титова; Владимирского государственного университета под руководством д. т. н. С. С. Садыкова и других университетов и институтов РАН.

За рубежом тематикой дистанционного зондирования занимаются многие научные коллектизы из различных университетов и организаций, работающих с аэрокосмической информацией.

Для решения многих задач анализа данных дистанционных измерений, не имеющих строгого математического решения, целесообразно применение методов численного моделирования и интеллектуального анализа данных с использованием искусственных нейронных сетей. Возможности развития таких подходов расширяются с ростом производительности вычислительных средств.

Цели диссертационной работы:

- Разработать эффективные методы и алгоритмы увеличения информативности данных ДЗЗ (главным образом пространственного разрешения спутниковых изображений) для решения задач исследования процессов и явлений на земной поверхности.
- Разработать методы и алгоритмы обработки изображений для восстановления структуры исследуемых объектов с использованием методов машинного обучения.
- Разработать и валидировать методы дистанционного измерения спектров уклонов и возвышений морской поверхности по оптическим изображениям учитывающую нелинейный характер формирования поля яркости, регистрируемого спутниковой аппаратурой.

Для достижения поставленных целей должны быть решены следующие задачи:

- Разработка методов повышения разрешения изображений, основанных на пространственно-спектральном анализе и синтезе изображений.

- Разработка метода повышения разрешения мультиспектрального изображения на основе вероятностного анализа исходного мультиспектрального и опорного панхроматического и нахождения наиболее вероятного распределения яркостей.
- Разработка метода повышения пространственного разрешения космических изображений с использованием априорной информации о ригидных объектах, представленной в векторной форме.
- Разработка метод повышения пространственного разрешения спутниковых изображений с использованием нейросетей, в том числе генеративно-состязательных.
- Развитие метода комплексирования данных для дистанционных измерений трёхмерных характеристик различных объектов, как с использованием стереопар изображений, так и по одиночным спутниковым изображениям.
- Разработка метода дистанционного измерения пространственных спектров водной поверхности по оптическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости, формируемого в естественных условиях освещения.
- Разработка метода построения операторов, восстанавливающих двумерные спектры уклонов и возвышений морской поверхности, основанных на численном моделировании физических процессов и явлений, участвующих в формировании поля яркости морской поверхности.
- Разработка метода и алгоритмов высокопроизводительной регистрации пространственных спектров морского волнения для автоматизации оперативного космического мониторинга обширных акваторий.

- Формирование набора мер и методики оценки качества работы созданных алгоритмов.
- Разработка программного обеспечения, реализующего разработанные алгоритмы и проведение вычислительных экспериментов по оценке результатов работы этих алгоритмов.
- Валидация методов восстановления спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по данным подспутниковых измерений.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- Разработан новый вычислительный метод и алгоритм повышения разрешающей способности космической аппаратуры основанные на пространственно-спектральном анализе улучшаемых изображений и синтезе изображения высокого разрешения с использованием специально разработанных алгоритмов восполнения спектров мощности и фазовых спектров в области высоких пространственных частот, экстраполяции спектров мощности улучшаемых изображений в область высоких пространственных частот с использованием известных эмпирических закономерностей, в том числе с помощью степенной аппроксимации спектров мощности а также с использованием фазового спектра, полученного из опорных изображений.
- Разработан новый комплексный метод повышения пространственного разрешения изображений, объединяющий метод сверхразрешения на основе искусственных нейронных сетей, в том числе генеративно-состязательных, не требующий априорной информации о деталях изображения, и метод слияния, который обеспечивает высокое качество детализации с использованием алгоритмов, основанных на вероятностном анализе, пространственном спектральном анализе.

- Разработаны метод и алгоритм восстановления трёхмерной поверхности объектов в реальном времени на основе измерения мер корреляции фрагментов слабоконтрастных изображений и точечных признаков с использованием сверхразрешения и коррекцией недостоверной информации. Метод использует пирамидальное представление данных и производит последовательные уточнения результатов с использованием априорной модели наблюдаемого объекта.
- Предложен подход для автоматического восстановления структурных моделей антропогенных ригидных объектов по результатам сегментации спутниковых изображений свёрточными нейронными сетями при обработке спутниковой информации.
- Разработан метод восстановления пространственных спектров уклонов и возвышений поверхности волнения по аэрокосмическим оптическим изображениям, основанный на применении восстанавливающих операторов, учитывающих нелинейную модуляцию поля яркости уклонами морской поверхности, и представляемых в виде пространственно-частотных фильтров с параметрами, зависящими от условий формирования изображений и волнообразования. Построение восстанавливающих операторов включает в себя численный синтез полей уклонов морской поверхности с заданным пространственным спектром и моделирование поля яркости с учётом условий освещения.
- Впервые в результате процедур численной оптимизации подобраны значения параметров нелинейных восстанавливающих фильтров, эффективно работающие для широкого диапазона условий волнообразования в условиях развитого и развивающегося волнения, а также в присутствии волн зыби. При получении оптимальных параметров пространственно-частотных фильтров выполнялось сопоставление спектров волнения, измерен-

ных дистанционно по спутниковым изображениям, со спектрами морского волнения, измеренными с высокой точностью контактными методами в контролируемых условиях.

- Предложен новый метод измерения двумерных пространственных спектров возвышений морских волн по одиночным спутниковым изображениям, включающий применение многопараметрического восстановливающего оператора, учитывающего нелинейную модуляцию поля яркости уклонами поверхности для восстановление двумерных спектров уклонов и возвышений при всех значениях волнового вектора, не попадающих в угловой сектор дефицита информации; аппроксимацию углового распределение энергии волн с использованием усеченного ряда Фурье и восстановление двумерного спектра возвышений на основе полученной аппроксимации углового распределение энергии волн.
- Продемонстрирована возможность использования предложенного метода измерения двумерных пространственных спектров возвышений морских волн в экспериментах, проведенных в различных акваториях. Подтверждена адекватность дистанционного измерения как средних по времени спектров морской поверхности, так и вариаций этих спектров, обусловленных нестационарностью волнения с использованием изображений высокого пространственного разрешения и разработанных восстановливающих операторов. Экспериментально подтверждено, что предложенный метод может успешно применяться при исследовании антропогенных и естественных аномальных процессов и явлений, вызывающих деформации пространственных спектров поверхностного волнения.

Теоретическая и практическая значимость работы

- Теоретическая значимость состоит в создании и апробации новых методов анализа спутниковых изображений для исследования объектов земной по-

верхности и океана. В работе используется единые подходы к обработке аэрокосмических изображений объектов различной физической природы. Эти подходы основаны на совместном использовании пространственного спектрального анализа, статистического анализа, численном моделировании физических процессов, синтезе изображений и машинном обучении. Разработанные методы представлены на научных конференциях, в том числе международных, опубликованы в рецензируемых научных журналах.

- Практическая значимость состоит в возможности использования разработанных методов и алгоритмов для решения практических задач, требующих дистанционного измерения характеристик объектов и процессов на земной поверхности по аэрокосмическим изображениям.
- Для практических применений актуальны методы, разработанные в рамках настоящего исследования, позволяющие проводить автоматическую обработку серий спутниковых изображений и выполнять измерение высот объектов с использованием их теней и вспомогательной информации об условиях съемки, в том числе из метаданных космической съемки.
- Практическая значимость метода дистанционного измерения пространственных спектров морского волнения состоит в том, что он позволяет исследовать различные процессы и явления на поверхности и в приповерхностном слое океана в широком диапазоне пространственных масштабов.
- Важным практическим результатом работы является создание высокопроизводительного метода, алгоритмов и исследовательского программного обеспечения для регистрации спектров морской поверхности по космическим изображениям, которые могут применяться для решения задач оперативной океанографии, в интересах охраны окружающей среды и рационального природопользования акваторий морей и океанов, в том числе

с использованием многоспутниковых систем космического мониторинга. Проведённые вычислительные эксперименты показали значительное увеличение производительности регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений за счёт распараллеливания вычислений.

- Проведённые исследования позволили отработать методы и технологии комплексного наземно-космического мониторинга морских акваторий для получения таких важных океанографических характеристик, как спектры поверхностного волнения.
- В диссертации сформулирован общий подход в решении важнейших задач спутникового мониторинга.

Разработанные методы и алгоритмы реализованы:

- при создании макета исследовательского программного комплекса повышения качества изображений (ТАШУ.00242), разработанного в ФИЦ ИУ РАН в 2019-2020 г. в ходе прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Разработка методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения аэрокосмических изображений для мониторинга объектов железнодорожного транспорта» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0312);
- при создании макета исследовательского программного комплекса повышения разрешающей способности космической аппаратуры (ИПК ПРКА) на основе методов и алгоритмов, разработанных в ходе составной части научно-исследовательской работ (СЧ НИР) «Разработка методов и математических моделей повышения разрешающей способности космической аппаратуры наблюдения инфракрасного и микроволнового диапазонов для бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) мало-

массогабаритных космических аппаратов и их экспериментальная отработка» (Шифр «Мониторинг-СГ-2.5.4») научно-технической программы Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» на 2013-2017 годы (шифр «Мониторинг-СГ»);

- при создании программного обеспечения, эксплуатационной и методической документации для вторичной обработки космических изображений, получаемых с космического аппарата «Egyptsat-A» в РКК "Энергия";
- при выполнении прикладных научных исследований в НИИ «АЭРОКОСМОС» в 2014-2016 г по теме «Разработка методов и создание экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации, включая Крымский полуостров, на основе спутниковых и контактных данных» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110) в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»;
- при создании макета аппаратно-программного комплекса мониторинга пространственной структуры волнения в НИИ «АЭРОКОСМОС» в 2016-2019 г в ходе работ по теме «Разработка методов и создание макета аппаратно-программного комплекса мониторинга пространственной структуры волнения в широком диапазоне частот по оптическим и радиолокационным космическим изображениям для выявления антропогенных воздействий на морские акватории» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0234) в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2021 годы»;

- при выполнении исследований в 2020-2021 г. по теме «Разработка фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше, в том числе в арктическом регионе, по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования» при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения №075-15-2020-776.

Разработанные методы и алгоритмы использовались при выполнение работ по грантам РФФИ:

1. «Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС» (номер проекта 19-55-80021);
2. «Метод обобщённой разреженной оптимизации для распознавания сложных ригидных объектов на изображениях и в видеопотоке» (номер проекта 16-51-55019);
3. «Взаимодействие атмосфера-гидросфера в Балтийском бассейне и арктических морях: космический мониторинг с использованием данных различных спектральных диапазонов, восстановление характеристик поверхностного волнения и приповерхностного слоя водной среды по космическим изображениям» (номер проекта 14-05-91759);
4. «Разработка методов мониторинга состояния окружающей среды по гиперспектральным данным дистанционного зондирования Земли с использованием геопортальных инструментов их обработки» (номер проекта 13-05-12019);
5. «Разработка параллельных алгоритмов и реализация программного обеспечения для распределенной среды по обработке высокоскоростных потоков графической информации для выделения из нее фрагментов имеющих характерные признаки» (номер проекта 12-07-00778);

6. «Исследование проблем и разработка методов и средств восстановления трёхмерных характеристик объектов в мультимедийных системах компьютерного зрения реального времени» (номер проекта 05-07-90096);
7. «Модель анизотропной диффузии в приложении к обработке данных» (номер проекта 99-01-01066).

Методология и методы исследования. При разработке методов повышения пространственного разрешения изображений применялся пространственный спектральный анализ, метод преобразования Фурье, метод байесовской классификации, метод главных компонент, статистические методы классификации и анализа данных. При обработке больших массивов данных использовались нейросетевые методы, в том числе свёрточные и генеративно-состязательные сети. При построении математических моделей и операторов, восстанавливающих пространственные спектры морской поверхности применялся метод численного моделирования физических процессов, участвующих в формировании полей яркости, регистрируемых аппаратурой дистанционного зондирования. Для валидации разработанных методов и алгоритмов проводились комплексные эксперименты, включающие спутниковую съемку и подспутниковые измерения на месте.

Положения, выносимые на защиту.

- Методы и алгоритмы повышения пространственного разрешения мультиспектральных изображений, включающие вычисление спектров мощности и фазовых спектров улучшаемых изображений с помощью Фурье-преобразования, восполнение спектров мощности и фазовых спектров в области высоких пространственных частот, формирование улучшенных изображений с помощью обратного Фурье-преобразования. Восполнение спектров мощности и фазовых спектров в области высоких пространственных частот выполняется с использованием энергетического и фазового спектров

вспомогательного изображения той же сцены, имеющего более высокое пространственное разрешение.

- Метод и алгоритмы повышения разрешения в нескольких каналах мультиспектрального изображения, основанные на использовании опорных панхроматических изображений и учёте статистических закономерностей, связывающих панхроматические изображения с мультиспектральными на локальных участках поверхности, таких как свойство пространственной локальности объектов в пространстве изображения и близость значений яркости пикселов в спектральных каналах близких областей в случае принадлежности одному объекту.
- Комплексный подход к повышению информативности аэрокосмических изображений, основанный на методах машинного обучения, который позволяет автоматизировать наиболее трудоемкие процессы обработки спутниковых изображений, такие как повышение пространственного разрешения изображений, семантическая сегментация изображений для выделения антропогенных объектов, а также восстановления пространственных характеристик этих объектов.
- Метод и алгоритмы восстановления пространственных спектров уклонов и возвышений поверхности волнения по аэрокосмическим оптическим изображениям, основанные на применении восстанавливающих операторов, учитывают нелинейную модуляцию поля яркости уклонами морской поверхности. Метод включает в себя численный синтез полей уклонов морской поверхности с заданным пространственным спектром, моделирование поля яркости с учётом условий освещения и условий формирования изображений.
- Метод и алгоритмы параметризации пространственно-частотных фильтров для восстановления спектров поверхности волнения по спектрам

оптических изображений, с использованием параметров, используемых при численном моделировании, таких как угловая высота Солнца. Значения параметров восстанавливающих пространственно-частотных фильтров получены путем минимизации меры расхождения спектров волнения, полученных по спутниковым изображениям с данными подспутниковых измерений.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на многих конференциях, в том числе на следующих:

- 20-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, Москва, 14–18 ноября 2022 г.;
- Всероссийская научная конференция «Моря России: вызовы отечественной науки». Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, 26–30 сентября 2023 г.;
- 20-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов» (ММРО-2021). Вычислительный центр Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, 7–10 декабря 2021 г.;
- 19-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, Москва, 15–19 ноября 2021 г.;
- Всероссийская научная конференция «Моря России: год науки и технологий в РФ - десятилетие наук об океане ООН». Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, 20–24 сентября 2021 г.;
- 13-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации». Москва, Россия, 8–11 декабря 2020 г.;

- 18-я Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». ИКИ РАН, Москва, 16–20 ноября 2020 г.;
- Int. Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020 Earth and Planetary Sciences. Альбена, Болгария, 16–25 августа 2020 г.;
- 17-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, Москва, 11–15 ноября 2019 г.;
- Вторая международная конференция «Ситуация, язык, речь. Модели и приложения». Москва, Россия – Рим, Италия, 8–11 октября 2019 г.;
- Всероссийская научная конференция «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». г. Севастополь, 23–28 сентября 2019 г.;
- 16-я Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, Москва, 12–16 ноября 2018 г.;
- 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Альбена, Болгария, 30 июня – 6 июля 2019 г.;
- 12th International Conference «Intelligent Data Processing: Theory and Applications». Гаэта, Италия, октябрь 8–12 октября 2018 г.;
- 11th International Conference «Intelligent Data Processing: Theory and Applications». Барселона, Испания, 10–14 октября 2016 г.

Достоверность полученных выводов подтверждается использованием обоснованных методов и проведением численных экспериментов для сравнения разработанных методов с традиционными.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 35 печатных работах в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus и материалах конференций. По результатам диссертации получено 6 патентов РФ, 10 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора представлен основными положениям, выносимыми на защиту и опубликованными работами по теме диссертации. Во всех цитируемых работах участие автора является ключевым. Им ставились задачи, предлагались подходы к их решению, развивались конкретные способы реализации предложенных подходов. Автор намечал пути разработок, планировал и проводил численные расчёты. Вклад диссертанта в опубликованных работах был определяющим. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Личный вклад автора состоял в разработке методов и алгоритмов, проведении вычислительных экспериментов, организации комплексных экспериментов и участии в их выполнении, обработке и анализе спутниковых изображений и данных подспутниковых экспериментов. Выводы, представленные в работе, сделаны лично автором.

Структура диссертации.

Диссертация включает введение, пять глав, заключение и библиографию. Общий объём диссертации составляет 361 страницу, из них 316 страниц текста, включающих 96 рисунков и 12 таблиц. Библиография состоит из 367 наименований на 45 страницах.

Краткое содержание работы.

Содержание глав диссертации следующее.

Глава 1. Приведена классификация методов повышения пространственно-го разрешения аэрокосмических изображений. Даны основные понятия и определения, используемые в работе. Описана разработка методов повышения разрешения изображений, основанных на пространственно-спектральном анализе

и синтезе изображений, как путем слияния с опорным панхроматическим изображением, так и без использования опорного изображения. Разработан метод повышения разрешения космических изображений, основанный на использовании опорных изображений, имеющих более высокое пространственное разрешение, который заключается в предобработке улучшаемых и опорных изображений, экстраполяции спектров мощности улучшаемых изображения в области высоких пространственных частот с использованием известных эмпирических закономерностей, синтезе изображений высокого разрешения в заданном спектральном диапазоне с использование фазовых спектров, полученных из опорных изображений.

Представлен метод повышения разрешения космических изображений, основанный на фурье-анализе для получения энергетических и фазовых спектров, экстраполяции энергетических спектров улучшаемого изображения в области высоких пространственных частот, синтезе изображений высокого разрешения заданного спектрального диапазона с использованием фазовых спектров, рассчитанных по вспомогательному изображению, полученному методом фильтрации.

Разработан вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных и гиперспектральных изображений, основанный на использовании опорных панхроматических изображений, учёте статистических закономерностей, связывающих панхроматические изображения с мультиспектральными на локальных участках поверхности.

Результаты, приведённые в главе, опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus [51, 64, 74, 83].

Глава 2. В этой главе описаны разработанные методы обработки и анализа данных дистанционного зондирования, развитые рамках работ для получения информации об антропогенных объектах с использованием традиционных и нейросетевых подходов. Представлены вычислительный метод повышения про-

пространственного разрешения космических изображений с использованием векторной модели представления априорной информации, предназначенный для повышения четкости границ. Описан метод предварительного выделения антропогенных объектов (на примере автомобилей) на аэрокосмических изображениях, основанный на выделении областей с близкими цветовыми характеристиками, и позволяющий найти заданные объекты (их положение, ориентацию, размеры) при минимизации ошибок первого и второго рода. Описан комплексный подход к применению искусственных нейронных сетей (ИНС) для сегментации изображений и повышения пространственного разрешения изображений, используемых для выделения антропогенных объектов и измерения их трёхмерных характеристик. Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus [23, 41, 75, 84, 85, 118, 261, 286].

Глава 3. В главе рассматривается задача комплексирования данных для дистанционных измерений трёхмерных характеристик различных объектов и анализируется точность и устойчивость восстановления этих характеристик в системах компьютерного зрения. Приведено описание метода и алгоритмов восстановления трёхмерной формы объектов в реальном времени. Представлено экспериментальное исследование предложенных методов и алгоритмов, показаны примеры их практического применения. Подробно описан комплексный подход к применению искусственных нейронных сетей (ИНС) для извлечения и интерпретации пространственной информации (трехмерных признаков) об антропогенных объектах (в том числе об объектах хозяйственной инфраструктуры) из спутниковых изображений.

Результаты, описанные в главе, опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus [6, 60, 61, 105, 107, 110, 113, 231].

Глава 4 В этой главе описывается разработка методов дистанционного измерения пространственных спектров водной поверхности по оптическим изоб-

ражениям с учётом физических условий, определяющих нелинейный характер модуляции поля яркости уклонами поверхности. Описан физический механизм формирования поля яркости морской поверхности в результате отражения от неё света, приходящего из верхней полусфера и преломления на ней восходящего светового потока, образующегося при рассеянии света в водной толще. На основе анализа условий применения известных методов восстановления спектров волнения, ограничивавшихся линейной моделью формирования поля яркости, а также параметрических методов показана необходимость разработки новых методов и алгоритмов восстановления пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям, учитывающих нелинейный характер зависимости между полем яркости и уклонами морской поверхности. Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus [27, 28, 36, 38, 59, 111, 112, 171, 175, 176, 302].

Глава 5. В главе 5 приводятся результаты исследования спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн, восстановленных по спектрам оптических космических изображений с применением восстанавливющих операторов. Для калибровки и проверки адекватности разработанного метода используются контактные данные, получаемые при синхронных измерениях с помощью решетки струнных волнографов, с результатами измерений, выполненных с помощью дрейфующих волновых буев, а также со спектрами, полученными путем обработки стереоизображений, снятых со стационарной платформы. Результаты, описанные в главе, опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus [7, 19, 27–29, 58, 171, 176].

Глава 1

Методы повышения пространственного разрешения изображений при дистанционных измерениях

В главе приведена классификация подходов, используемых для повышения пространственного разрешения изображений при дистанционных измерениях. Описаны базовые методы повышения пространственного разрешения изображений, используемые в настоящей работе. Описана разработка методов повышения разрешения изображений, основанных на пространственно-спектральном анализе и синтезе изображений, как путем слияния с опорным панхроматическим изображением, так и без использования опорного изображения. Описан метод повышения разрешения космических изображений с использованием опорных изображений, имеющих более высокое пространственное разрешение, основан на синтезе изображений высокого разрешения в заданном спектральном диапазоне с использованием фазовых спектров, полученных из опорных изображений. Описан также метод повышения разрешения космических изображений без опорных изображений основанный на экстраполяции спектров мощности улучшаемого изображения в области высоких пространственных частот и синтезе изображений высокого разрешения с использованием фазовых спектров, полученных из вспомогательного изображения, полученного методом фильтрации. Разработан вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных и гиперспектральных изображений, основанный на использовании опорных панхроматических изображений, учёте статистических закономерностей, связывающих панхроматические изображения с мультиспектральными на локальных участках поверхности. Результаты настоящей главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в

системах Web-of-Science/Scopus) [51, 64, 74, 83].

1.1. Основные понятия и классификация методов повышения разрешения изображений

Разрешение изображения характеризует степень детализации образов на нем.

Изображение, регистрируемое сенсором при дистанционных измерениях — функция яркости на плоскости (x, y) на регулярной прямоугольной сетке:

$$I(x_i, y_j); x_i = id, y_j = jd, i = \overline{1, h}, j = \overline{1, w}, \quad (1.1)$$

d — размер ячейки. Точки изображения, представленные своими координатами и яркостями, принято называть *пикселами* (от английского *pixel*). В русском языке используется два варианта написания этого термина — *пикセル*, *пиксель*. В рамках настоящей работы используется, как правило, первый вариант написания.

Чем выше разрешение, тем больше деталей можно различить на изображении. Разрешение аэрокосмических изображений может описываться разными характеристиками: пространственное разрешение, размер пикселя, спектральное разрешение, радиометрическое разрешение, временное разрешение [55, 88, 198]. В рамках настоящей работы основной исследуемой характеристикой является *пространственное разрешение*. Полезность спутниковой информации определяется в первую очередь пространственным разрешением, которое здесь понимается как количество пикселов изображений, приходящихся на единицу площади подстилающей поверхности [2, 290]. Пространственное разрешение следует измерять в пикселях на единицу площади поверхности. На практике принято использовать для описания пространственного разрешения физический размер участка поверхности, представленного в пикселе изображения, подразумевая примерное постоянство распределения пикселов по исследуемой поверх-

ности.

Пространственное разрешение аэрокосмических изображений, полученных от систем дистанционного зондирования, выражается как площадь поверхности Земли, захваченной одним пикселом. При уменьшении размера пикселя, повышается детализация элементов сцены.

Основной характеристикой сенсора, влияющий на пространственное разрешение, является мгновенное поле зрения. Область земной поверхности, захватываемая сенсором в текущий момент времени, называется мгновенным полем зрения.

Для фиксированного числа пикселов, пространственное разрешение обратно пропорционально мгновенному полю зрения. Другое определение понимает пространственное разрешение, как детальность информации в области высоких частот спектра изображения. В дистанционном зондировании пространственное разрешение обычно выражается в метрах на пикセル, т. е. задает длину стороны площадки, содержащей один пикセル изображения. Примеры изображений одной и той же территории, имеющих разное пространственное разрешение, представлены на рисунке 1.1. Первое изображение имеет разрешение 5 м/пиксел и получено со спутника SPOT-5. Второе и третье изображения получены загрублением первого и имеют пространственное разрешение 10 м/пиксел и 20 м/пиксел, соответственно.

Актуальна разработка методов получения изображений более высокого разрешения, чем непосредственно регистрируемые аппаратурой. Существуют различные подходы к разработке алгоритмов повышения пространственного разрешения изображений. Одна из возможных классификаций таких подходов:

- По способу восстановления недостающей информации для результирующего изображений высокого разрешения.
- По числу изображений на входе и выходе алгоритма.

Разделение методов повышения разрешений изображений по количеству вход-

ных и выходных изображений можно провести следующим образом [198]:

- SISO (Single Input, Single Output) — подходы, получающие одно входное изображение низкого разрешения и одно результирующее изображение высокого разрешения;
- MISO (Multiple Input, Single Output) — подходы, получающие несколько входных изображений низкого разрешения и одно результирующее изображение высокого разрешения;
- MIMO (Multiple Input, Multiple Output) — подходы, получающие несколько входных изображений низкого разрешения и несколько результирующих изображений высокого разрешения.

По способу восстановления недостающей информации для результирующих изображений высокого разрешения методы повышения разрешений изображений группируются следующим образом [198]:

- методы повышения разрешения изображений на основе интерполяции одиночных изображений;
- регуляризующие методы повышения разрешения изображений на основе анализа одиночных изображений;
- методы суперразрешения на основе анализа последовательностей изображений с использованием фильтрации;
- методы повышения разрешения изображений с использованием априорной информации об объектах, присутствующих на сцене;
- методы повышения пространственного разрешения изображений на основе синтеза пространственно-спектральной информации в каналах.

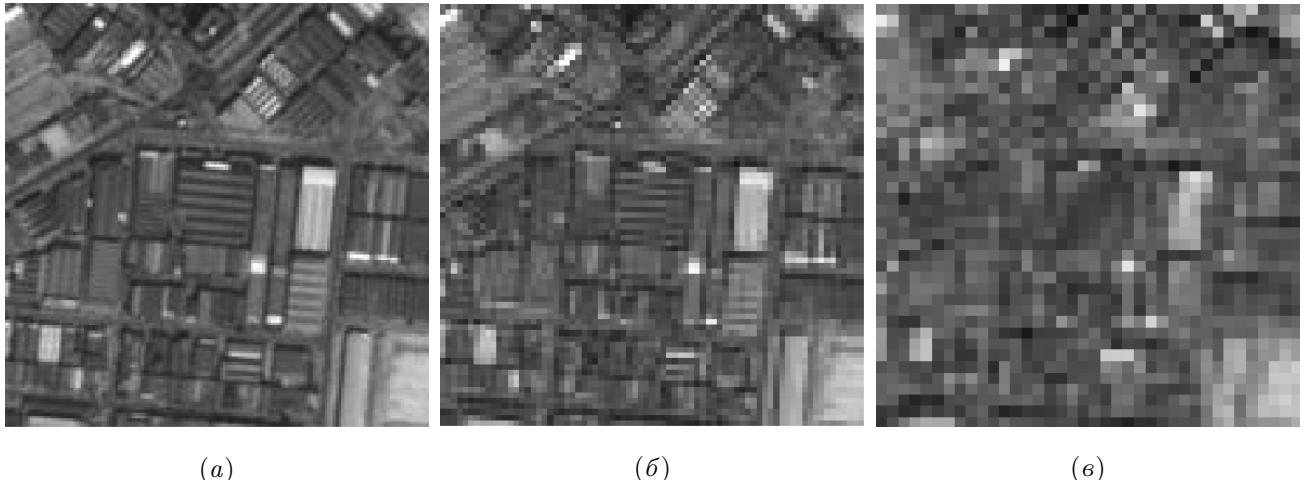


Рис. 1.1. Изображения в различных пространственных разрешениях: 5 м/пиксел (а), 10 м/пиксел (б) и 20 м/пиксел (в)

Спутниковая съёмка также характеризуется спектральным диапазоном пропускания электромагнитных волн, преобразуемых впоследствии в отдельные каналы цифрового изображения. Когда сенсор имеет несколько (3 и более) спектральных каналов, получаемые им изображения называются мультиспектральными. Если число спектральных диапазонов измеряется сотнями или тысячами, изображение называется гиперспектральным [346]. Обычно в процессе мультиспектральной и гиперспектральной съёмок создается ещё одно изображение — панхроматическое. В этом изображении зарегистрирована информация об отражённом сигнале в широком диапазоне длин волн: от видимого до теплового инфракрасного. Пространственное разрешение панхроматического канала при одинаковом уровне сигнал-шум выше, чем у мультиспектральных/гиперспектральных каналов за счёт большей ширины регистрируемой полосы спектра.

Современный пользователь может получить доступ к спутниковым данным через различные платформы наблюдения земной поверхности, в том числе с космических аппаратов (КА) «Ресурс-П» [135], SPOT [333], Landsat 7 [266], QuickBird, IKONOS [243], Orbview [314] и многие другие. Частота получения снимков одной и той же сцены увеличивается с увеличением количества КА. С выводом на орбиту группировок микроспутников, таких как PlanetScope

[317], становится возможным получение полного покрытия мультиспектральными снимками в высоком разрешении (3 – 5 метров) всей поверхности Земли с частотой один раз в день.

Большинство КА регистрируют набор мультиспектральных каналов и взаимосвязанное с ними панхроматическое изображение. Объединяя эти данные с помощью специальных методов слияния (паншарпенинга), можно повысить пространственное разрешение мультиспектральных каналов до разрешения панхроматического канала [329].

Существуют различные способы восполнения недостающих данных при повышении разрешения. Как правило, привлекаются дополнительные источники информации: растровые изображения более высокого разрешения другого спектрального диапазона [16], векторные данные, полученные при подспутниковых измерениях и из других источников [81, 120]. Хорошо развиты методы слияния растровых изображений (паншарпенинга), основанные на математической морфологии [53], вероятностном и пространственно-спектральном подходах [51, 64]. Существуют приложения, в которых дополнительная информация недоступна. Подходы, используемые в этом случае, развивались от передискретизации полиномиальными методами [136, 220] и фильтрами Ланцоша [343] до нелинейных моделей, существенно зависящих от области применения, таких, как анизотропная диффузия [145, 184, 272], эвристики с выделением контуров [334, 337], пространственно-спектральный синтез [34, 39, 51].

Выбор того или иного подхода для восполнения информации при повышении пространственного разрешения изображений связан с характером задачи, решаемой с помощью дистанционных измерений. Поэтому целесообразно выбирать такие методы восполнения информации, которые адекватно передают соответствующие характеристики областей изображений, а также наблюдаемых объектов и явлений. При выборе подходов к восполнению информации при повышении пространственного разрешения спутниковых изображений могут использоваться модели полей излучения на входе систем дистанционного зондиро-

вания [11]. Модели создаются для того, чтобы выделить наиболее существенные отличительные признаки для идентификации и распознавания процессов и явлений, интересующих исследователя.

Одна из основных проблем, возникающих при построении таких моделей, состоит в обеспечении адекватности модели реальным процессам и явлениям. Для решения этой проблемы необходима валидация модели, которая достигается путём сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментальных измерений и теоретических расчётов, и корректировки модели в случае расхождения результатов. При решении многих фундаментальных и прикладных задач необходимо измерение вероятностных, пространственных спектральных, корреляционных характеристик, которые позволяют описывать различные процессы и явления, происходящие на планете Земля, как на суше, так и на поверхности океанов и морей. Важное значение имеет также восстановление трёхмерной структуры изучаемых объектов по двумерным изображениям, получаемым при дистанционном зондировании. Поэтому модели полей излучения условно разделяются на статистические, пространственные спектральные и структурные [11]. Соответствующим образом классифицируются и методы синтеза стохастических полей яркости с заданными характеристиками, предназначенных для моделирования систем дистанционного зондирования [11, 13].

1.2. Численные критерии оценки качества при повышении разрешения изображений

При разработке методов повышения пространственного разрешения важен выбор критериев оценки качества изображений. В настоящее время разработано и используется большое число мер, позволяющих оценивать качество изображений при развитии новых методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения [290]. Обычно используется сравнение изображения, полученного в результате обработки развиваемым методом, с эталонными данными, полу-

ченным методами, позволяющими получить лучшую точность. При этом предполагается, что в результате применения развивающегося метода повышения пространственного разрешения должны достигаться наилучшие значения одной или нескольких мер, используемых для оценки качества полученных изображений. Эталонные данные для сравнения могут быть получены различными методами: с помощью аппаратуры, имеющей заранее лучшее пространственное разрешение; путём съёмки в заранее лучших условиях (например, с меньшей высоты); проведением измерений "на месте" (подспутниковые эксперименты, наземные измерения). Проведенный анализ показал, что с точки зрения сравнения улучшенного изображения с заданным эталоном целесообразно использовать меры сравнения изображений, которые приведены ниже [350, 353].

Среднеквадратичная ошибка (RMSE)

Среднеквадратичная ошибка RMSE (англ. Root Mean Square Error) представляет среднеквадратичное отклонение (СКО) яркостей пикселов между обработанным и эталонным изображениями.

При измерении на однородной области изображения, среднеквадратичная ошибка позволяет достаточно хорошо оценить спектральное качество изображения. Чем меньше среднеквадратичная ошибка, тем больше сходство обработанного изображения с эталоном.

$$RMSE(I_r, I_e) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_r(i, j) - I_e(i, j))^2}{N^2}}, \quad (1.2)$$

где

$I_r(i, j)$ — значение яркости пикселя результирующего обработанного изображения I_r с координатами (i, j) ;

$I_e(i, j)$ — значение яркости пикселя эталонного изображения I_e с координатами (i, j) ;

N — число пикселов в изображении.

Нулевое значение RMSE показывает полное совпадение изображений. Чем

меньше RMSE, тем лучше.

Также для сравнения изображений используется нормализованная среднеквадратичная ошибка NRMSE (англ. Normalized RMSE) [210] :

$$NRMSE(I_r, I_e) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_r(i, j) - I_e(i, j))^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_e(i, j)^2}}. \quad (1.3)$$

Мера PSNR

Мера отношения сигнал к шуму (PSNR — peak signal-to-noise ratio). Мера, которая используется для оценки качества обработанных изображений, и означает соотношение между максимальным значением сигнала к уровню шума, искажающего значения сигнала. PSNR измеряется в логарифмической шкале и находится по формуле через среднеквадратичную ошибку RMSE, вычисляемую по формуле 1.2:

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\max(I_e)}{RMSE}. \quad (1.4)$$

Чем больше PSNR, тем лучше. Высокое значение PSNR означает определенную схожесть обработанного и эталонного изображений, но оно не дает гарантирует хорошего визуального качества результата обработки.

Достоинства данной меры: не чувствительна к одиночным артефактам. Недостатки меры: чувствительна к общему изменению яркости; не отражает субъективных визуальных оценок.

Индекс структурного сходства SSIM

Индекс структурного сходства (от англ. SSIM — structure similarity) является одним из методов измерения схожести между двумя изображениями. Это метод полного сопоставления на основе исходного изображения (эталонного, без искажений). Мера SSIM является развитием мер PSNR, RMSE, которые оказались плохо совместимы с физиологией человеческого восприятия.

Отличительной особенностью метода является учёт структурного изменения информации. Учитывается, что пиксели имеют сильную взаимосвязь, когда

они близки пространственно. Данные зависимости несут важную информацию о структуре объектов и о сцене в целом.

Мера SSIM рассчитана на различные размеры окна. Разница между двумя окнами $x \in I_r$ и $y \in I_e$, имеющими одинаковый размер $N \times N$:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (1.5)$$

где

μ_x — среднее значение яркости в окне x ;

σ_x^2 — дисперсия яркости в окне x ;

σ_y^2 — дисперсия яркости в окне y ;

σ_{xy} — ковариация яркостей в окнах x и y .

Константы c_1 и c_2 вычисляются отдельно по следующим формулам:

$$c_1 = k_1 L, c_2 = k_2 L, \quad (1.6)$$

где L — динамический диапазон пикселей (обычно $L = 2^n - 1$, где n — число пикселов на бит), $k_1 = 0.01$ и $k_2 = 0.03$ — константы.

Чем больше SSIM, тем лучше. Диапазон значений от 0 до 1.

Среднее значение индекса структурного сходства MSSIM

Эта мера используется для оценивания общего качества изображения, путем усреднения индекса структурного сходства $SSIM$. Чем выше получается значение, тем выше спектральное и радиометрическое качество обработанных изображений. Для всех найденных значений $SSIM$ вычисляется среднее арифметическое значение, которое позволяет оценить степень сходства оригинального и обработанного изображений. Мера $MSSIM$ лежит в пределах от -1 до 1. Чем больше $MSSIM$ тем лучше. Значение 1 достигается при полном совпадении изображений.

Мера $MSSIM$ учитывает структуру изменения информации, то есть взаимосвязь между пикселями, располагающимися пространственно близко друг к другу. Эта зависимость несёт важную информацию о структуре изображения,

поэтому её учёт помогает лучше сопоставить оценку качества изображения с человеческим восприятием. MSSIM рассчитывается на различных окнах изображения размера N.

Универсальный индекс качества (Q-индекс)

Универсальный индекс качества изображения является частным случаем индекса структурного сходства $SSIM(x, y)$, при $c_1 = c_2 = c_3 = 0$

$$Q(I_e, I_r) = \frac{\sigma_{I_e I_r}}{\sigma_{I_e} \sigma_{I_r}} \frac{2\overline{I_e I_r}}{\overline{(I_e)^2} + \overline{(I_r)^2}} \frac{2\sigma_{I_e} \sigma_{I_r}}{\overline{(\sigma_{I_e})^2} + \overline{(\sigma_{I_r})^2}}, \quad (1.7)$$

где $\sigma_{I_e I_r}$ — выборочная ковариация I_e и I_r , σ_{I_e} — выборочная дисперсия I_e , σ_{I_r} — выборочная дисперсия I_r , $\overline{I_e I_r}$, $\overline{I_e}$, $\overline{I_r}$ — выборочные средние $I_e I_r$, I_e , I_r соответственно. Q-индекс изменяется в диапазоне $[-1, 1]$, при этом 1 показывает полное совпадение сравниваемых изображений.

Чем больше значение Q , тем выше качество обработанного изображения.

Мера SAM

SAM (SpectralAngleMapper) — угол между соответствующими пикселями эталонного I_e и обработанного (результатирующего) изображения I_r . Вектор имеет число компонентов, соответствующее числу каналов данного пикселя:

$$SAM(I_e, I_r) = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \arccos \frac{\langle I_e(m, n), I_r(m, n) \rangle}{\|I_e(m, n)\| \|I_r(m, n)\|}, \quad (1.8)$$

где I_e , I_r — эталонное и результатирующее изображения соответственно, $I_e(m, n)$ — вектор яркостей каналов пикселя с координатами (m, n) эталонного изображения, $I_r(m, n)$ — вектор яркостей каналов пикселя с координатами (m, n) результтирующего изображения, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — скалярное произведение, $\|\cdot\|$ — норма вектора яркости. Нулевое значение угла показывает полное совпадение изображений. Чем меньше SAM, тем лучше.

Индекс различия ERGAS Индекс различия ERGAS вычисляется по формуле

$$ERGAS(I_e, I_r) = \frac{100}{R} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(\frac{RMSE(I_e^l, I_r^l)}{\mu(I_e^l)} \right)^2}, \quad (1.9)$$

где $RMSE$ — среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле 1.2, R — отношение между величинами пространственного разрешения панхроматического и мультиспектрального изображений, $\mu(I_e)$ — среднее значение канала l эталонного изображения, L — количество каналов. Полное совпадение сравниваемых изображений соответствует нулевому значению индекса ERGAS.

Таким образом, сформирован набора мер и методика оценки качества работы созданных алгоритмов, для использования при разработке методов повышения пространственного разрешения.

1.3. Пространственно-спектральный подход к анализу и синтезу изображений

При повышении пространственного разрешения изображения необходимо синтезировать данные в матрице пикселов, каждый из которых соответствует участку поверхности, имеющему меньшие физические размеры, чем участки, представленные в пикселях реального изображения. При синтезе недостающей информации целесообразно использовать математические модели, которые адекватно воспроизводят физические процессы, которые происходят при формировании поля яркости, регистрируемого сенсорами аппаратуры дистанционного зонирования. Проведённые многочисленные исследования показали, что хорошие результаты могут быть получены при использовании модели, основанной на пространственно-спектральном анализе изображений и синтезе на основе характеристик пространственных спектров полей яркости [11, 13, 34, 39, 111, 116].

1.3.1. Основные положения пространственно-спектрального анализа изображений

Значительный интерес представляют методы синтеза стохастических текстур, имеющих контролируемые пространственные спектральные характеристики [11, 13, 111]. Базовый метод синтеза стохастических полей яркости основан на генерации случайного фазового спектра с заданными вероятностными характеристиками, формировании энергетического спектра (называемого часто спектром мощности) из известных модельных соображений, и выполнении обратного Фурье-преобразования для получения синтезированного поля яркости с заданными пространственно-спектральными характеристиками.

Метод синтеза изображений основан на анализе пространственных спектров изображения: энергетического спектра (ЭС) и фазового спектров (ФС). Вместо термина «энергетический спектр» часто используются термины «спектральная плотность мощности», «спектр мощности» [13, 111]. Энергетический спектр — функция, описывающая распределение мощности сигнала в зависимости от пространственной частоты, то есть мощность сигнала, нормированную на единичные интервалы пространственных частот.

Энергетический спектр $S(\mathbf{k})$ двумерного поля яркости $B(x, y)$ пропорционален квадрату модуля Фурье-образа изображения (часто называемого амплитудным спектром), с множителем, зависящим от размера изображения [73]:

$$S(\mathbf{k}) = S(k_x, k_y) = |\mathbf{F}[B(x, y)]|^2 = \left| \int_{L_x} \int_{L_y} B(x, y) \exp(-j(k_x x + k_y y)) dx dy \right|^2, \quad (1.10)$$

где $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (2\pi/x, 2\pi/y)$ — волновой вектор, компонентами которого являются циклические пространственные частоты k_x, k_y ; \mathbf{F} — оператор преобразования Фурье; $L_x = N_x \Delta_x$, $L_y = N_y \Delta_y$ — линейные размеры изображения по координатам x и y , N_x, N_y — размер изображения по осям x и y в пикселях.

лах; Δ_x, Δ_y — интервалы дискретизации по этим осям, обычно совпадающие с физическими размерами одного пикселя. Изображение $B(x, y)$ восстанавливается по его энергетическому и фазовому $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ спектрам путём обратного преобразования Фурье [73]:

$$B(x, y) = C \mathbf{F}^{-1}[S(\mathbf{k})]^{1/2} \exp[i\Phi(\mathbf{k})], \quad (1.11)$$

где \mathbf{F}^{-1} — оператор обратного преобразования Фурье;

C — постоянный множитель, зависящий от L_x, L_y .

Фазовый спектр изображения определяется соотношением

$$\Phi(x, y) = \operatorname{arctg}(\Im\{F[B(x, y)]\})/\Re\{F[B(x, y)]\}, \quad (1.12)$$

где числитель и знаменатель — мнимая и действительная части Фурьеобраза поля яркости

Информация о двумерных пространственных спектрах различных объектов наблюдения обобщается в виде двумерных пространственных спектральных моделей [11, 13]. Фазовый спектр $\Phi(k)$ хранит информацию о пространственной структуре объектов на наблюдаемой поверхности [123]. Важным свойством является сохранение видимой структуры наблюдаемых объектов при сохранении фазового спектра, даже если происходит значительное изменение энергетического спектра. Это свойство играет важную роль при разработке методов повышения пространственного разрешения изображений, основанных на пространственно-спектральном синтезе, рассмотренных далее в настоящей главе.

Для большинства наблюдаемых поверхностей природного происхождения фазовый спектр $\Phi(k)$ является случайной функцией, которую можно характеризовать плотностью распределения $w_\Phi(\phi)$, вид которой связан с распределением характеристик наблюдаемой поверхности и объектов на ней. Хорошим приближением для функции плотности распределения является равномерное распределение фаз в интервале $(-\pi, \pi)$. Фазовый спектр можно синтезировать

как двумерную матрицу некоррелированных случайных чисел, распределённых по заданному закону.

Для многих пространственно-однородных случайных полей яркости наблюдаемых объектов распределения фазы могут описываться равномерным законом [13, 111]

$$P[\Phi(\nu_x, \nu_y)] = \frac{1}{2\pi}, \quad \Phi(\nu_x, \nu_y) \in [-\pi, \pi].$$

Это свойство фазового спектра используется в Главе 4 для синтеза реализаций морского волнения при построении пространственно-частотных фильтров, восстанавливающих спектры уклонов морской поверхности по спектрам оптических изображений.

В качестве характеристик энергетических спектров при анализе и синтезе изображений могут использоваться различные информативные признаки двумерных пространственных спектров [34, 39]:

- энергетические и структурные свойства — радиально распределение спектральной энергии в заданных интервалах пространственных частот; угловые распределения спектральной энергии в заданных интервалах волновых азимутов; радиально-угловые распределения спектральной энергии в заданных интервалах пространственных частот и волновых азимутов;
- параметры аппроксимации двумерных пространственных спектров, а также, их одномерных разрезов, проекций и интегральных по углу одномерных спектров, среди которых наиболее значимым параметром является показатель степенной аппроксимации вида $S \sim v^{-p}$;
- характеристики формы двумерных фигур, получаемых из двумерных спектров при фиксированных условиях обработки сигналов [12, 13].

При анализе двумерных спектров удобно использовать представление спектра в полярных координатах k, φ :

$$S(\mathbf{k}) = S(k, \varphi), \quad (1.13)$$

где k — модуль волнового вектора $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (k\cos(\varphi), k\sin(\varphi))$, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, φ — волновой азимут.

Использование полярных координат дает удобную возможность перехода к одномерным характеристикам при анализе двумерных пространственных спектров. Такая возможность обеспечивается с помощью таких характеристик как:

- одномерные радиальные и азимутальные разрезы двумерных пространственных спектров;
- интегральные одномерные пространственные спектры.

Одномерные разрезы двумерных спектров Одномерный радиальный разрез $\chi_0(k)$ двумерного пространственного спектра $S(\mathbf{k})$ представляет собой зависимость спектральной плотности, представленной в двумерном пространственном спектре от абсолютного значения волнового вектора (волнового числа k) при фиксированном значении волнового азимута $\varphi = \varphi_0$

$$\chi_0(k) = S(k, \varphi)|_{\varphi=\varphi_0}. \quad (1.14)$$

Аналогично одномерный азимутальный разрез $\zeta_0(\varphi)$ двумерного пространственного спектра $S(\mathbf{k})$ представляет собой зависимость спектральной плотности, представленной в двумерном пространственном спектре от волнового азимута φ при фиксированном значении волнового числа $k = k_0$

$$\zeta_0(\varphi) = S(k, \varphi)|_{k=k_0}. \quad (1.15)$$

Интегральные одномерные пространственные спектры Интегральный одномерный спектр $\chi(k)$ представляет собой результат интегрирования двумерного пространственного спектра $S(\mathbf{k})$ по волновому азимуту φ .

$$\chi(k) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} S(k, \varphi) k d\varphi. \quad (1.16)$$

Обычно такое интегрирование выполняется по всему диапазону изменения волнового азимута, например от $\varphi_1 = -\pi$ до $\varphi_2 = \pi$. Однако, в некоторых специальных случаях диапазон интегрирования может быть ограничен другими значениями φ_1, φ_2 в зависимости от физических особенностей решаемой задачи.

По физическому смыслу одномерный пространственный спектр представляет суммарную мощность волн с волновым числом k и длиной волны $\lambda = 2\pi/k$ независимо от направления их распространения.

Ещё один вид одномерного спектра, может быть определён как одномерная проекция $\chi_\varphi(k)$ двумерного пространственного спектра $S(k_x, k_y)$ на заданное направление φ . Компонента такого одномерного спектра, соответствующая волновому числу \hat{k} представляет собой суммарную мощность всех гармоник двумерного спектра с волновыми векторами, имеющими проекцию \hat{k} на направление разреза.

$$\chi_\varphi(\hat{k}) = \int_{-k_{max}}^{k_{max}} S(\hat{k}, \tilde{k}) d\tilde{k}, \quad (1.17)$$

где

$$\hat{k} = k_x \cos(\varphi) + k_y \sin(\varphi); \tilde{k} = k_x \sin(\varphi) + k_y \cos(\varphi),$$

k_{max} — волновое число, соответствующее максимальной пространственной частоте в спектре, равной половине частоты дискретизации в соответствии с теоремой отсчетов [95, 142, 308].

Одномерные проекции двумерных спектров используются, в частности при при анализе изображений морских волн. Решению таких задач посвящены главы 4, 5 настоящей работы.

Аналогично интегральному одномерному спектру (1.16) определим интегральный одномерный азимутальный спектр, который обычно называют угло-

вым распределением энергии

$$\zeta(\varphi) = \int_{k_1}^{k_2} S(k, \varphi) dk. \quad (1.18)$$

1.3.2. Синтез реализаций полей яркости с заданными пространственными спектрами

Ниже описана реализация метода синтеза полей яркости с заданными энергетическими спектрами и возможностью генерации случайных фазовых спектров, а также приведены примеры применения исследовательского программного обеспечения.

Далее в настоящей главе возможности описанного подхода к синтезу случайных полей яркости будут использованы при разработке методов повышения пространственного разрешения оптических изображений, получаемых при дистанционном зондировании.

Фазовым спектром (Φ С) называется распределение начальных фаз гармонических составляющих Фурье-образа по пространственной частоте.

Рассмотрим принцип работы алгоритма аппроксимации параметров Φ С и Θ С. Как уже отмечалось выше, Фурье-образ $F(v_x, v_y)$ связан с энергетическим спектром $S(v_x, v_y)$ и фазовым спектром $\Phi(v_x, v_y)$. Энергетический $S(v_x, v_y)$ и фазовый $\Phi(v_x, v_y)$ спектры представлены в пространственно-спектральных моделях полей излучения [11, 13, 46]. Эти модели представляют информацию о пространственно-спектральных характеристиках различных природных образований в виде многомерных условных выборочных плотностей распределения информативных признаков. На рисунке 1.2 изображён процесс подготовки данных для синтеза путем аппроксимации двумерных спектров изображений, полученных при обработке данных дистанционного зондирования.

Ниже приведены результаты практического применения метода пространственно-спектрального синтеза каналов мультиспектрального изображения [50,

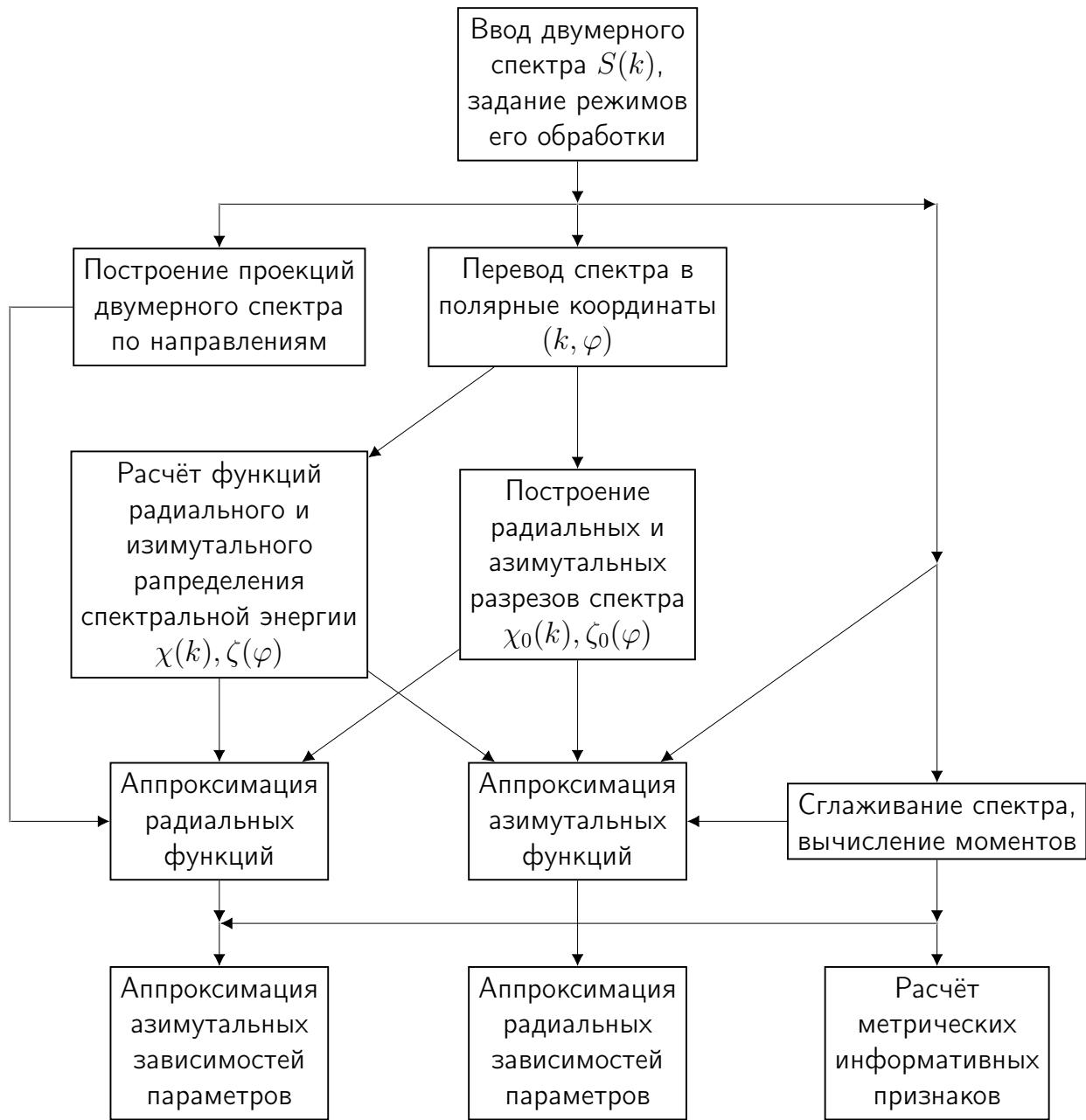


Рис. 1.2. Блок-схема метода анализа двумерных пространственных спектров изображений

147]. Синтез изображения одного из каналов мультиспектрального изображения показан на примере космических данных с использованием данных, полученной аппаратурой MODIS двух космических аппаратов. Назовем их условно "спутник А" и "спутник В". Мультиспектральные изображения, получаемые аппаратурой этих спутников, включают 36 спектральных каналов регистрируемого излучения с длинами волн от 400 нм до 14400 нм. При этом один из каналов спутника В технически неисправен. Изображение в канале с диной волны $\lambda_1 = 1640$ нм содержит сильные помехи. Пример изображения со спутника В

с помехами приведен на рисунке 1.3, *a*. Для сравнения на рисунке 1.3, *б* приведено изображение того участка земной поверхности на той же длине волн, полученное аппаратурой спутника А.

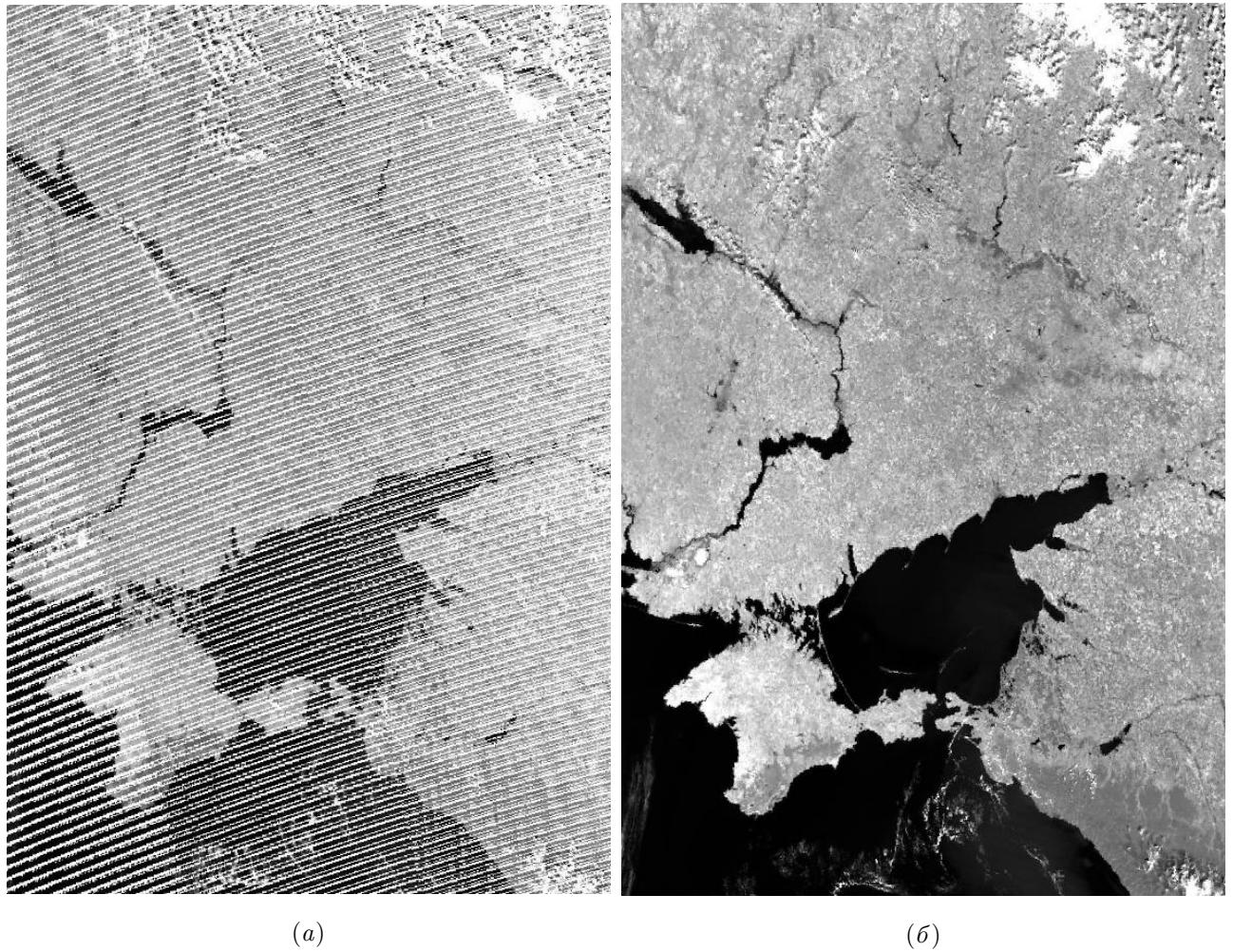


Рис. 1.3. Космические изображения на длине волны λ_1 , полученные аппаратурой двух спутников : (а) — неисправный канал (спутник В); (б) — исправный канал (спутник А)

Для восстановления потерянных данных от неисправного канала спутника В используются данные из исправных каналов спутника В (каналы с длинами волн $\lambda_2 = 469$ нм, $\lambda_3 = 555$ нм, $\lambda_4 = 1240$ нм и $\lambda_5 = 2130$ нм). Имеется также изображение без помех для исправного канала той же длины волны (λ_1) для той же территории, но уже выделенное из мультиспектрального изображения со спутника А, (рисунок 1.3, *б*).

Для синтеза Фурье-образа используется фазовый спектр, полученный из исправных каналов изображения со спутника В (длины волн $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$).

Для восстановления данных в неисправном канале аппаратуры спутника В выполняются следующие операции:

- Вычисляется фазовый спектр $\Phi(\mathbf{k})$ по одному из исправных каналов спутника В (длины волн $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$).
- Вычисляется энергетический спектр $S(\mathbf{k})$ для канала с длиной волны λ_1 по изображению со спутника А для того же участка земной поверхности, что и на изображении со спутника В.
- Синтезируется изображения для неисправного канала спутника В путем обратного преобразования Фурье по формуле 1.11.

Результаты синтеза приведены на рисунке 1.4.

Таким образом, разработанный метод синтеза изображений позволяет синтезировать изображения в каналах мультиспектральной аппаратуры дистанционного зондирования на основе данных их других каналов и пространственных спектральных характеристик, которые могут быть либо определены по данным, получаемых с других космических аппаратов, либо получены с помощью моделей [50, 147]. Это позволяет рассматривать разработанный метод синтеза изображений в качестве основы для разработки методов повышения пространственного разрешения изображений, получаемых при дистанционном зондировании.

На рисунке 1.4 представлены результаты синтеза изображений, для которых фазовый спектр взят с исправных каналов аппаратуры спутника В, а энергетический спектр взят от исправного канала изображения со спутника А (длина волны λ_1 нм, рисунок 1.3, б).

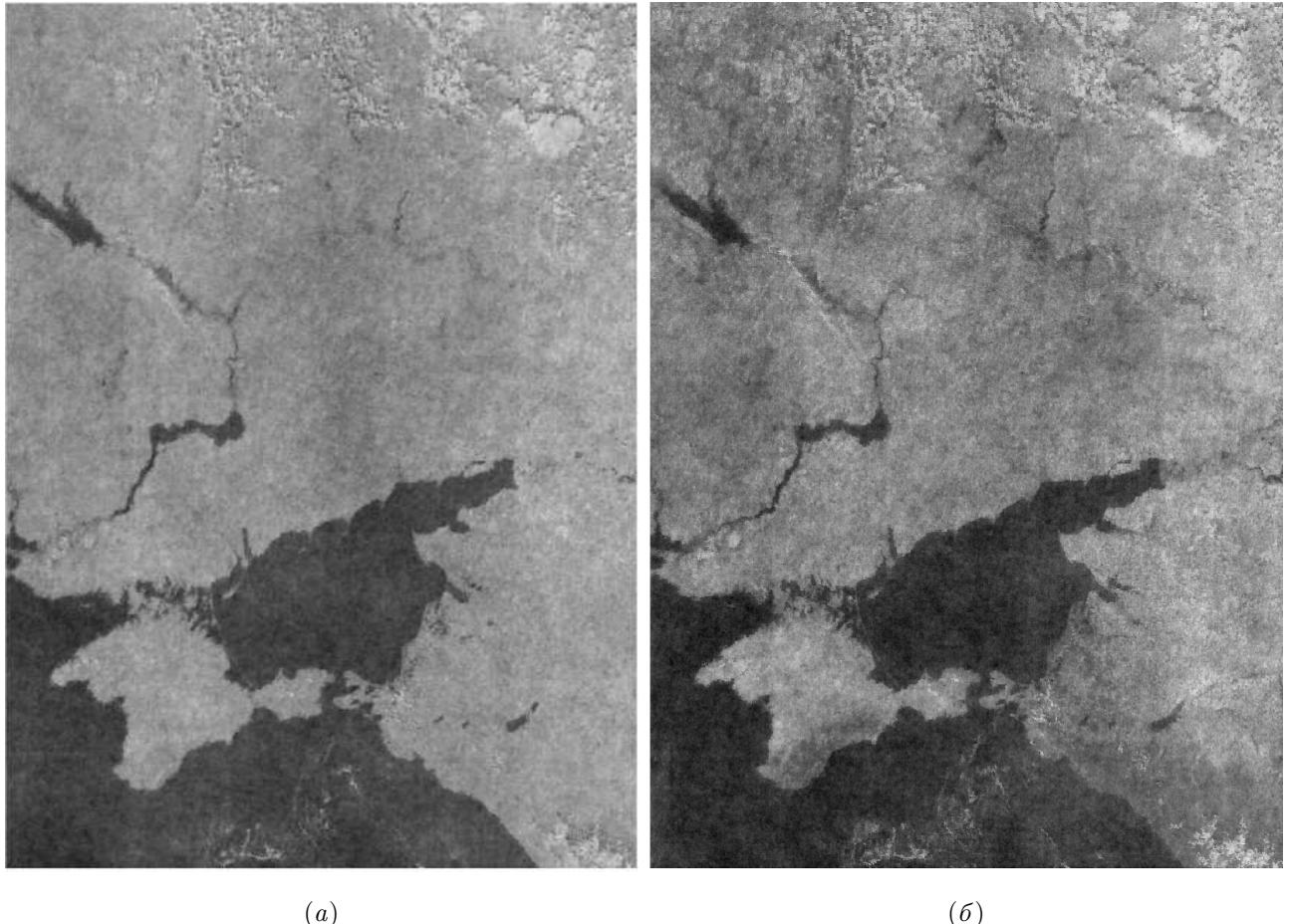


Рис. 1.4. Результаты синтеза неисправного канала (длина волны λ_1) аппаратуры спутника В с использованием в качестве опорных изображений из различных каналов: (а) длина волны λ_4 ; (б) длина волны λ_5

1.4. Повышение разрешения космических изображений методом пространственно-спектрального синтеза с привлечением опорных изображений

1.4.1. Основные положения методов повышения разрешения космических изображений основанных на пространственно-спектральном синтезе

В настоящем разделе приведено описание группы методов пространственно-спектрального синтеза, разработанных для повышения разрешения космических изображений. Эти подходы основаны на методах пространственно-частотной спектрометрии объектов суши и океана, и на методах построения моде-

лей стохастических полей излучения на входе аппаратуры [11, 13, 111]. В приводимом ниже описании методов используются следующие обозначения: I_{H} — исходное изображение низкого разрешения, которое подвергается обработке с целью повышения пространственного разрешения; I_{o} — опорное изображение, используемое в методах для извлечения информации о деталях, которые внедряются в I_{H} ; I_{k} — изображение высокого пространственного разрешения, восстановленное из I_{H} ; I_{e} — эталонное изображение, содержащие различные типы объектов на подстилающей поверхности, с которым сравнивается восстановленное с помощью разработанных методов; $I_{\text{o-p}}$ — изображение, полученное из I_{o} путём приведения его гистограммы к гистограмме I_{e} ; $I_{\text{o-n}}$ — изображение, полученное из I_{o} путём понижения его пространственного разрешения до разрешения изображения I_{H} ; IM_{H} — исходное мультиспектральное изображение низкого пространственного разрешения; IM_{k} — мультиспектральное изображение высокого пространственного разрешения, восстановленное из IM_{H} низкого пространственного разрешения. Результаты пробного применения разработанных методов для космических изображений с различным типом подстилающей поверхности приведены далее. Приведены результаты исследования точности методов.

1.4.2. Повышение разрешения космических изображений с привлечением опорных изображений

В настоящем разделе описывается разработанный метод слияния изображений, полученных в процессе дистанционного зондирования. Далее он именуется как метод спектрального слияния с использованием опорного изображения (метод ССО). Метод ССО основан на внедрении информации о деталях посредством моделирования пространственного спектра изображения в области высоких частот. Ограничением данного подхода является необходимость опорного изображения высокого разрешения, из которого берётся дополнительная информация о деталях, отсутствующая на исходном изображении низкого

разрешения. Немаловажно, что спектральный диапазон изображения высокого разрешения должен включать в себя спектральный диапазон изображения низкого разрешения. Вся процедура увеличения пространственного разрешения может быть разделена на несколько этапов. Схема метода приведена на рисунке 1.5.

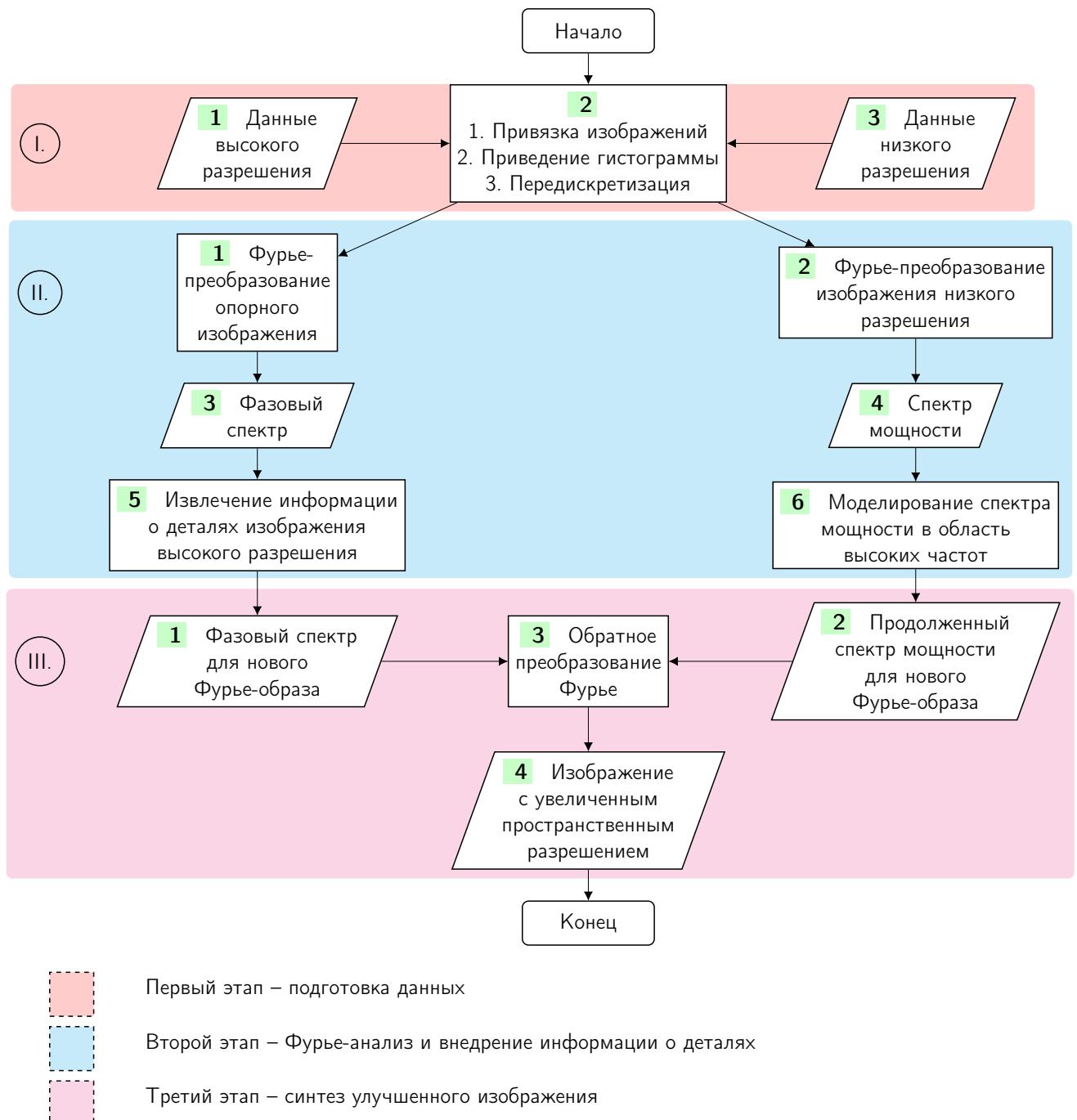


Рис. 1.5. Схема метода пространственно-спектрального синтеза с привлечением опорных оптических изображений (метод ССО)

На первом этапе (этап I) осуществляется предварительная обработка изображений. Она включает в себя взаимную привязку, приведение гистограммы опорного и исходного (требующего повышения пространственного разрешения) изображений и передискретизацию исходного изображения, если это необходимо. На данном этапе осуществляется выбор опорного изображения высокого разрешения, отвечающего требованиям метода ССО. Первый этап представлен тремя блоками схемы. Центральный блок I.2 включает процедуру приведения гистограммы опорного I_o и эталонного I_e изображений. Процедура приведения гистограммы I_o к гистограмме I_e предполагает, что получены нормализованные гистограммы $p_r(r_k)$ и $p_z(z_k)$ для изображений I_o и I_e , соответственно. Нормализованная гистограмма задаётся формулой

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n}, \quad (1.19)$$

и показывает отношение количества пикселов на изображении n_k с яркостью r_k , где r_k — k -ый уровень яркости, n — общее число пикселов на изображении.

Суть процедуры приведения гистограммы одного изображения к другому заключается в нахождении такого преобразования E , что каждому пикселу изображения I_o ставится в соответствие значение яркости согласно гистограмме $p_z(z_k)$ изображения I_e . Для нахождения преобразования E введём определение двух преобразований T и G , которые осуществляют эквализацию гистограмм изображений I_o и I_e , соответственно. Эквализацией (выравниванием) называется преобразование, при котором выходное изображение имеет равномерное распределение яркостей пикселов. Поскольку в результате эквализации гистограммы любого изображения получается равномерная гистограмма, то зная T и G^{-1} , можно осуществить последовательный переход от $p_r(r_k)$ к $p_z(z_k)$ для пикселов изображения I_o . Таким образом, искомое преобразование E имеет вид:

$$E(r_k) = G^{-1}[T(r_k)]. \quad (1.20)$$

Второй этап является основным, на нём информации о деталях вводится в изображения с низким разрешением. В основе данной процедуры лежит идея

о том, что ФС изображения несет в себе информацию об объектах, содержащихся на сцене изображения. Поэтому ФС используется для извлечения информации о деталях из опорного изображения в пространстве Фурье-образов. Энергетический спектр исходного изображения используется для формирования Фурье-образа, к которому потом применяется обратное преобразование Фурье. В пространстве Фурье-образов изображение представляет собой двумерный пространственный спектр Фурье, который связан с изображением дискретным преобразованием Фурье:

$$F(j_1, j_2) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=1}^M I(k_1, k_2) \exp \left[-2\pi i \left(\frac{j_1 k_1}{N_x} + \frac{j_2 k_2}{N_y} \right) \right], \quad (1.21)$$

где I — матрица изображения размером $N_x \times N_y$, $x(k_1, k_2)$ — значение элемента матрицы в k_1 строке и k_2 столбце, $F(j_1, j_2)$ — элементы матрицы, соответствующей Фурье-образу изображения. Блоки 1 и 2 второго этапа на схеме рис. 1.5 отвечают за получение спектр Фурье для изображений I_o и I_h соответственно. После этого для каждого изображения выделяются энергетический и фазовый спектры (блоки 3 и 4 второго этапа на схеме рис. 1.5). Далее происходит непосредственно процедура слияния, результатом которой является новый Фурье-образ изображения, содержащий в себе информацию о деталях из опорного изображения. Для формирования нового Фурье-образа, соответствующего изображению повышенного пространственного разрешения, энергетический спектр модифицируется посредством экстраполяции в область высоких частот. Для этого строится набор разрезов ЭС 1.14 для различных направлений. Характерный вид таких разрезов приведён на рисунке 1.6.

Полученные разрезы лучами разделяют ЭС на n равных углов с шагом $360/n$. Полученный таким образом набор разрезов характеризует ЭС исходного изображения низкого разрешения. Далее осуществляется непосредственно процедура экстраполяции ЭС в область высоких частот (блок 6 второго этапа на рис. 1.5) Показанные на графиках зависимости между амплитудами волн-

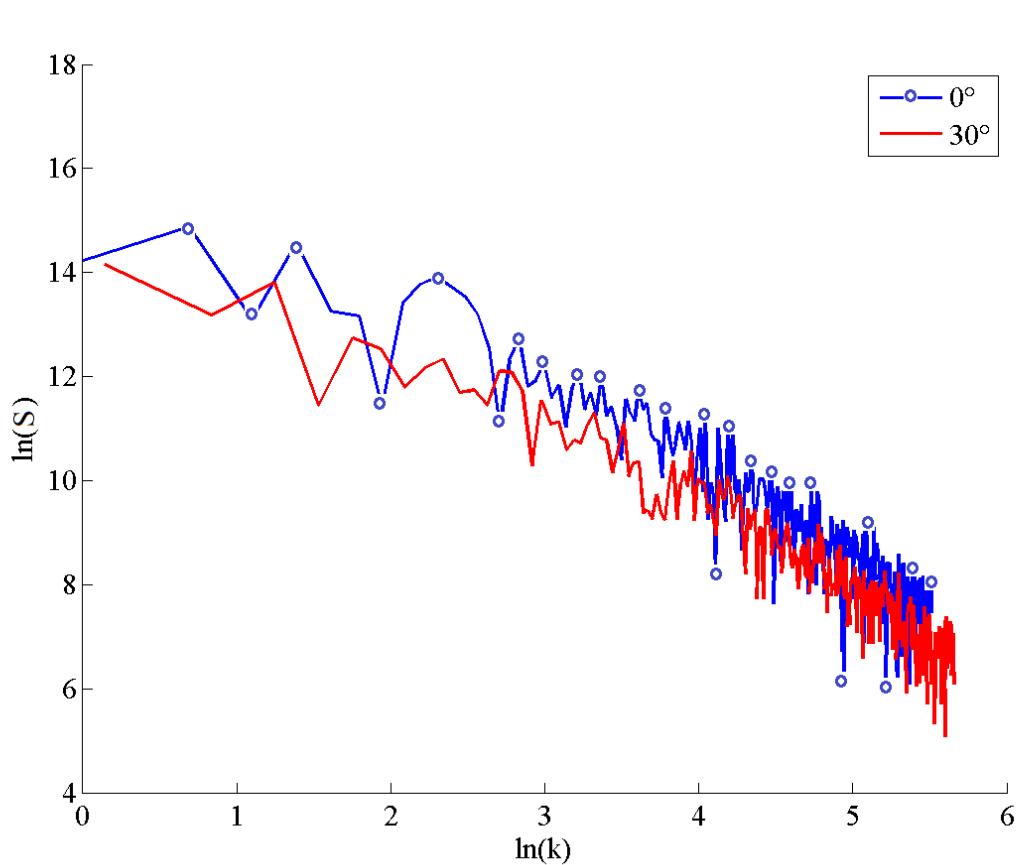


Рис. 1.6. Пример одномерных разрезов двумерного амплитудного спектра для нескольких близких направлений

вых компонент и волновыми числами k для большинства природных объектов могут быть в хорошем приближении описаны степенной функцией с показателем p . Это позволяет выполнять экстраполяцию ЭС путем логарифмирования разрезов с последующим линейным продолжением в область высоких пространственных частот, то есть для значений k в интервале от k_0 до k_1 (рисунок 1.7).

Нижняя граница k_0 определяется исходными размерами ЭС, полученного из изображения низкого разрешения. Верхняя граница k_1 задаётся исходными размерами ЭС опорного изображения. Доля разреза, которая используется при продолжении в область высоких частот, равна $\xi = k_0/k_1$. Таким образом, получается набор из n разрезов, уже продолженных в область высоких частот. На следующем шаге совершается обратный переход от набора разрезов к ЭС изображения. Для этого по тому же принципу, что и на шаге «разрезания»

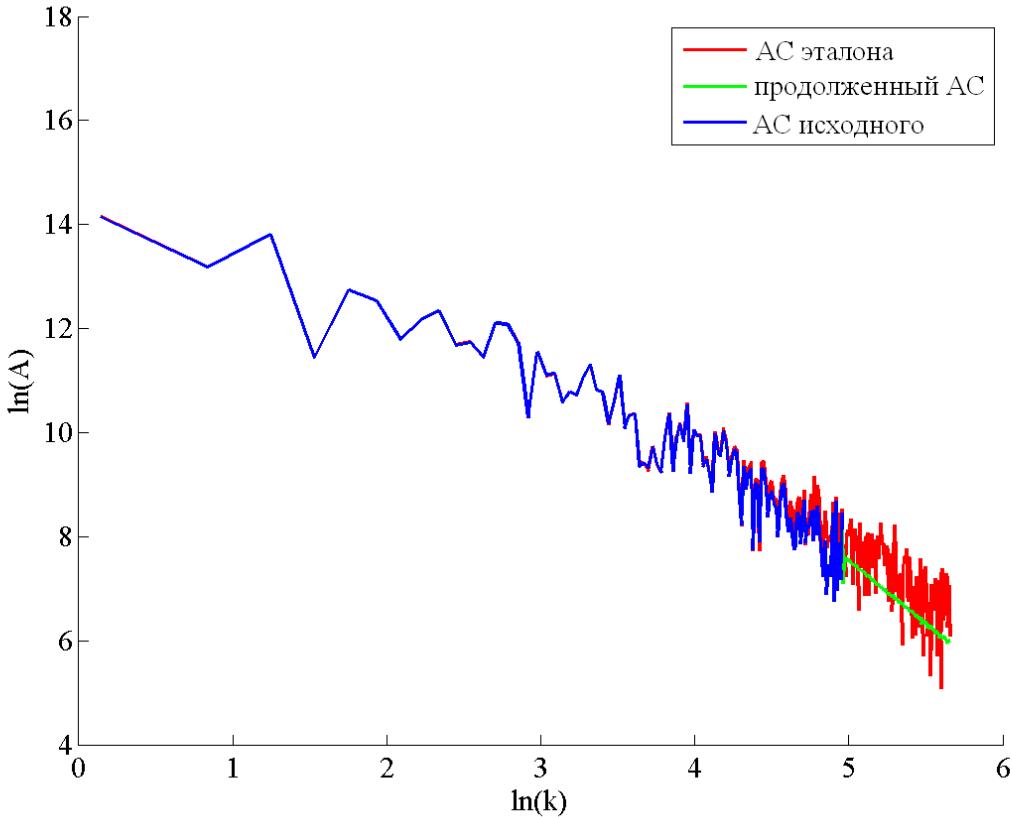


Рис. 1.7. Экстраполяция разрезов амплитудного спектра в область высоких частот

СМ, вычисляются значения в узлах квадратной сетки, представляющей собой спектр изображения (блоки 1 и 2 третьего этапа на схеме рис. 1.5). После того как на третьем этапе уже подготовлены отдельно ФС и ЭС, происходит формирование нового Фурье-образа, который содержит в себе информацию о деталях, извлеченных из опорного изображения. После применения обратного Фурье преобразования к полученному Фурье-образу, получается изображение с пространственным разрешением, совпадающим с разрешением опорного изображения. Обратное преобразование Фурье для F описывается как

$$I(k_1, k_2) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{j_1=1}^{N_x} \sum_{j_2=1}^{N_y} F(j_1, j_2) \exp \left[2\pi i \left(\frac{j_1 k_1}{N_x} + \frac{j_2 k_2}{N_y} \right) \right]. \quad (1.22)$$

В качестве опорного изображения используется изображение более высокого пространственного разрешения, полученное датчиком в спектральном диапазоне, который включает в себя спектральный диапазон для улучшаемого

изображения более низкого пространственного разрешения. Важным свойством метода слияния является способ увеличения детализации получаемого изображения. Описанный метод можно отнести к группе методов, осуществляющих внедрение деталей изображения с высоким разрешением в изображение с более низким разрешением. Основные операции при введении информации о деталях осуществляются в пространстве Фурье-образов путем экстраполяции спектра в область высоких частот. Таким образом, разработан метод повышения разрешения изображений, основанный на пространственно-спектральном анализе и синтезе изображений с привлечением опорных изображений.

1.4.3. Повышение разрешения космических изображений с интерполяцией данных.

Метод повышения пространственного разрешения аэрокосмических изображений, именуемый ниже в тексте как метод фильтрации с интерполяцией данных (метод ФИД), отличается от метода, описанного в предыдущем разделе метода ССОИ, тем, что в нём не используется опорное изображение, полученное с реального датчика. Тем самым упрощаются условия применения метода. Тем не менее, сохраняется необходимость получения информации о деталях, которые должны содержаться в восстановленном изображении высокого разрешения. Схема, демонстрирующая основные процедуры данного метода и их взаимные связи, приведена на рисунке 1.8. Для получения недостающей информации о деталях с помощью начального изображения низкого пространственного разрешения I_n искусственно синтезируется вспомогательное изображение повышенного пространственного разрешения. Метод повышения пространственного разрешения с интерполяцией данных основан на генерации вспомогательного изображения повышенного разрешения. Ограничением в использовании данного подхода является степень возможного увеличения пространственного разрешения. Поскольку синтез вспомогательного изображения осуществляется с помощью интерполяционных фильтров, то при повторном применении подоб-

ных фильтров или многократном увеличении может заметно падать качество получаемых изображений.

Вся процедура улучшения пространственного разрешения может быть разделена на несколько этапов (рис. 1.8). Сначала необходимо синтезировать вспомогательное изображение повышенного пространственного разрешения (блок I.3, рисунок 1.8). Для этого могут использоваться известные способы передискретизации, применяемые для изменения разрешения оцифрованных изображений [223]: билинейная интерполяция, бикубическая интерполяция, фильтр Ланцоша.

На первом этапе происходит предварительная обработка (блоки 1 и 2 на рис. 1.8) вспомогательного изображения повышенного разрешения. Она включает в себя приведение гистограммы вспомогательного и исходного изображений [186]. Далее (этап II) переходим к Фурье-анализу, в результате которого вычисляется ФС нового Фурье-образа изображения (блок 7, рисунок 1.8), содержащего в себе информацию о деталях вспомогательного изображения. После чего, аналогично методу ССОИ, строится набор разрезов, которые представляют собой приближение амплитудного спектра изображения низкого разрешения (блоки 2 – 6 на рис. 1.8).

Моделирование (экстраполяция) амплитудного спектра осуществляется посредством линеаризации разрезов с последующей их экстраполяцией в область высоких частот. Для экстраполяции используется лишь часть первоначального разреза размером $\xi = \frac{k_0}{k_1}$, где k_0 и k_1 определены в методе ССОИ (блоки 3 – 5 на рис. 1.8). После этого производится построение амплитудного спектра по экстраполированным данным (блок 6 на рис. 1.8).

На третьем этапе происходит составление нового Фурье-образа, который уже содержит в себе информацию о деталях, извлеченную из восстановленного изображения. После применения обратного Фурье преобразования (1.22) к Фурье-образу, получаем изображение с повышенным пространственным разрешением (блоки 1, 2 на рис. 1.8). Поскольку используемое вспомогательное

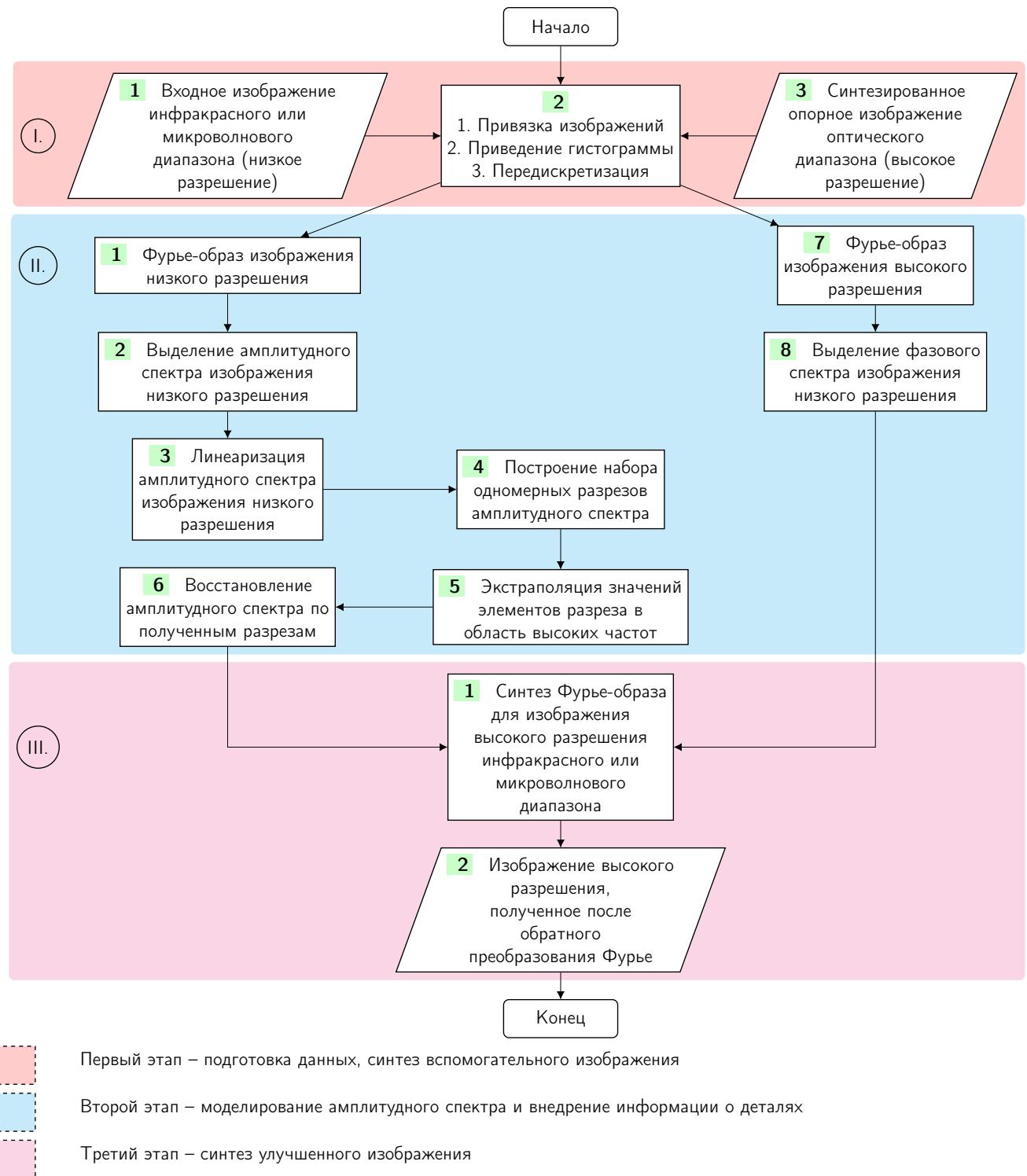


Рис. 1.8. Схема метода пространственно-спектрального синтеза с интерполяцией данных (ФИД)

изображение повышенного разрешения получено непосредственно из исходного изображения I_h , то условие пересечения спектральных диапазонов выполняется автоматически. Схема, описывающая последовательность операций для метода ФИД, представлена на рисунке 1.8. Основной особенностью метода ФИД является

ется увеличение детализации получаемого изображения без привлечения опорного панхроматического изображения. Этот метод протестирован и показывает удовлетворительные результаты при улучшении пространственного разрешения до двух раз [50, 50, 51, 74]. Таким образом, разработан метод повышения разрешения изображений, основанный на пространственно-спектральном анализе и синтезе изображений с интерполяцией данных без привлечения опорных изображений.

1.5. Вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных изображений на основе опорного панхроматического

В настоящем разделе описан вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных изображений с использованием опорного изображения. Задача формулируется, аналогично методу ССО, следующим образом: имея панхроматическое изображение требуемого разрешения и мультиспектральное изображение пониженного разрешения, требуется восстановить мультиспектральное изображение в пространственном разрешении панхроматического.

Для решения этой задачи используются следующие свойства отражённого излучения земной поверхности.

Из эмпирических наблюдений, основанных на большом количестве снимков высокого разрешения, можно сделать вывод о том, что пространственная вариативность интенсивности отражённого излучения для объектов одной природы гораздо больше, чем вариативность их спектра. Другими словами, можно наблюдать, что спектр отражённого излучения однороден в границах одного объекта, в то время как даже внутри одного объекта интенсивность варьируется. В качестве наглядного примера можно привести такие объекты, как дерево, крыша дома, дорога или легковой автомобиль.

Это свойство используется при конструировании космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, где имеется панхроматический сенсор высокого разрешения и мультиспектральный более низкого.

Следует отметить, что это свойство используется также в зрительной системе многих животных, включая приматов, когда цветовое пространственное разрешение сетчатки глаза меньше, чем монохромное, что компенсируется с помощью пространственного восстановления цветовой компоненты в отделах мозга, ответственных за визуальное восприятие.

В свою очередь это повлекло использование загрузления цветовой компоненты в аналоговых и цифровых видеостандартах и цифровых алгоритмах сжатия видео и статических изображений. Адаптация изображения к человеческому восприятию — отдельная тема, не рассматриваемая здесь. В нижеописанном методе не делается никаких допущений о свойствах зрения наблюдателя.

При разработке метода используется следующее предположение о свойствах наблюдаемых объектов: спектры пространственно близких областей схожи, если они принадлежат одному объекту.

Как же определить, какие области на изображении принадлежат одному объекту, какие разным, имея только панхроматическое изображение с требуемым пространственным разрешением? В общем случае можно сказать, что необходимо применить статистические методы для определения схожести текстуры двух соседних областей изображения, а на основе схожести можно уже делать вывод, принадлежат ли эти области одному объекту или нет.

На практике хороших результатов можно достичнуть, используя следующий (упрощённый) подход и считая, что если интенсивность соседних областей значительно отличается, то, вероятно, эти области принадлежат разным объектам с разными отражёнными спектрами.

Таким образом мы имеем два свойства: свойство пространственной локальности объектов (две соседних области более вероятно принадлежат к одному объекту, чем две удалённые) и свойство похожести на основе близких значений

интенсивности двух соседних областей.

Рассмотрим особенности вероятностного подхода. Переформулируем задачу повышения пространственного разрешения мультиспектрального изображения на основе панхроматического в терминах апостериорной вероятности. Рассмотрим мультиспектральное изображение, имеющее меньшее пространственное разрешение, чем опорное панхроматическое. Передискретизуем его до размеров панхроматического. Обозначим априорную вероятность вектора значений яркости мультиспектрального изображения высокого разрешения I_m как $P(I_m)$. Эта вероятность может быть вычислена на основе мультиспектрального изображения низкого разрешения.

Аналогично вероятность значения яркости панхроматического изображения I_p обозначим как $P(I_p)$. Будем считать, что панхроматическое изображение может быть получено (кроме сенсора космического аппарата) ещё и взятием по-пикселно нормы (модуля) из мультиспектрального изображения. Как правило, в таких случаях используется предварительное заранее известное линейное преобразование и норма L_1 . Таким образом для каждого пикселя можно записать:

$$I_p = \|\mathbf{A}I_m\|_1, \quad (1.23)$$

где \mathbf{A} — матрица линейного преобразования цвета.

Соответственно, уже не нужно находить абсолютные значения мультиспектральных компонент изображения, достаточно узнать только их относительные величины, другими словами, нормированный вектор спектра:

$$\widehat{I}_m = \frac{I_m}{\|\mathbf{A}I_m\|_1}. \quad (1.24)$$

Заметим, что на основе мультиспектрального изображения и его панхроматической пары, возможно посчитать апостериорную вероятность и вычислить значение яркости мультиспектрального вектора \widehat{I}_m^r при условии, что панхроматическое изображение имеет яркость I_p в этом пикселе. Верхний индекс r обозначает, что изображение восстановлено (restored) из двух оригинальных.

Обозначим эту апостериорную вероятность как $P(\widehat{I}_m^r | I_m, I_p)$. В рамках задачи повышения пространственного разрешения изображения необходимо для каждой точки панхроматического изображения найти наиболее вероятный вектор \widehat{I}_m^r .

Для этих целей хорошо подходит формула Байеса о полной вероятности:

$$P(\widehat{I}_m^r | \widehat{I}_m, I_p) = \frac{P(\widehat{I}_m, I_p | \widehat{I}_m^r) P(\widehat{I}_m^r)}{P(\widehat{I}_m, I_p)}. \quad (1.25)$$

Другими словами, зная вероятностные характеристики окрестности точки и значение яркости панхроматического изображения, возможно сделать предположение о мультиспектральных характеристиках в этой точке.

1.5.1. Описание вероятностного метода

Разработанный подход описан в [64]. Его основой является алгоритм са- монормализующейся выборки по значимости, который для нахождения наиболее вероятного мультиспектрального вектора (или, другими словами, математического ожидания $\langle P(\widehat{I}_m^r | I_m, I_p) \rangle$) использует взвешенное среднее значение наиболее подобных точек в окрестности заданной. Чем больше степень подобия, тем больше будет весовой коэффициент для этой точки. Степень подобия определяется двумя основными факторами:

1. Первый фактор — степень пространственной близости точки из окрестности к заданной. Этот фактор основывается на следующем эмпирическом знании: чем ближе точки находятся на изображении, тем больше вероятность, что значения интенсивности в этих точках будут близки.
2. Второй фактор — степень близости двух точек, согласно их панхроматическим яркостям. Здесь делается допущение, что чем меньше разность панхроматических яркостей точек, тем более подобными будут мультиспектральные векторы этих точек.

Введём весовые коэффициенты для этих факторов. Обозначим пространственную координату точки как вектор x . В нашем случае вектор координат состоит из двух компонент: горизонтальной и вертикальной. Декартово расстояние между точками i и j одного изображения обозначим как

$$r(i, j) = \|x_i - x_j\|. \quad (1.26)$$

Введём радиально-симметричную функцию пространственной близости двух точек:

$$\rho(i, j) = \rho(\|x_i - x_j\|). \quad (1.27)$$

Функция должна быть положительной и быстро затухающей. Введём функцию степени подобия интенсивностей как

$$\beta(i, j) = \beta(|I_i - I_j|). \quad (1.28)$$

Функция β также должна быть положительной и быстро затухающей. Далее обозначим окрестность искомой точки как Ω . Весовой коэффициент для точки x_i , принадлежащей окрестности Ω , равен

$$\omega(i, j) = \beta(|I_i - I_j|) \rho(\|x_i - x_j\|), \quad j \in \Omega_i, \quad (1.29)$$

где I_i, I_j — величины, относящиеся к панхроматическому изображению.

Соответственно, формула взвешенной суммы для точки будет иметь вид

$$\left\langle P\left(\widehat{I}_m^r | I_\Theta, I_p\right)\right\rangle_{x_i} = \frac{\sum_{j \in \Omega} \widehat{I}_m(x_j) \omega(i, j)}{\sum_{j \in \Omega} \omega(i, j)}. \quad (1.30)$$

В качестве начального приближения, а также для обеспечения вычислительной эффективности, функции β и ρ задаются как гауссовы :

$$\rho(i, j) = e^{-C_s \|x_i - x_j\|^2}, \quad (1.31)$$

$$\beta(i, j) = e^{-C_I |I_i - I_j|^2}, \quad (1.32)$$

где C_I и C_s — подстроечные коэффициенты в пространстве интенсивности и в координатном пространстве соответственно.

Восстановленное мультиспектральное изображение считается поэлементным умножением интенсивностей изображения на восстановленное нормированное мультиспектральное изображение:

$$I_m^r(x) = \widehat{I_m^r}(x) I_p(x). \quad (1.33)$$

На 1.9, *a* представлено исходное двумерное гауссовское ядро, для которого строится модификация с помощью «обрезания хвостов» при заданных значениях k, t . Линейный разрез модифицированного гауссовского ядра приведён на рисунке 1.9, *б*.

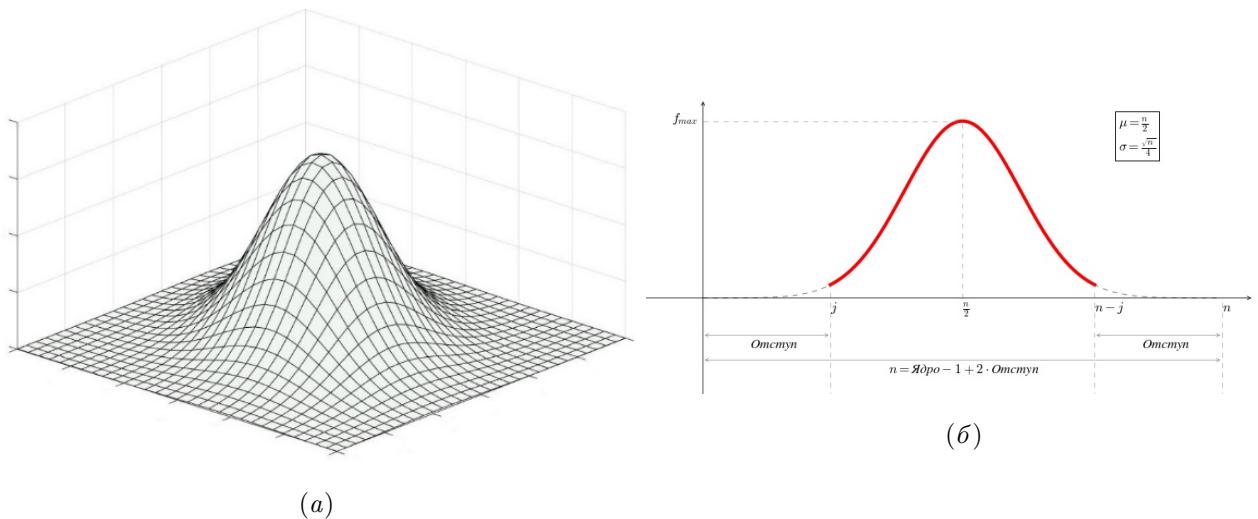


Рис. 1.9. Построение модифицированного гауссовского ядра: а — Исходное двумерное гауссово ядро; б — Линейный разрез модифицированного гауссова ядра

1.5.2. Методика настройки параметров алгоритма

Важное значение имеет настройка параметров алгоритма. Поиск параметров происходит для разных исходных соотношений пространственных разрешений панхроматического и мультиспектрального изображений.

Постановка задачи поиска оптимальных параметров. Задача состоит в поиске оптимальных параметров метода. Это осуществляется путём

минимизации функции, отражающей меру различия эталона и изображения, полученного после применения метода повышения разрешения. Основная трудность заключается в том, что оценка качества повышения разрешения является отдельной задачей, в которой нет общепринятого критерия качества. Другая сложность состоит в том, что проблематично встроить функционал оценки качества в сам метод, чтобы иметь возможность настраивать параметры методы напрямую, а не опосредовано в результате сравнения эталона с полученным изображением. И последняя трудность заключается в особенностях получения спутниковых изображений, которые приводят к необходимости искусственно создавать исходное мультиспектральное изображение для улучшения. В частности, сенсор, установленный на борту космического аппарата, регистрирует отражённое излучение от земной поверхности на различные приёмники. В результате формируются изображения одной и той же сцены, полученные в различных спектральных диапазонах длин волн. Обычно одним из этих изображений является панхроматический канал, соответствующий всему видимому диапазону длин волн с высоким пространственным разрешением. Мультиспектральное изображение включает каналы с низким пространственным разрешением, каждый из которых получен в отдельном узком диапазоне длин. В данном случае, имея мультиспектральное изображение только в одном пространственном разрешении, возникает необходимость искусственно создавать либо «эталон», либо исходное изображение для улучшения.

Введём обозначения: I_{et} — эталонное изображение, I_{res} — изображение, полученное после обработки, $f(I_{et}, I_{res})$ — функция ошибки, которая отражает меру различия эталонного и результирующего изображений, k — линейный размер ядра, t — величина отступа от границы двумерного ядра.

Предложенный вероятностный метод повышения пространственного разрешения зависит от двух параметров: k и t . Значения этих параметров задают размер матрицы весов, которая определяет вклад значений яркости из окрестности текущего пикселя.

При заданной мере различия изображений ставится задача минимизации функции двух переменных при фиксированном I_{et} и алгоритмической зависимости I_{res} от k и t :

$$(k_{opt}, t_{opt}) = \arg \min_{k \in K, t \in T} f(I_{et}, I_{res}(k, t)) , \quad (1.34)$$

где (K, T) — области поиска оптимальных значений параметров метода.

Подробное описание процедуры поиска оптимальных параметров k_{opt} , t_{opt} представлено далее.

Для оценки качества метода могут использоваться различные меры [347].

Меры оценки качества повышения разрешения мультиспектральных изображений.

Для оценки качества повышения разрешения мультиспектральных изображений будем использовать количественные меры, описанные в разделе 1.2:

- SAM — угол между соответствующими пикселями эталонного и результирующего изображения 1.8.
- Индекс различия ERGAS 1.9.
- Универсальный индекс качества (Q-индекс) 1.7.

Используя перечисленные меры, далее строится процедура поиска оптимальных параметров вероятностного метода повышения разрешения мультиспектральных космических изображений.

Для процедуры поиска используются тестовые изображения с соотношением пространственных разрешений 1:3, 1:4.

Ниже описан алгоритм, реализующий процесс настройки оптимальных параметров метода.

Шаг 1. Используются мультиспектральное и опорное панхроматическое изображения. Исходное мультиспектральное изображение считается эталонным.

Шаг 2. Эталонное изображение загружается в 2, 4 и 8 раз. Полученное изображение считается входным для вероятностного метода.

Шаг 3. Полученное изображение увеличивается до размеров панхроматического методом Ланцоша (либо другим методом интерполяции).

Шаг 4. Задаётся область поиска параметра.

Шаг 5. Запускается работа вероятностного метода.

Шаг 6. Результирующее изображение передискретизуется до размеров эталонного.

Шаг 7. Происходит сравнение результирующего, приведённого к размеру эталонного, и эталонного изображений с помощью мер качества.

Шаг 8. Фиксируются значение меры, значение параметров и результат ошибки.

Матрица весов, используемая для вычисления наиболее вероятного вектора яркостей пикселя на результирующем мультиспектральном изображении высокого разрешения, строится на основе модифицированного гауссовского ядра. Поскольку данное ядро определяет вклад пикселов окрестности в конечную яркость (1.30), то очевидно, что для разных масштабов повышения разрешения размер этой окрестности, а, следовательно, и самого ядра будет разный. Поэтому для поиска оптимальных параметров было выбрано два изображения, полученных с разных КА, первое из которых показано на рис. 1.10. Поиск оптимальных параметров осуществляется на трёх масштабах: 2, 4 и 8.

Настройка параметров осуществляется для различных вариантов исходных соотношения пространственных разрешений (1:3, 1:4) и для трёх различных масштабов повышения пространственного разрешения (2-кратное, 4-кратное, 8-кратное) с использованием разработанного метода.

1.5.3. Результаты поиска оптимальных параметров алгоритма

Рассмотрим оптимальные параметры для соотношения 1:3. На рис. 1.10 представлены исходные панхроматическое (рис. 1.10, *a*) и мультиспектральное



Рис. 1.10. Спутниковые изображения: а — панхроматический канал, пространственное разрешение 1 м/пиксел; б — мультиспектральные каналы — 3 м/пиксел

(рис. 1.10, б) изображения, для которых проводится настройка параметров метода на соотношении пространственных разрешений 1:3.

В результате нахождения экстремумов функции (1.34) были построены поверхности (см. рис. 1.11–1.13), иллюстрирующие поведение мер различия (1.7), (1.9), (1.8) на множествах K_1 , T_1 .

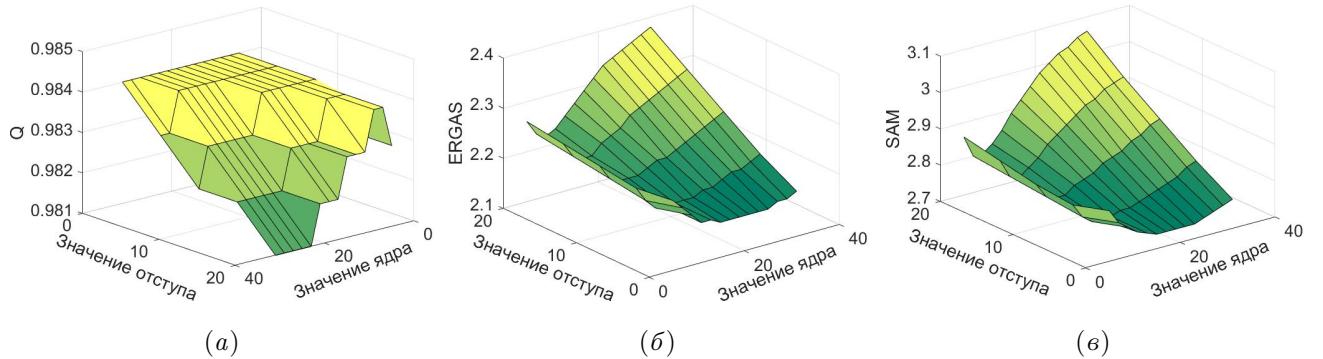


Рис. 1.11. Оптимизация параметров для соотношения исходных пространственных разрешений 1:3 на 2-кратном увеличении: а — мера Q , б — мера $ERGAS$, в — мера SAM

Из рис. 1.11–1.13 видно, что для всех масштабов наблюдается нелинейная зависимость мер от параметров метода, причем чем больше масштаб повыше-

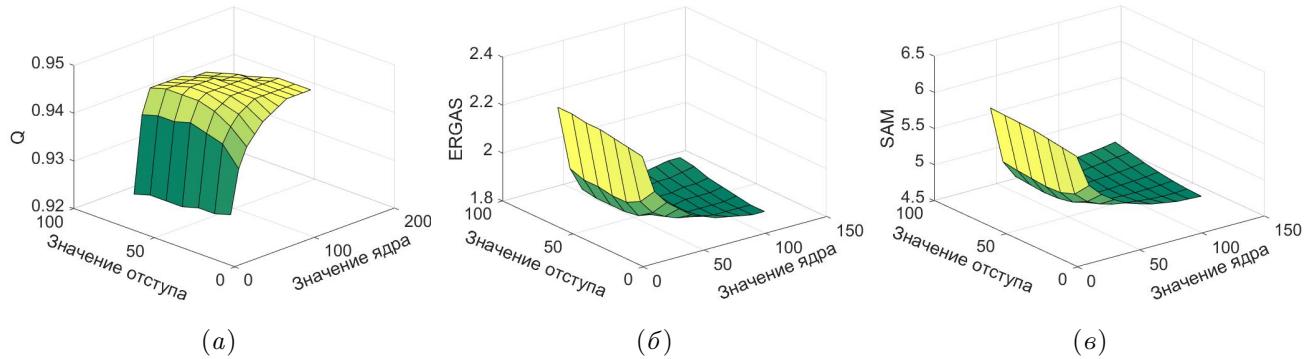


Рис. 1.12. Оптимизация параметров для соотношения исходных пространственных разрешений 1:3 на 4-кратном увеличении: а — мера Q , б — мера $ERGAS$, в — мера SAM

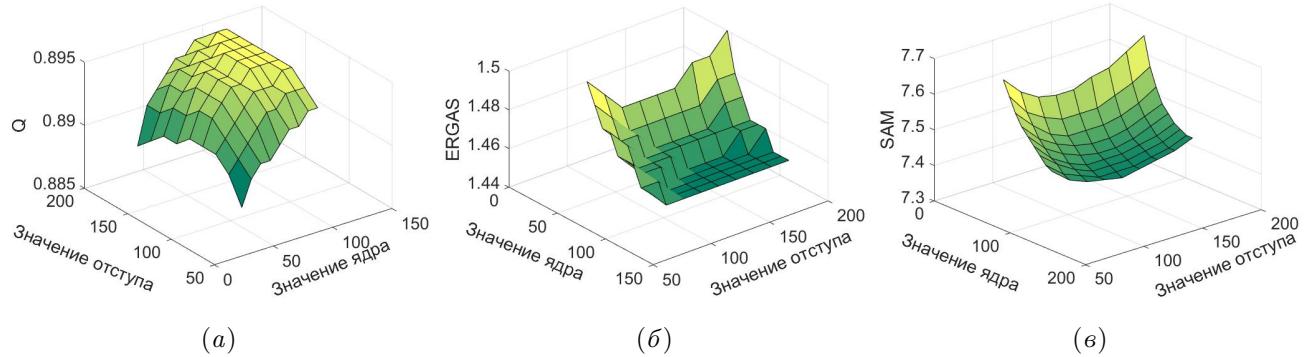


Рис. 1.13. Оптимизация параметров для соотношения исходных пространственных разрешений 1:3 на 8-кратном увеличении: а — мера Q , б — мера $ERGAS$, в — мера SAM

ния разрешения, тем ожидаемо больше различие эталона и результирующего изображения.

Оптимальные значения k_{opt} , t_{opt} для случая соотношений исходных пространственных разрешений 1:3 приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Оптимальные значения k_{opt} , t_{opt} для случая соотношений исходных пространственных разрешений 1:3

Параметры метода	Ядро			Отступ		
Масштаб	$\times 2$	$\times 4$	$\times 8$	$\times 2$	$\times 4$	$\times 8$
Значения параметров	15	65	85	0	35	140

В результате нахождения экстремумов функции (1.34) были построены поверхности (см. рис. 1.14–1.16), иллюстрирующие поведение мер различия (1.7), (1.9), (1.8) на множествах K_2 , T_2 .

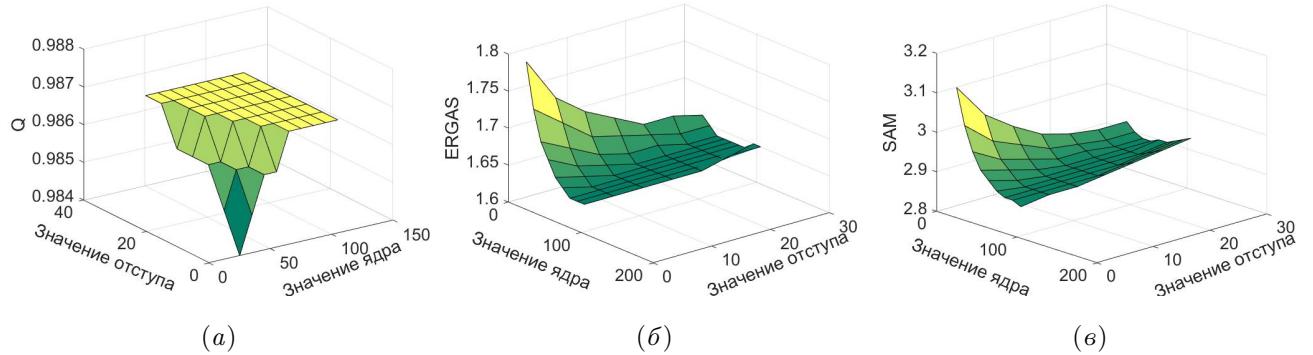


Рис. 1.14. Оптимизация параметров для соотношения исходных пространственных разрешений 1:4 на 2-кратном увеличении: а — мера Q , б — мера $ERGAS$, в — мера SAM

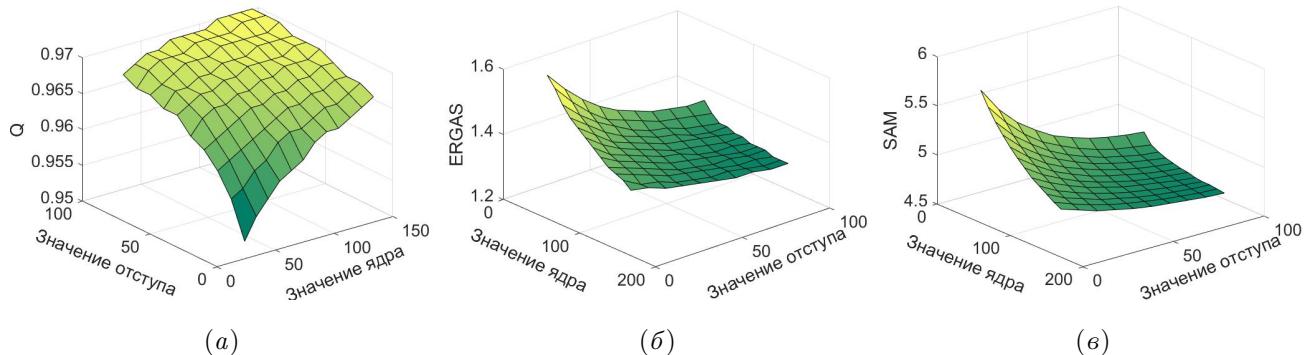


Рис. 1.15. Оптимизация параметров для соотношения исходных пространственных разрешений 1:4 на 4-кратном увеличении: а — мера Q , б — мера $ERGAS$, в — мера SAM

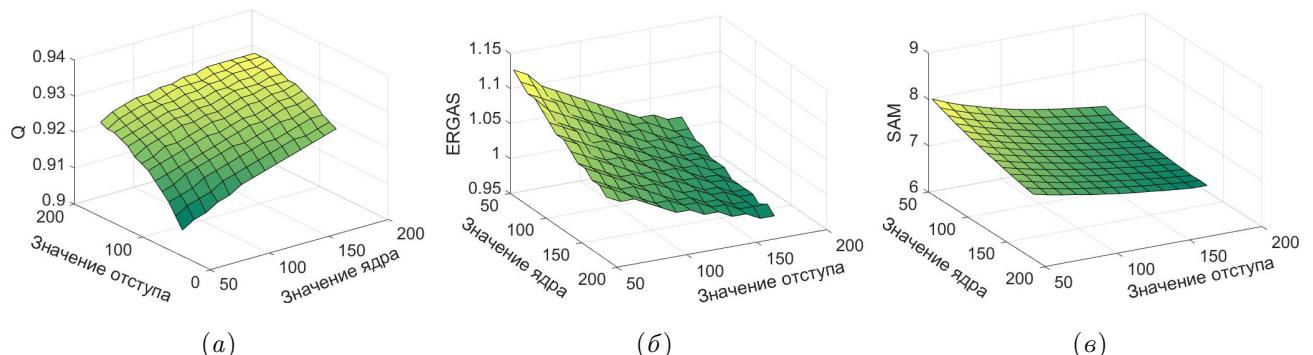


Рис. 1.16. Оптимизация параметров для соотношения исходных пространственных разрешений 1:4 на 8-кратном увеличении: а — мера Q , б — мера $ERGAS$, в — мера SAM

Из рис. 1.14–1.16 видно, что для 2-кратного масштаба наблюдается нелинейная зависимость мер от параметров метода, а для 4- и 8-кратного зависимость вырождается в плоскость, причем чем больше масштаб повышения разрешения, тем ожидаемо большее различие эталона и результирующего изображения.

Рассмотрим результаты проведённых вычислительных экспериментов. Алгоритм повышения разрешения с полученными оптимальными параметрами тестируется на различных фрагментах спутниковых изображений с соответствующим соотношением пространственных разрешений панхроматического и мультиспектрального изображений.

Для тестирования алгоритма использованы эталонные изображения, содержащие различные типы подстилающей поверхности: городская местность (дороги, здания, стадионы), горные и лесные массивы, сельскохозяйственные поля и индустриальные районы. Изображения были получены с различных космических аппаратов, таких как GeoEye-1, IKONOS-2 и WorldView-3 и др.

Следует привести характеристики используемых спутниковых изображений. В вычислительных экспериментах использовались данные, полученные с различных космических аппаратов:

- IKONOS-2 (панхроматический канал — 0.82 м/пиксел, мультиспектральный — 3.28 м/пиксел);
- GeoEye-1 (панхроматический канал — 0.41 м/пиксел, мультиспектральный — 1.65 м/пиксел);
- WorldView-3 (панхроматический канал — 0.31 м/пиксел, мультиспектральный — 1.24 м/пиксел);
- Ресурс-П (панхроматический канал — 1 м/пиксел, мультиспектральный — 3 м/пиксел).

Входные данные разделены на несколько классов в зависимости от размера, источника и характера подстилающей поверхности. С источника GeoEye-1 получено 3 изображения, с IKONOS-2 — 13, с WorldView-3 — 16, с других источников — 9 изображений. Из них сформированы следующие наборы данных: городских кварталов — 28 изображений, сельской местности — 8 изображений, горной поверхности — 5 изображений.

Проиллюстрируем работу вероятностного метода на одном из тестовых изображений. На рис. 1.17 представлено изображение со спутника WorldView-3. На исходном изображении (рис. 1.17, *a*) выделен фрагмент, к которому применяется предложенный вероятностный метод с найденными оптимальными параметрами для соотношения 1:4.



Рис. 1.17. Иллюстрация работы разработанного вероятностного метода: а — исходное мультиспектральное изображение (спутник WorldView-3); б — фрагмент изображения до улучшения; в — результат применения вероятностного метода, г — эталонное изображение

При визуальном сравнении фрагмента после применения вероятностного метода (рис. 1.17, *c*) и фрагмента с эталонного изображения можно заметить

несколько худшее качество первого. Этот факт объясняется тем, что настройка параметров проводилась на изображении, полученном с другого аппарата (спутник IKONOS-2).

Проведено сравнение предложенного метода с другими методами паншарпенинга [64, 225]. Количественные оценки качества работы методов на 2-кратном увеличении сведены в табл. 1.2 и проиллюстрированы на рис. 1.18.

Для сравнения использовались следующие методы:

- SFIM (smoothing filtered-based intensity modulation) - фильтрация со сглаживанием модуляции интенсивности [199, 200, 276];
- MTF GLP (modulation transfer function - generalized Laplacian pyramid) GLP-обобщенная пирамида Лапласа передаточной функции модуляции [155];
- MTF-GLP-HPM (MTF-GLP with High Pass Modulation) - метод MTF GLP с модуляцией высоких частот [348];
- GS (Gram-Schmidt) and GSA (Gram-Schmidt adaptive) [156, 188];
- PCA (principal component analysis) - метод главных компонент [278, 290];
- GFPCA (guided filter principal component analysis) - управляемый фильтр в анализе главных компонент [273, 278];
- CNMF (Coupled Non-negative Matrix Factorization) - Сопряжённая неотрицательная матричная факторизация [359, 360].

При визуальном сравнении результатов работы (см. рис. 1.18) затруднительно определить лучший результат. Результаты количественных оценок работы методов показывают, что предложенный вероятностный метод с оптимальными параметрами показывает хорошие результаты по каждой из трёх мер (Q , SAM, ERGAS).

Таблица 1.2. Сравнение качества работы различных алгоритмов паншарпенинга с разработанным вероятностным методом

Меры	SFIM	MTF GLP	MTF GLP HPM	GS	GSA	PCA	GFPCA	CNMF	Вероят- ностный метод
Q (больше-лучше)	0.878	0.881	0.883	0.878	0.879	0.865	0.904	0.915	0.917
SAM (меньше-лучше)	1.743	1.762	1.732	1.891	1.889	1.913	1.726	1.77	1.531
ERGAS (меньше-лучше)	3.951	3.902	3.873	3.72	3.71	3.966	3.412	3.326	3.175

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что качество работы предложенного вероятностного метода с оптимальными параметрами при повышении разрешения в 2 раза может превосходить известные аналоги.

Таким образом, разработан метод повышения разрешения мультиспектрального изображения на основе вероятностного анализа исходного мультиспектрального и опорного панхроматического и нахождения наиболее вероятного распределения яркостей.

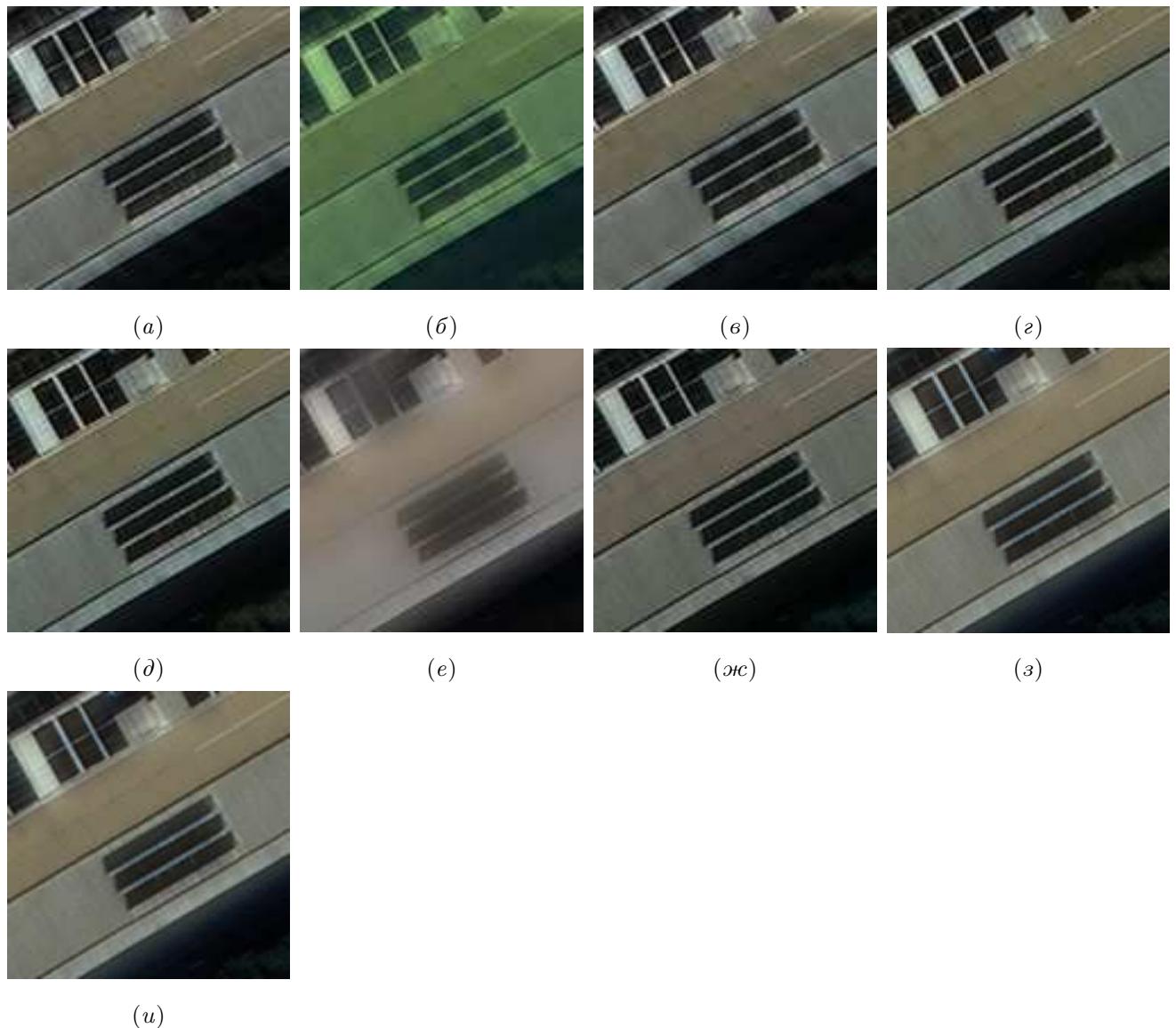


Рис. 1.18. Результаты работы методов паншарпенинга для соотношения 1:4 при 2-кратном увеличении разрешения: а — SFIM, б — MTFGLP, в — MTFGLPHPM, г — GS, д — PCA, е — GFPCA, ж — CNMF, з — GSA, и — вероятностный метод

Выводы к Главе 1

В главе представлены следующие основные результаты:

- Разработан подход к повышению пространственного разрешения спутниковых изображений, основанный на методах дистанционных измерений пространственных спектров объектов суши и океана с использованием специально разработанных способов восполнения энергетических и фазовых спектров в области высоких пространственных частот.
- Разработан метод повышения разрешения космических изображений, основанный на использовании опорных изображений тех же участков поверхности, что и на улучшаемых изображениях, но имеющих более высокое пространственное разрешение. Метод заключается в предобработке улучшаемых и опорных изображений, получении энергетических и фазовых спектров, экстраполяции энергетических спектров улучшаемого изображения в области высоких пространственных частот с использованием известных эмпирических закономерностей (в том числе с помощью степенной аппроксимации), а также синтезе изображений высокого разрешения в заданном спектральном диапазоне с использование фазовых спектров, полученных из опорных изображений.
- Разработан метод повышения разрешения космических изображений, основанный на построении вспомогательных изображений. Метод заключается в применении одного из известных методов изменения размеров изображений к улучшаемым изображениям, проведении последовательных этапов обработки полученных вспомогательных изображений совместно с исходными изображениями, включая предобработку, фурье-анализ для получения энергетических и фазовых спектров, экстраполяции спектров улучшаемого изображения в области высоких пространственных частот, а также синтезе изображений высокого разрешения заданного спек-

трального диапазона с использованием фазовых спектров, полученных из вспомогательных изображений.

- Разработан вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных изображений. Метод основан на использовании опорных панхроматических изображений, учёте статистических закономерностей, связывающих панхроматические изображения с мультиспектральными на локальных участках поверхности. Метод предназначен для повышения разрешения одновременно в нескольких каналах мультиспектрального изображения.

Предложенные в главе методы и алгоритмы внедрены при создании программного обеспечения, эксплуатационной и методической документации для вторичной обработки космических изображений, а также в макете исследовательского программного комплекса повышения разрешающей способности космической аппаратуры, устанавливаемой на маломассогабаритных космических аппаратах.

Созданное программное обеспечение прошло экспериментальную отработку и получило правовую охрану в виде свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ:

- «Модуль оценки качества повышения разрешающей способности космической аппаратуры наблюдения инфракрасного и микроволнового диапазонов для бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли» [70];
- «Модуль синтеза мультиспектральных изображений» [68].

Глава 2

Повышение информативности аэрокосмических изображений наземных антропогенных объектов

В развитие базовых методов, описанных в Главе 1, в настоящей главе описываются методы комплексирования и обработки данных дистанционного зондирования с использованием традиционных и нейросетевых подходов, развитые для получения информации об антропогенных объектах на аэрокосмических изображениях, в том числе об объектах инфраструктуры. В разделах главы описаны следующие методы.

- Вычислительный метод повышения пространственного разрешения космических изображений с использованием векторной модели представления априорной информации, предназначенный для повышения чёткости границ, а также для выявления расположения и измерения геометрических размеров и площадей объектов при мониторинге различных территорий. Метод основан на использовании дополнительной информации, такой как карты поверхности, представленные в векторной форме.
- Метод выделения антропогенных объектов известной формы, таких как автомобили, на аэрокосмических изображениях, основанный на выделении областей с близкими цветовыми характеристиками, и позволяющий найти заданные объекты и оценить их положение, ориентацию, размеры.
- Комплексный подход к применению искусственных нейронных сетей (ИНС) для извлечения и интерпретации пространственной информации (трёхмерных признаков) о ригидных объектах (например об объектах хозяйственной инфраструктуры) из спутниковых изображений. Метод включает: повышение пространственного разрешения изображений на основе генеративно-состязательных нейросетей ГСН); сегментацию изображений на

основе ИНС для выделения объектов. Обосновывается целесообразность привлечения ГСН для повышения пространственного разрешения изображений, используемых для выделения антропогенных ригидных объектов и измерения их трёхмерных характеристик.

Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [23, 41, 75, 84, 85, 118, 261, 286].

2.1. Разработка методов повышения пространственного разрешения изображений с использованием априорной информации о наблюдаемых объектах

При повышении разрешения приходится иметь дело с недостатком информации и это сказывается на качестве восстановленного изображения. Как правило, проявляются следующие дефекты: размытие, алиасинг (ступенчатость контуров) и эффект Гиббса (ложное оконтурирование) [305]. Примеры дефектов приведены на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Слева направо: размытие, ступенчатость, ложное оконтурирование

По способу восполнения недостающей информации при формировании изображений высокого разрешения методы можно разделить на использующие интерполяцию [152, 343]; повышающие разрешающую способность мультиспектраль-

ных изображений путём синтеза информации в спектральных каналах; основанные на использовании априорной информации об объектах.

В задачах дистанционного измерения характеристик стационарных объектов по их изображениям, в частности при космическом мониторинге участков поверхности Земли, возникает необходимость чёткого прослеживания границ этих объектов с целью точного определения их расположения, измерения геометрических размеров и площадей. Такая задача возникает при мониторинге урбанизированных территорий, береговых линий, ледовой обстановки, природных пожаров и территорий, пройденных огнём. При использовании стандартных методов повышения разрешающей способности, не учитывающих информацию о границах объектов, происходит сглаживание, в том числе там, где не должно быть плавного перехода яркости, а есть резкая граница.

Известны различные методы избежать размытия границ, включающие предварительное выделение перепадов яркости [207]. В таких методах перед непосредственно интерполяцией проводится предварительная обработка, выделяющая границы [341]. Данный подход имеет немало преимуществ: он не требует дополнительной информации и хорошо сохраняет границы. К его недостаткам относится определённая вычислительная сложность, связанная с необходимостью предварительной обработки изображения, и вероятность ошибки при выделении границ: пропуска реальной границы или выделения её там, где в действительности происходит плавное, но быстрое изменение яркости.

2.1.1. Подход, используемый при повышении разрешения границ объектов

В настоящей работе предлагается метод, позволяющий повышать разрешение изображений, полученных при дистанционном зондировании, с сохранением резких переходов на границах заданных объектов [41, 50, 69, 120, 138, 147]. Обычное изображение часто не позволяет сделать вывод, где проходят резкие границы между объектами, а где — плавный переход яркости, что приводит к

размытию границ при попытке повысить разрешение изображения [50, 138, 147].

Разработанный метод предполагает хранение изображения не в виде двумерной матрицы пикселов, а в виде так называемых бикселей (bixels). Такое изображение состоит из обычного растра, задающего значения яркости в вершинах равномерной сетки, и описания границ, проходящих вблизи каждой вершины, с субпиксельной точностью. Границы могут быть представлены в виде ломаных или кривых и задают линии, по которым проходит резкий перепад яркости (обычно — границы объектов, разделение объекта и фона). Таким образом, появляется возможность сохранить резкие перепады яркости, соответствующие границам, при повышении разрешения в любое количество раз, оставив в прочих местах плавные переходы, порождаемые интерполяционными алгоритмами. Для отображения таких изображений на экране или в печати используется пикセルное представление, поэтому существует алгоритм перевода изображения из бикселей в чисто растровый вид. Так как при этом могут получаться абсолютно резкие границы, для лучшего восприятия производится сглаживание (anti-aliasing). В зависимости от конфигурации близлежащих границ, интерполяция яркости в выбранных координатах производится функцией билинейной интерполяции по точкам базового изображения. При этом для интерполяции, с помощью которой получаются пиксели результирующего растрового изображения, используются только те значения яркостей, которые не отделены от результирующего пикселя линией границы. При использовании космических изображений не имеет смысла требовать хранения данных в особенном виде, но существует возможность использовать дополнительную априорную информацию о рассматриваемой поверхности. Для объектов, не изменяющих свои геометрические свойства длительное время, часто существует их векторное представление, полученное тем или иным способом. В качестве такой информации доступны различные карты исследуемой поверхности, которые созданы ранее как по данным дистанционного зондирования, так и по данным наземных измерений. Примерами могут служить карты границы суши и воды, карты дорожной сети

и другие. Именно представление данных в векторной модели позволяет иметь точность отображения формы границ объекта, не ограниченную сеткой растрового изображения, и экстраполировать эту форму при повышении разрешения изображения.

На плоскости задано изображение как функция яркости на регулярной прямоугольной сетке (1.1). Дополнительно задано деление множества определения функции на области P_k , $k = \overline{1, K}$. Каждая область изображает отдельный объект, обладающий резкой границей с другими объектами и фоном. При операциях с изображением значения яркости внутри и снаружи объекта не должны смешиваться. Чаще всего на практике области P_k , $k = \overline{1, K - 1}$ задаются в виде полигонов, а область P_K представляет собой фон — множество пикселов, не вошедших ни в одну другую область. Каждый полигон представляет собой плоский многоугольник, заданный последовательностью точек границы. Задача метода состоит в том, чтобы получить пропорционально увеличенное изображение повышенного разрешения:

$$I(x_p, y_q), x_p = pb, y_q = qb, p = \overline{1, H}, q = \overline{1, W}, b < d, \quad (2.1)$$

причём пиксели, принадлежащие к определённому полигону должны быть вычислены с использованием известных значений функции только внутри данного полигона:

$$\begin{aligned} \forall (x, y) \in P : I(x, y) = f(I(x_{k_1}, y_{k_1}), x_{k_1}, y_{k_1}, \dots, I(x_{k_m}, y_{k_m}), x_{k_m}, y_{k_m}) : \\ (x_{k_i}, y_{k_i}) \in P \quad \forall i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Также для обеспечения линейной сложности алгоритм должен быть локальным, то есть

$$\begin{aligned} \exists L : \forall (x, y) : I(x, y) = f(I(x_{k_1}, y_{k_1}), \dots, I(x_{k_m}, y_{k_m}), x_{k_m}, y_{k_m}) : \\ \forall i = \overline{1, m} : |(x, y), (x_{k_i}, y_{k_i})| < L. \end{aligned} \quad (2.3)$$

По аналогии с ограничением на описание границ в определении бикселей, необходимо задать условия на полигоны:

1. каждый полигон должен содержать как минимум один пиксель исходного изображения, чтобы не было неопределенных значений:

$$\forall P \exists i \in [1, h], j \in [1, w] : (x_i, y_j) \in P ; \quad (2.4)$$

2. полигоны не должны иметь пересечений:

$$\forall i, j : P_i \cap P_j = \emptyset . \quad (2.5)$$

2.1.2. Метод повышения разрешения изображения

Для каждого пикселя (x_p, y_q) нового изображения решается задача интерполяции функции $I(x, y)$ по известным точкам. В качестве основы для повышения пространственного разрешения изображения будем использовать один из известных локальных методов, не требующих дополнительной информации — билинейную или бикубическую интерполяции [152]. Этот метод будем далее называть базовым.

В случае, когда все пиксели исходного изображения, влияющие на данные пикセル нового согласно (2.3) расположены в одной области, и условие (2.4) выполняется автоматически, можно считать, что в окрестности не проходит граница и можно использовать базовый метод интерполяции.

В том случае, когда пиксели исходного изображения, влияющие на данный пикセル нового изображения, лежат в разных областях, для интерполяции нового пикселя используются только те пиксели исходного изображения, которые лежат в той же области, что и данный пикセル изображения повышенного разрешения согласно (2.4).

Таким образом, вблизи известных границ объектов невозможно построение регулярной прямоугольной сетки, поэтому требуется применение методов, работающих на нерегулярных сетках. В [328] описывается такой метод, позволяющий аппроксимировать значение функции по данным, известным на нерегулярной сетке.

В качестве базового метода выбрана бикубическая интерполяция, так как она позволяет производить достаточно качественное повышение разрешения, и при этом является относительно простым, локальным, одноступенчатым методом. Этим базовым методом можно воспользоваться, когда 16 пикселов исходного изображения, ближайших к точке, для которой необходимо вычислить яркость, находятся в одной области.

В случае, если не все 16 заданных точек лежат в данной области, применяется вычисление значения яркости методом Шепарда с выбором исходных точек из пересечения искомой области с ближайшими 16 пикселями [328].

Назовём квадрат, образованный центрами четырех соседних пикселов изображения низкого разрешения ячейкой, а окружающие его 16 пикселов исходного изображения окрестностью. На рис. 2.2 представлена ячейка (заштрихованная область) и ее окрестность. Значения интерполяционной функции внутри ячейки зависят только от значений яркости в окрестности, причем для всех точек внутри ячейки метод интерполяции один и тот же: либо бикубическая интерполяция, если вся окрестность лежит в одной области, либо метод Шепарда для пикселов, лежащих в той же области, что и точка, для которой вычисляется функция [328]. Поэтому повышение разрешения состоит из повторения идентичных шагов для каждой ячейки исходного изображения, и каждого класса объектов.

Области с контрастными границами задаются в одном или нескольких векторных файлах в виде полигонов. Для определения, какой области принадлежит пикセル, производится проверка, лежит ли точка внутри какого-либо из полигонов. Так как такую проверку необходимо делать для каждого пикселя, целесообразно использовать метод вычислительной оптимизации в задаче сопоставления растровой и векторной информации при анализе спутниковых данных [41]. В зависимости от того, лежат ли точки внутри какого-либо из полигонов, каждой из них присваивается номер соответствующей области. Если все точки окрестности лежат в одной области, то к каждой точке, для которой

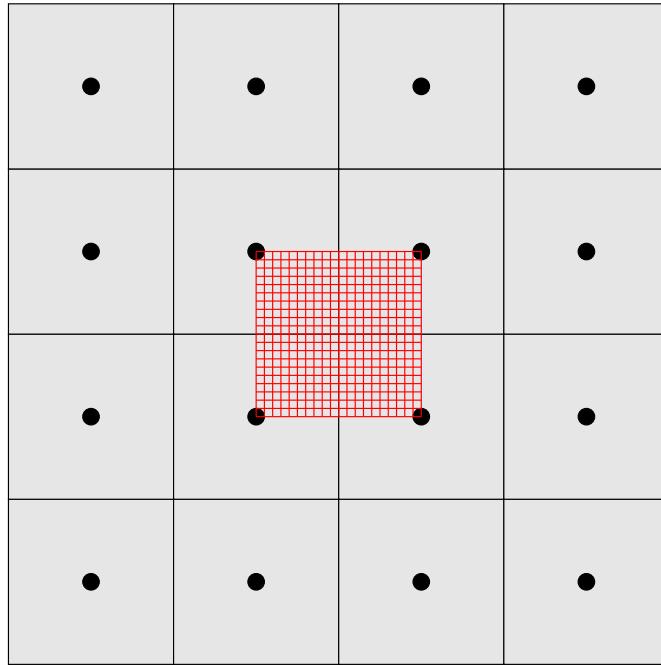


Рис. 2.2. Область изображения и 16 пикселов, используемых для интерполяции в её пределах

требуется рассчитать значение, то есть каждой точке изображения повышенного разрешения, лежащей внутри данной ячейки, применяется бикубическая интерполяция.

Если же в окрестности ячейки находятся пиксели, принадлежащие разным областям, то для каждого пикселя изображения повышенного разрешения тем же образом определяется область, к которой он принадлежит. После этого искомое значение вычисляется интерполяцией по методу Шепарда на основании точек окрестности, принадлежащих той же области [328].

2.1.3. Комплексирование растровой и векторной информации для улучшения изображений ригидных объектов

Для сохранения резких переходов яркости на границах резко очерченных контрастных объектов при интерполировании изображения необходимо наличие априорной информации о расположении границ. Для повышения разрешения изображений может быть использована априорная информация в векторной форме. Например, для аэрокосмических изображений такая информация представлена тематическими картами местности.

При описании алгоритма повышения разрешения с использованием априорной информации в векторной форме используется следующая терминология. Исходным будем называть изображение низкого разрешения, которое используется для получения результирующего изображения высокого разрешения. Растровое изображение состоит из пикселов, характеризующихся положением на изображении, соответствующими координатами на поверхности Земли (геопривязка) и яркостью. Так как пиксель аэрокосмического изображения соответствует некоторой протяжённой области на поверхности Земли, его координатами считаются координаты его геометрического центра. Интерполяция — процесс получения яркостей пикселов результирующего изображения на основании яркостей пикселов исходного.

Объект — наблюдаемый ригидный объект либо область на поверхности Земли, имеющая резко очерченные границы. На растровом изображении границы представлены перепадом яркости, который должен быть сохранён резким при повышении разрешения. Также для объектов должна быть известна информация о границах в векторной форме, например как показано на рисунке 2.3.

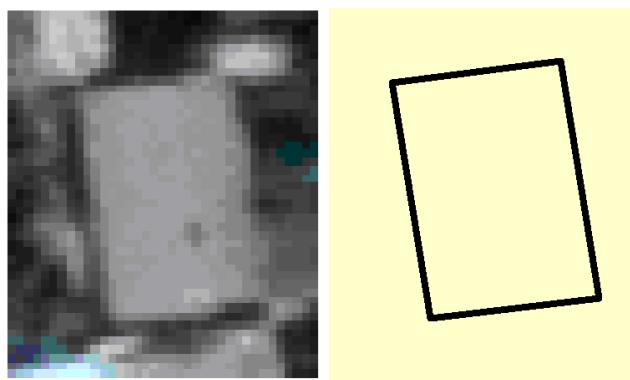


Рис. 2.3. Представление объекта на поверхности Земли (здание) в растровой (слева) и векторной (справа) формах

Разработанный алгоритм использует априорную информацию в векторной форме, представленную в виде полигонов — областей в двумерной географической или проекционной системе координат, описанных как набор замкнутых

контуров — многоугольников, представленных последовательным набором координат составляющих их точек. За счёт такого описания формы объектов координаты могут быть заданы с субпиксельной точностью. Полигон может быть односвязным (состоять из одного контура) или иметь в своём составе дополнительные контуры, описывающие вычтенные из полигона области. Каждый полигон, используемый алгоритмом, должен представлять отдельный объект, и помимо набора точек может содержать дополнительную информацию.

Разработанный метод решает проблему размытия границ объектов при интерполяции изображений с целью повышения пространственного разрешения. Такое размытие происходит при использовании алгоритмов интерполяции, основанных на локальной фильтрации исходного изображения, в которых для вычисления яркости пикселя выходного изображения вычисляется определенная комбинация яркостей соседних пикселов исходного изображения. В случае пикселов, прилежащих к границе объекта, таковыми оказываются как пиксели, координаты которых соответствуют объекту, так и соответствующие фону или соседнему объекту. В таком случае яркость пикселя, полученного интерполяцией, оказывается усреднённой яркостью по разным объектам или по объекту и фону.

В случае наличия априорной информации об объектах возможно использовать для интерполяции пикселов результирующего изображения, прилежащих к границе, значения яркости только в тех пикселях исходного изображения, которые лежат по ту же сторону границы, что и интерполируемая точка. Так, на рис. 2.4 представлен участок 4×4 пикселя исходного изображения. Для интерполяции в области результирующего изображения, находящейся слева от границы (вертикальная штриховка на рисунке), должны использоваться только пиксели слева от границы, а для пикселов результирующего изображения, находящихся справа от границы (горизонтальная штриховка на рисунке) — пиксели исходного изображения справа от границы.

Для для интерполяции с сохранением границ разработан алгоритм повы-

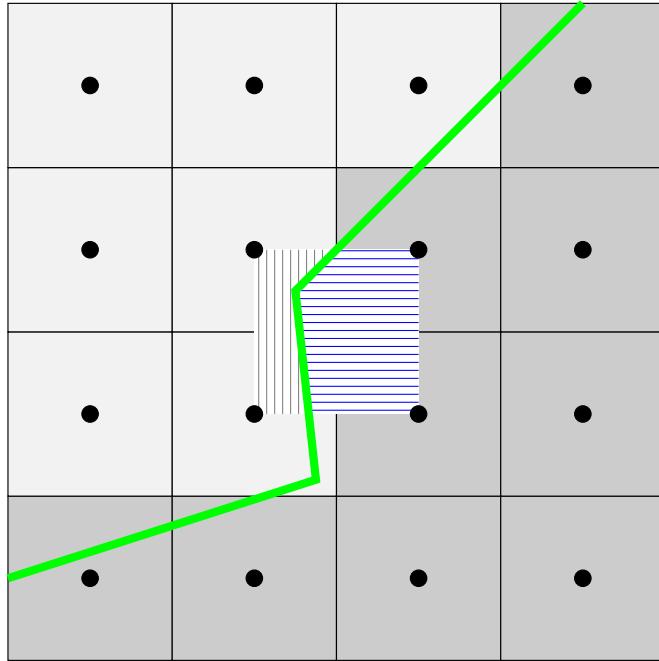


Рис. 2.4. Пример участка исходного изображения с границей, заданной в векторной форме разрешения с использованием априорной информации в векторной форме при анализе площадных объектов и границ. Разработанный алгоритм реализован в виде программы на языке программирования С для вычислительных экспериментов [69, 70]. Алгоритм обработки изображения в виде блок-схемы показан на рис. 2.5.

Опишем кратко последовательность действий алгоритма.

Подготовка векторных данных. Алгоритм принимает только априорную информацию в векторной форме, отвечающую следующим ограничениям:

1. Полигоны не должны пересекаться.
2. Каждый полигон должен содержать хотя бы один пиксель исходного изображения.

В процессе подготовки данных требуется проверить все полигоны на соответствие условиям. Полигоны, не соответствующие условию 1, требуется либо объединить, либо разбить. Объединение должно быть проведено, если пересекающиеся объекты относятся к одному типу и резкой границы между ними быть

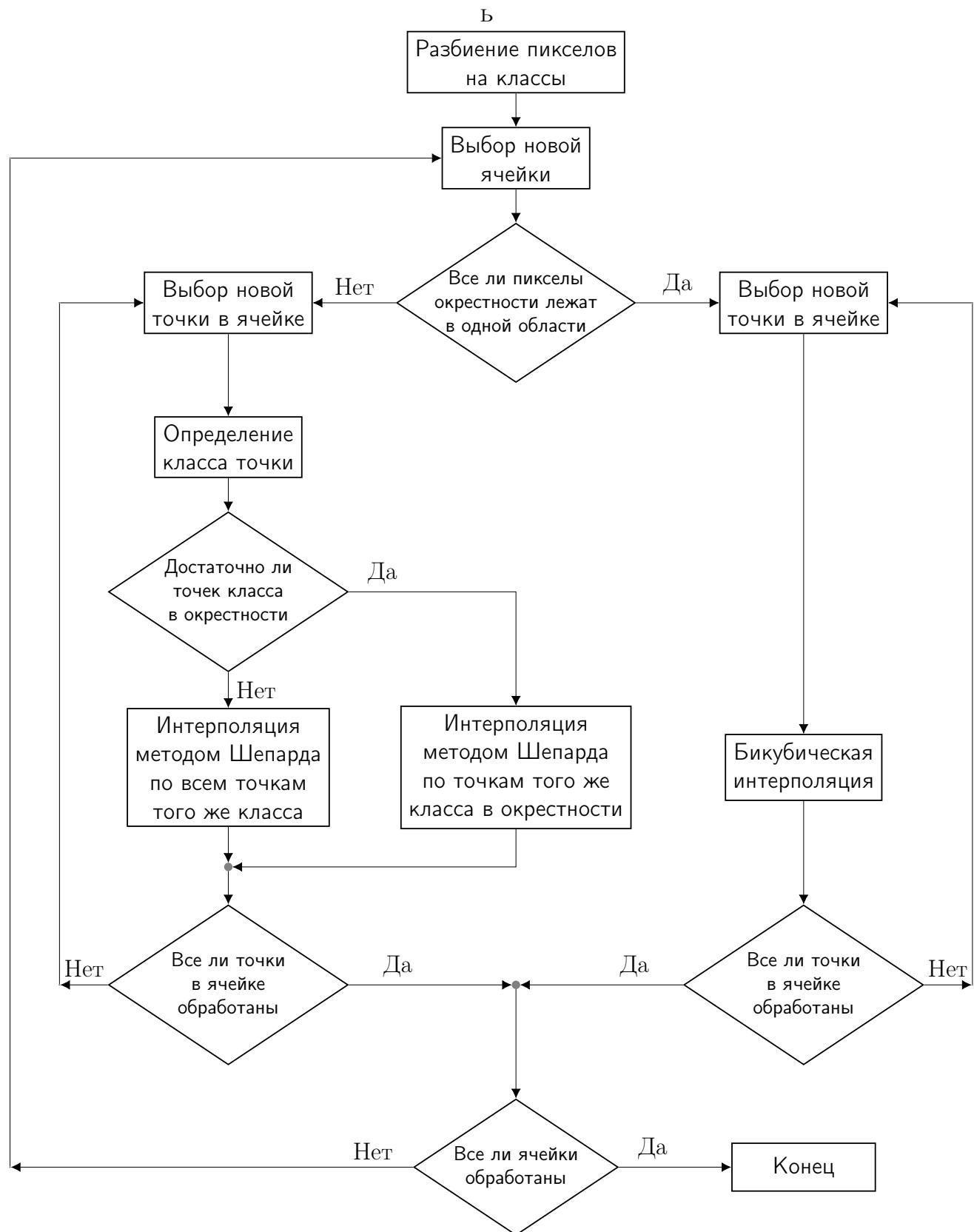


Рис. 2.5. Блок-схема алгоритма повышения разрешения с использованием априорной векторной информации

не должно, например, если это различные участки дорожной сети. В таком случае, их можно объединить в один объект того же типа. В случае если полигоны соответствуют различным типам объектов, и между ними должны быть резкие границы, требуется задать порядок слоёв, чтобы определить, какой из объектов находится сверху. Это возможно, например, если пересекаются объекты «дорога» и «река», в таком случае «верхним» оказывается дорога, а нижним — река, если пересечение устроено в виде моста. После этого находящийся сверху объект остаётся без изменения, а находящийся снизу разбивается на части по границам «верхнего» объекта, и те части, которые входят в «верхний» объект отбрасываются и не участвуют в повышении разрешения.

Полигоны, не соответствующие условиям, должны быть отброшены. Это означает, что объект, границы которого известны из векторных данных, слишком мал, чтобы надёжно быть зарегистрированным на исходном изображении, и сохранение его границ невозможно и бессмысленно.

Классификация пикселов. Каждый тип объектов на земной поверхности представлен набором соответствующих ему полигонов в векторном представлении.

Для разбиения пикселов на классы сначала создаётся растр повышенного разрешения, на данном этапе не имеющий значений яркости, однако геопривязанный, так что можно для каждой его точки определить географические координаты.

Затем при использовании векторной информации строятся растровые маски для изображений низкого и повышенного разрешения, в которые вместо значений яркости записан номер типа объекта, или ноль, если данная точка не входит ни в один из описанных типов (является фоном). Этот этап используется, так как в дальнейшем потребуется неоднократное обращение к точкам с определением, какой тип объектов они представляют. Определение класса по растровой маске вычислительно менее затратно.

Пиксель относится к тому классу, который соответствует полигону, внутрь которого попадает геометрический центр пикселя [120].

Ячейкой в исходном изображении является квадратная область между центрами соседних четырех пикселов, окрестностью ячейки — область вокруг неё размером 4×4 пикселя (рис. 2.4). Именно такая конфигурация используется для бикубической интерполяции: значение функции яркости в любой точке внутри ячейки может быть интерполировано по 16 пикселов окрестности.

В результирующем изображении, соответственно, выбираются все пиксели, географические координаты которых лежат внутри ячейки, и для них производится интерполяция. Принадлежность к различным классам определена в виде растровой маски, созданной на предыдущем этапе работы алгоритма. При этом, определение принадлежности к тому или иному классу производится для каждой точки результирующего изображения, входящей в ячейку.

Если точки окрестности принадлежат разным классам, вблизи интерполируемой точки проходит резкая граница, то есть в исходные значения для бикубической интерполяции попадают пиксели разных классов, что может создать нежелательное размытие.

В этом случае применяется метод Шепарда [328] для нерегулярной сетки, который состоит в интерполяции по ближайшим точкам.

Обработка выполняется для каждой ячейки исходного изображения, причём в случае обработки ячеек, лежащих на границе изображения, значения яркости пикселов вне изображения получаются операцией отражением от границы изображения:

$$\begin{aligned} I(-k, i) &= I(k, i); \\ I(j, -k) &= I(j, k); \\ I(M + k - 1, i) &= I(M - k, i); \\ I(j, N + k - 1) &= I(j, N - k); \end{aligned} \tag{2.6}$$

где I — функция яркости, M, N — размеры изображения, $i \in \{0, \dots, N\}$,

$j \in \{0, \dots, M\}$, $k \in \{1, 2, 3, 4\}$. Последнее условия связано с тем, что размер возможной окрестности для каждого пикселя ограничен восемью соседними пикселями. Географические координаты (значения широты и долготы) могут быть вычислены так же, как для точек изображения.

Чтобы оценить качество повышения разрешения, результаты сравниваются с эталоном — изображением, из которого загрублением получено исходное изображение. Для этого применяются различные количественные оценки, в рамках данного исследования были выбраны две: среднеквадратичная ошибка RMSE (формула (1.2)) и индекс структурного сходства SSIM (формула (1.5)).

Сравнивались результаты, полученные следующими методами:

1. метод бикубической интерполяции без учета границ;
2. метод Шепарда по всей области без учета границ;
3. метод Шепарда с учетом границ;
4. разработанный метод.

Результат работы метода на тестовых изображениях приведён в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Сравнение повышения разрешения изображений различными методами

	Бикубическая интерполяция	Метод Шепарда	Метод Шепарда с границами	Разработанный метод
RMSE (меньше-лучше)	433.4	483.88	386.71 3	366.37
MSSIM (больше-лучше)	0.45844	0.42699	0.45002	0.47107

Время работы представленного алгоритма зависит от концентрации границ, заданных векторными данными. В случае отсутствия границ время работы

соответствует бикубической интерполяции, в случае наличия их в окрестности любой ячейки — методу Шепарда. На тестовых данных время работы бикубической интерполяции, разработанного алгоритма и метода Шепарда соотносится как 1 : 5 : 60.



Рис. 2.6. Иллюстрация повышения разрешения с использованием априорной векторной информации.

Полученные результаты показывают, что применение векторной информации при использовании бикубической интерполяции в качестве базового метода повышения разрешения позволяет улучшить результат. Разработанный метод, сочетающий в себе подходы, примененные в базовых методах, в рассмотренных усло-

виях превосходит их оба по качеству повышения разрешения изображения, измеренному с помощью критериев (1.2), (1.5). При этом остается возможность применять различные методы интерполяции как в удалении от границ, так и вблизи границ, сочетая их для достижения лучшего результата.

Следует заметить, что повышение качества требует точного позиционирования векторных данных относительно растровых, иначе неизбежно появление артефактов — перепадов яркости там, где их быть не должно, и соответственно снижение качества. Данный метод может быть применён для повышения разрешения изображений с целью последующей компьютерной обработки методами, использующими значения яркости — сегментации, классификации и др.

Таким образом, разработан метод повышения пространственного разрешения космических изображений с использованием априорной информации о ригидных объектах, представленной в векторной форме.

2.2. Детектирование антропогенных объектов известной формы на цветных аэрокосмических изображениях

Одна из задач, решаемых с помощью аэрокосмических данных — оперативное детектирование и отслеживание перемещения антропогенных объектов, например транспортных средств [10]. Аэрофотосъёмка беспилотными летательными аппаратами позволяет оперативно получать изображения более высокого разрешения и более оперативно, чем спутниковая съёмка. Существуют различные подходы к решению задачи оперативного детектирования транспортных средств и, в частности, автомобилей на аэрокосмических изображениях. Для однокрасочных панхроматических изображений возможен подход на основе поиска контуров машин среди выделенных границ на изображении [331, 366], либо корреляторов в схеме AdaBoost [306]. Мультиспектральные изображения позволяют выделять области с заданными характеристиками [289, 339]. Разработанный метод основан на выделении областей на основании цветовых характеристик

составляющих их пикселов [108, 285, 286]. Входными данными являются аэрокосмические изображения сверхвысокого разрешения, позволяющие выделить геометрические особенности объекта. Рассматривается цветное изображение, содержащее красный, зеленый и синий (RGB) каналы:

$$\begin{aligned} R : \{1, \dots, M\} \times \{1, \dots, N\} &\rightarrow \{1, \dots, I\}, \\ G : \{1, \dots, M\} \times \{1, \dots, N\} &\rightarrow \{1, \dots, I\}, \\ B : \{1, \dots, M\} \times \{1, \dots, N\} &\rightarrow \{1, \dots, I\}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где M, N — размеры изображения в пикселях, I — наибольшая интенсивность, каждому пикселу изображения соответствует вектор яркостей $\mathbf{C} = (R, G, B)$. Задача ставится так: найти антропогенные ригидные объекты (например, автомобили) и определить их положение, ориентации, размеры. Предлагаемый подход к решению задачи основан на том, что большинство автомобилей имеет однотонную окраску и при этом тон этой окраски, как правило, отличается от природных и антропогенных фонов. Метод строится на выделении областей с близкими цветовыми характеристиками. Доля автомобилей, окрашенных в несколько цветов невелика и не отразится существенно на итоговой статистике. Алгоритм состоит в выполнения следующей последовательности процедур [286]:

1. выделение тоновых характеристик;
2. формирование областей одинакового тона путём кластеризации;
3. выделение гипотетических автомобилей как однотонных областей;
4. вычисление признаков областей и сортировка.

Опишем подробнее шаги алгоритма.

Для выделения тоновых характеристик используются нормализованные яркости в трёх каналах:

$$r = \frac{IR}{R + G + B}, g = \frac{IG}{R + G + B}, b = \frac{IB}{R + G + B}, \quad (2.8)$$

то же самое в векторной форме:

$$\mathbf{c} = \frac{I\mathbf{C}}{\|C\|_1}. \quad (2.9)$$

Вся дальнейшая обработка изображения происходит на основе нормированных цветов.

Для формирования областей одинакового тона изображение сегментируется на связные области, внутри которых пиксели близки между собой по тону \mathbf{c} , а пиксели в соседних областях заметно отличаются. Используется метод слияния областей [245]: близкие по цветовым характеристикам области последовательно объединяются, начиная с областей состоящих из единичных пикселов [108, 285, 286].

При инициализации алгоритма слияния создаётся список активных областей, каждая из которых состоит из одной точки изображения. В дальнейшем на каждом проходе алгоритма просматривается список активных областей и попарно сливаются те из них, которые отвечают заданным условиям и не являются полученными на данном проходе. Слияние (объединение) двух областей W_1 и W_2 происходит при выполнении следующих условий:

$$W_1 \in N(W_2), \quad |\mathbf{c}(W_1) - \mathbf{c}(W_2)| < T, \quad (2.10)$$

где T — порог слияния.

Обработка заканчивается, когда на очередном проходе не произведено ни одного объединения, так как заданные условия слияния уже не выполняются. Условия могут различаться на разных проходах. Список активных областей организован в виде очереди, причем очередная область берётся из начала, а новые активные области добавляются в конец очереди. Проходы алгоритма осуществляются один за другим, без возврата в начало. После завершения прохода очереди сканирование очереди начинается самого начала. Последовательность проходов и поколений, приводящая к окончанию очереди, называется эрой. Обработка заканчивается, когда на протяжении очередной эры не происходит ни одного слияния [285, 286].

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.8. Пример участка изображения до обработки и после кластеризации показан на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Слева — фрагмент исходного изображения, справа — этот же фрагмент после кластеризации (цвета синтезированные

Для отбраковки выделенных областей по геометрическим признакам выполняется проверка областей. Область должна иметь подходящую площадь, не быть слишком вытянутой и не иметь полостей. Для сортировки областей используются признаки области, характерные для автомобиля: длина от 3 до 5 метров, ширина от 1,5 до 2 метров, форма — близкая к прямоугольной. Площадь вычисляется с учётом пространственного разрешения изображений. Площадь области является критерием отбора на первом этапе. Для учёта других геометрических признаков выделенной области используется эквивалентный эллипс — эллипс, имеющий такой же момент инерции, как и выделенная область. Для каждой области, прошёдшей сортировку по площади, рассчитываются длины большой и малой полуосей эквивалентного эллипса a, b . Через его параметры выражаются условия для области, соответствующей автомобилю:

$$1.3 < a/b < 3, \quad \pi ab < 2M. \quad (2.11)$$

Результат отбраковки на фрагменте изображения приведён на рис. 2.9.

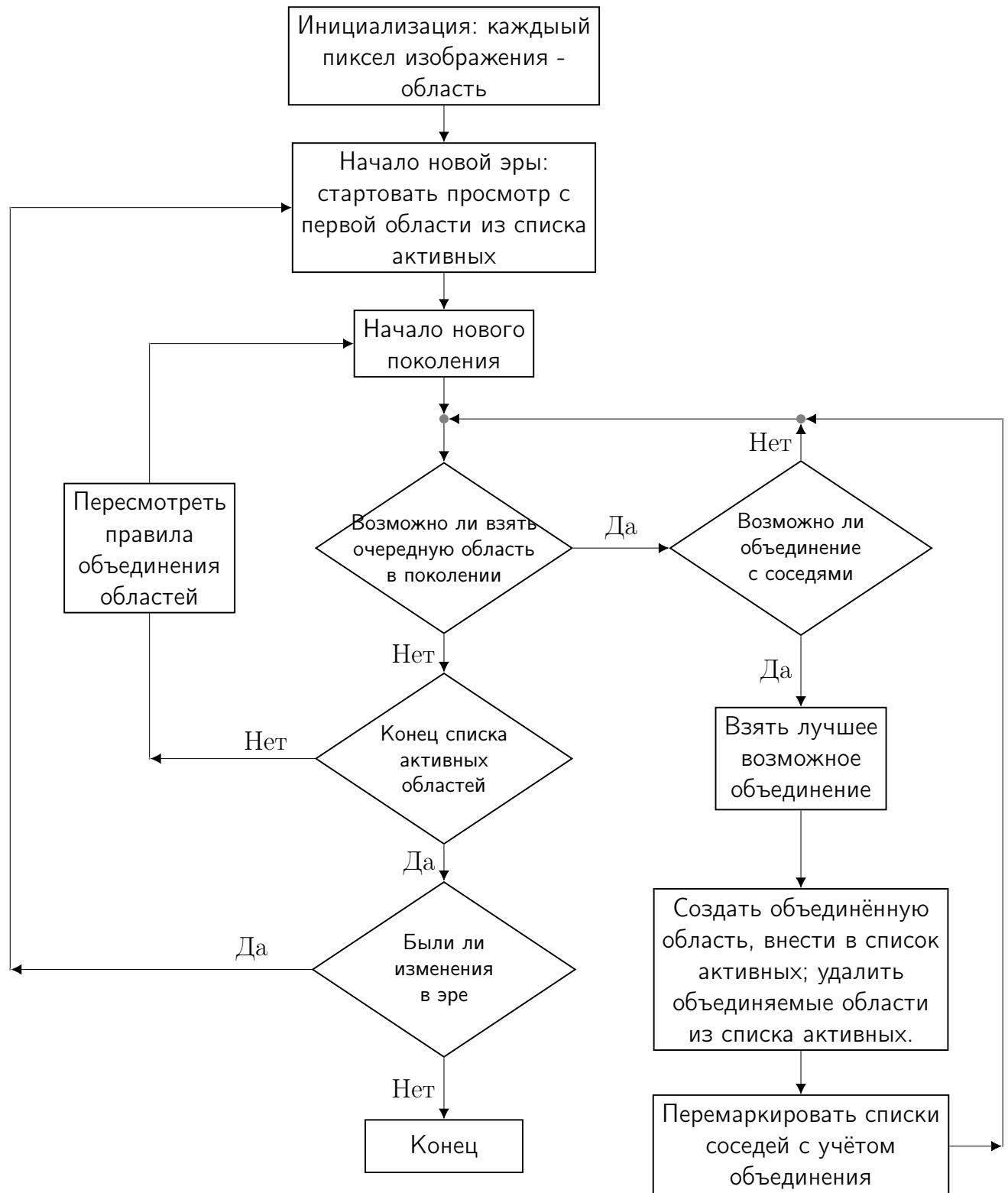


Рис. 2.8. Блок-схема алгоритма кластеризации слиянием

Основная часть вычислительной сложности алгоритма заключается в формировании областей одинакового тона путём кластеризации. Вычислительная сложность кластеризации составляет $O(N^2)$ в худшем случае и $O(N \log N)$ в

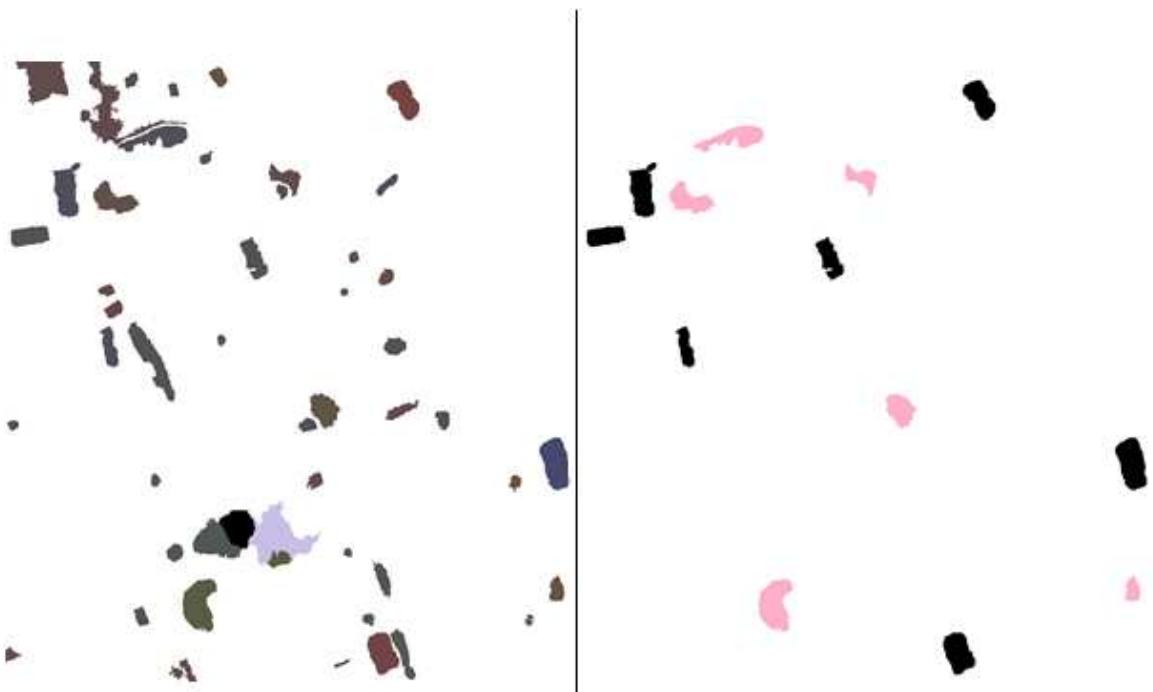


Рис. 2.9. Слева области после сортировки по площади, справа — после отбора по параметрам эквивалентного эллипса. Чёрные области — верно детектированные автомобили, розовые — ложные детектирования

среднем на реальных изображениях [285, 286].

2.2.1. Результаты тестирования алгоритма

Для тестирования алгоритма использована серия изображений, полученных аэрофотосъёмкой с пространственным разрешением 5–15 сантиметров в трёх каналах с динамическим диапазоном 8 бит. Было использовано 46 изображений, содержащих в общей сложности 2226 автомобилей на фоне городской и сельской местности.

В результате тестирования получено 60% ложных срабатываний и 28% пропусков цели. Основной причиной пропусков цели является спектральная близость автомобиля к фону, так как при переходе к пространству нормализованных цветов белые и серые автомобили становятся близки по характеристикам к асфальту.

Большое количество ложных срабатываний связано с достаточно слабыми ограничениями на геометрические параметры автомобиля, под которые попа-

дает любой компактный объект подходящего размера. Более строгое описание формы, близкой к прямоугольнику, учёт наличия видимого сверху лобового стекла отличного от основной площади цвета и наличия у автомобиля тени может уменьшить количество ошибок [238], однако это необходимо проводить одновременно с усовершенствованием детектирования потенциальных автомобилей. При совместном использовании предложенного алгоритма с каскадом классификаторов или нейронной сетью может существенно уменьшить вероятности ошибок [226, 306, 366].

Таким образом, на примере детектирования автомобилей показано, что предложенный алгоритм принципиально работоспособен для предварительного выделения объектов на аэрокосмических изображениях высокого разрешения на основе характеристик цвета и формы объектов. Такой алгоритм может быть комплексирован с нейросетевым алгоритмом сегментации аэрокосмических изображений, используемым при дистанционном измерении трёхмерных характеристик объектов, который описан в разделе 3.4.

2.3. Метод нейросетевого сверхразрешения

аэрокосмических изображений наземных антропогенных объектов

2.3.1. Подход к сверхразрешению по одному изображению

Выше, в Главе 1, и в настоящей главе рассмотрены различные способы восполнения недостающих данных при повышении пространственного разрешения изображений. Описаны методы, которые привлекают дополнительные источники информации: растровые изображения более высокого разрешения другого спектрального диапазона, векторные данные, полученные из различных источников, в том числе из подспутниковых измерений. Для приложений, в которых дополнительная информация недоступна, перспективно применение искус-

ственных нейронных сетей (ИНС). В настоящем разделе решается задача развития искусственных нейронных сетей (ИНС), способных повышать пространственное разрешение в 2–4 раза, опираясь исключительно на данные исходного изображения. Данная задача в литературе получила название SingleImageSuper-Resolution (SISR) — сверхразрешение по одиночному изображению [197].

На сегодняшний день направление искусственных нейронных сетей (ИНС) является наиболее перспективным ввиду появления в открытом доступе большого количества данных дистанционного зондирования Земли субметрового пространственного разрешения [154, 250, 281, 324, 345], на которых такие сети могут тренироваться.

Метод сверхразрешения имеет существенное отличие от широко используемых в практике обработки данных ДЗЗ методов паншарпенинга, основанных на слиянии изображений различных спектральных каналов, имеющих различное пространственное разрешение. В отличие от задачи повышения разрешения слиянием изображения при сверхразрешении не привлекается дополнительных источников информации для обработки спутниковых изображений. При этом для восполнения недостающей информации используются специальные алгоритмы, основанные на методах машинного обучения. Такие алгоритмы должны проходить процедуры машинного обучения на специально подготовленных наборах обучающих данных. При этом необходим выбор нейросетевой модели, обеспечивающей оптимальный результат для последующей семантической сегментации спутниковых изображений, в том числе при космическом мониторинге антропогенных объектов.

2.3.2. Выбор модели нейросети для повышения качества изображений

При создании ИНС, предназначенных для обработки спутниковых изображений антропогенных ригидных объектов, возникает проблема дефицита обучающих данных [20–22, 62, 146]. Поэтому необходима компактная высокопроиз-

водительная и адаптивная модель нейросети, не склонная к переобучению и работоспособная на панхроматических изображениях. Для решения широкого круга задач развивается метод, состоящий в комплексировании двух нейросетевых метода суперразрешения, имеющих отличающиеся области применения и требования по обучению [21]:

- Метод ГСН - Генеративно-состязательная сеть (ГСН) со специально подобранный функцией потерь.
- Метод L1 - многомасштабная ИНС с простейшей функцией потерь на основе средней абсолютной ошибки.

2.3.3. Генеративно-состязательные нейросети для повышения качества изображений

Разработанный метод генеративно-состязательных нейросетей (ГСН) перспективен, хотя и более сложен для развития в сравнении с методом L1, описанным ниже.

Подходы, основанные на модификации генеративно-состязательных нейросетей (ГСН) (от англ. Generative adversarial network – *GAN*) превосходят по качеству другие нейросетевые архитектуры при двух-четырехкратном повышении пространственного разрешения изображений [246, 267, 280, 352]. Впервые они были предложены в [224].

Исследования показали, что модификации ГСН превосходят по качеству другие нейросетевые архитектуры при двух-четырехкратном повышении пространственного разрешения изображений [84, 242]. Однако, при этом метод ГСН требует длительного обучения ИНС с использованием обучающих выборок, соответствующих классам объектов, которые должны преимущественно исследоваться в процессе космического мониторинга. Создание качественных, аккуратно размеченных обучающих выборок является важным этапом разработки генеративно-состязательных сетей, предназначенных для повышения простран-

ственного разрешения спутниковых данных при решении задач проекта.

Генеративно-состязательная сеть состоит из двух нейросетей, дискриминатора и генератора, соревнующихся друг с другом. Задачей генератора G является формирование объектов, максимально схожих с объектами обучающей выборки. Задача дискриминатора D — отличать объекты обучающей выборки от сгенерированных. Генератор и дискриминатор тренируются параллельно, формируя и обучаясь отличать объекты, которые имеют все более сложное распределение, приближающееся к истинному. На рис. 2.10 показана схема тренировки и работы ГСН [84, 242].

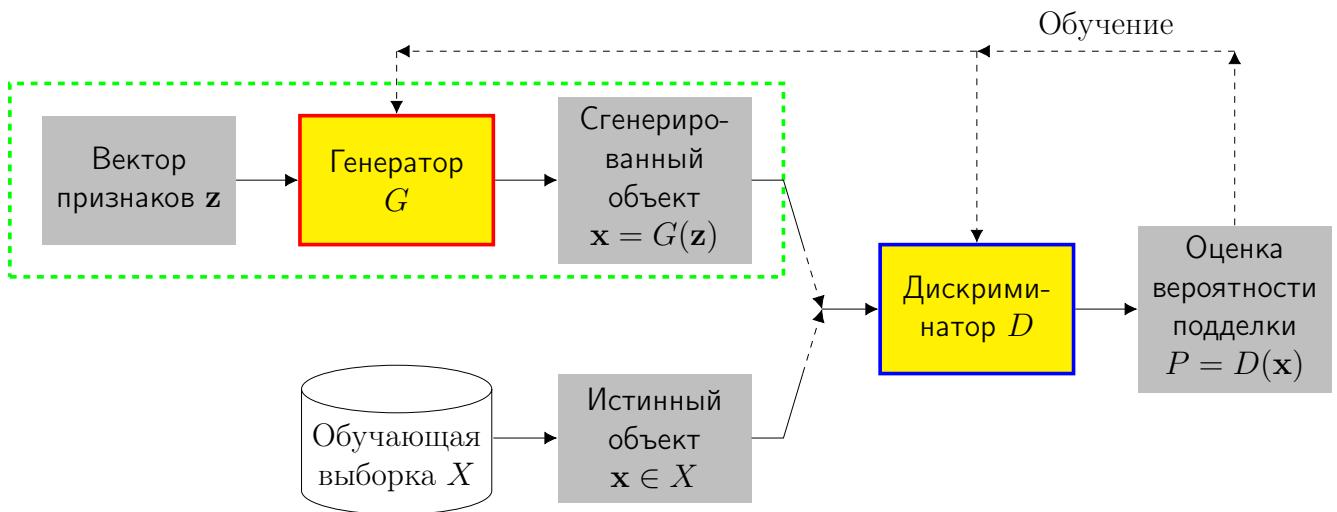


Рис. 2.10. Общая схема ГСН

Для тренировки используется обучающая выборка X , содержащая примеры истинных объектов. Обозначим вектор признаков через \mathbf{x} ; можно считать, что признаки берутся из некоторого распределения с плотностью вероятности $p(\mathbf{x})$. На каждом шаге тренировки на вход генератора G поступает вектор $\mathbf{z} \sim p(\mathbf{z})$, который может быть набором случайных чисел. Генератор выдает признаки $\hat{\mathbf{x}} = G(\mathbf{z})$, моделирующие истинный объект. Дискриминатор D получает на вход или признаки истинного объекта $\mathbf{x} \in X$, взятые из обучающей выборки, или сгенерированные $\hat{\mathbf{x}}$ и выдает оценку (вероятность) $P = D(\mathbf{x})$ того, что на вход поданы истинные признаки. В зависимости от величины P и того, какие признаки использовались на самом деле, происходит обучение ге-

нератора и дискриминатора. Штриховой рамкой на рисунке выделен «рабочий цикл», все остальные блоки используются на этапе тренировки. Тренировка ГСН может быть представлена как задача оптимизации:

$$\min_{\theta_G} \max_{\theta_D} V(G, D) , \quad (2.12)$$

$$V(G, D) = \mathbb{E}_{p(\mathbf{x})} [\log D(\mathbf{x})] + \mathbb{E}_{p(\mathbf{z})} [\log \{1 - D(G(\mathbf{z}))\}] ,$$

где θ_G и θ_D — параметры (веса связей между нейронами) нейросетей G и D соответственно, $\mathbb{E}_a(b)$ — матожидание b по распределению a .

Эта общая схема несколько изменена для задачи повышения разрешения. Введём следующие определения:

Изображение высокого разрешения (high resolution image, I^{HR}) — изображение из обучающей выборки, $I^{HR} \in X$. На рис. 2.11,а представлен пример такого изображения.

Изображение низкого разрешения (low resolution image, I^{LR}) — это исходное изображение на этапе работы, на этапе тренировки оно получается из изображения обучающей выборки. На рис. 2.11,б представлен пример такого изображения.

Изображение со сверхразрешением (super resolution image, I^{SR}) получается из I^{LR} процедурой повышения разрешения, здесь такой процедурой является использование нейросети-генератора G : $I^{SR} = G(I^{LR})$.

Загруженное изображение (downsampled image, I^{DS}) получается из I^{SR} снижением разрешения аналогично тому, как из I^{HR} вычисляется I^{LR} .

Растровое изображение может быть представлено как вектор, значениями которого являются значения яркости пикселов, взятые в порядке развёртки. Это называется векторизацией: $\mathbf{x} = \text{vec}(I)$. Далее для простоты будем опускать это обозначение. В задаче сверхразрешения генератор G получает на вход изображение низкого разрешения I^{LR} и пытается восстановить из него I^{HR} — это «рабочий цикл» (рис. 2.12).

Размеры обучающих выборок (датасетов) изображений, на которых тести-

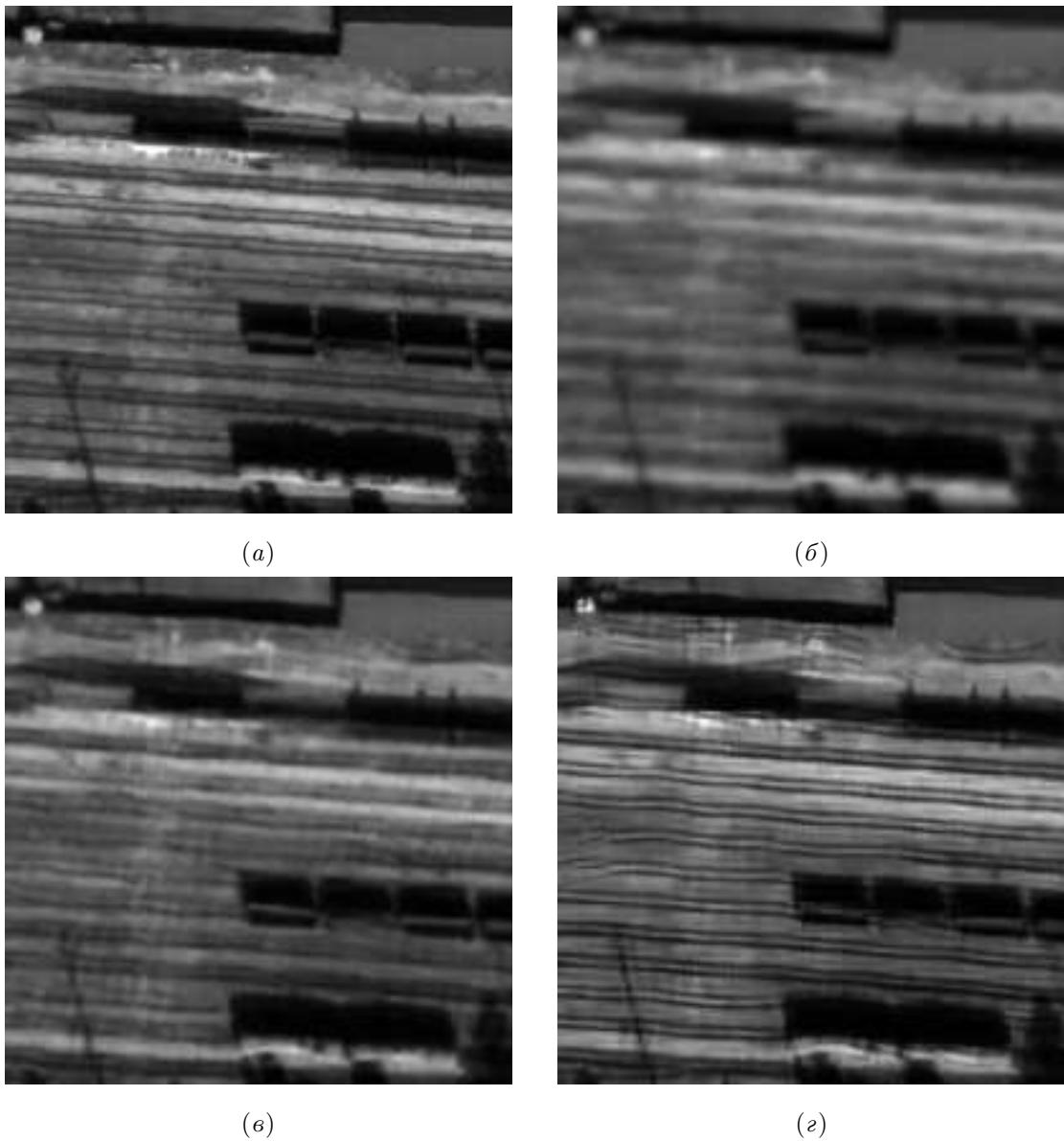


Рис. 2.11. Примеры изображений: а — исходное I^{HR} , б — низкого разрешения I^{LR} , в — результат $G(I^{LR})$ при обучении (2.13), г — результат $G(I^{LR})$ при обучении (2.18)

ровались ГСН и иные подходы повышения разрешения, исчисляются десятками тысяч. Например, в наборе VOC2012 [206] примерно 17000 цветных и черно-белых снимков для 20 различных классов объектов, размеченных для решения задач классификации сцены, сегментации и детектирования объектов на изображениях, классификации действий.

Для тренировки было бы оптимально использовать пары (изображение высокого разрешения; изображение низкого разрешения), зарегистрированные одновременно, с тем, чтобы ГСН обучалась наиболее правдоподобным образом

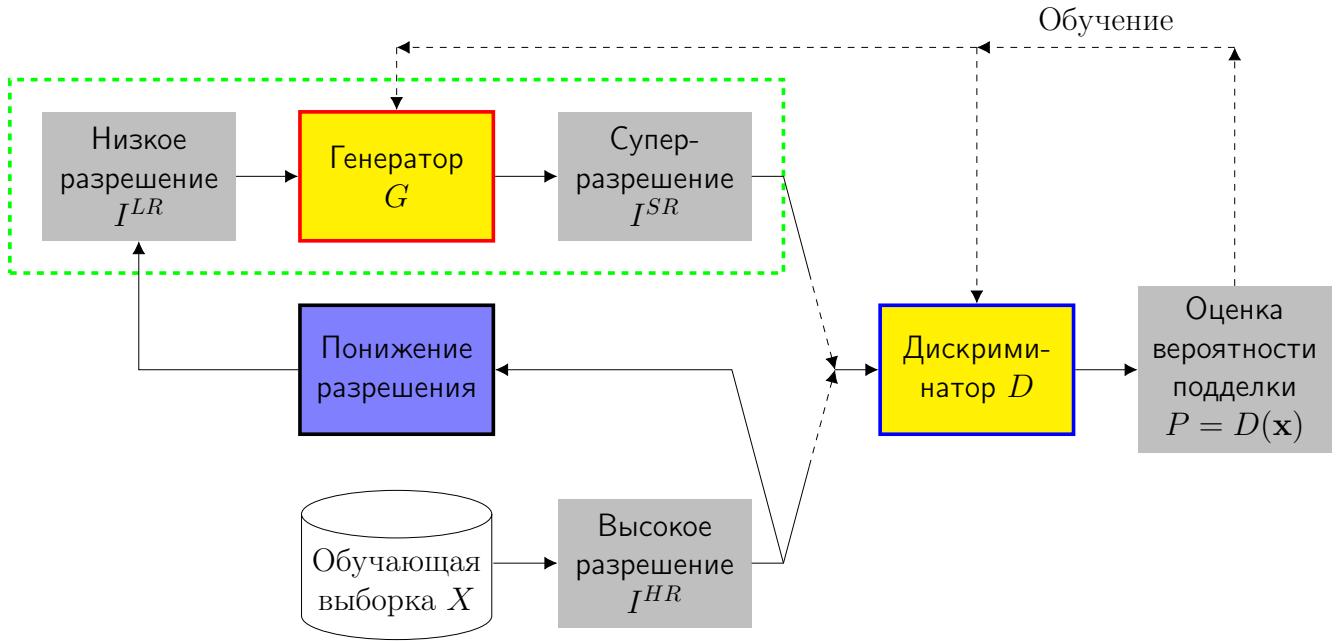


Рис. 2.12. Схема ГСН для повышения разрешения

восстанавливать высокое разрешение из низкого. Однако в действительности такие данные крайне редко доступны. Поэтому применяется следующий способ [51]. Для тренировки используется выборка изображений высокого разрешения I^{HR} . Изображения низкого разрешения I^{LR} получаются из них специальной процедурой снижения разрешения L , моделирующей регистрацию изображения менее качественной аппаратурой. Снижение разрешения в работе осуществлялось бикубической интерполяцией [253].

Таким образом можно переписать целевую функцию (2.12) в виде

$$V(G, D) = \mathbb{E}_{p(I^{HR})} [\log D(I^{HR})] + \mathbb{E}_{p(I^{HR})} [\log \{1 - D(G(L(I^{HR})))\}] . \quad (2.13)$$

Сеть, оптимизирующую функцию (2.13), назовем *ГСН сверхразрешения* (ГСНСР, super resolution GAN, SRGAN).

Далее исследована возможность повышения разрешения панхроматических спутниковых снимков субметрового пространственного разрешения без привлечения дополнительной информации при помощи ГСН. Одной из вспомогательных задач стало создание обучающей выборки для конкретной прикладной области изображений объектов железнодорожного транспорта.

Выбор функции потерь

Приведем описание функции потерь ($\Phi\pi$), используемой в задаче повышения разрешения изображений на основе ГСНСР. Описано влияние исследуемых $\Phi\pi$ на результат обучения выбранных моделей, на основании которого предлагаются усовершенствованная $\Phi\pi$ для данной модели.

Функция потерь общих изменений $\Phi\pi$ общих изменений (total variation loss) используется для обеспечения пространственной непрерывности сгенерированных изображений. Впервые она предложена для задачи повышения разрешения в [159], в ГСНСР она используется на одном из наборов данных. $\Phi\pi$ общих изменений задаётся в виде

$$U_{TVL}(I^{SR}) = \frac{1}{hwc} \sum_{i,j,k} \sqrt{\left(I_{i,j+1,k}^{SR} - I_{i,j,k}^{SR}\right)^2 + \left(I_{i+1,j,k}^{SR} - I_{i,j,k}^{SR}\right)^2}, \quad (2.14)$$

где h, w, c — высота, ширина и количество каналов сгенерированного изображения соответственно, $I_{i,j,k}^{SR}$ — значение пикселя изображения I^{SR} с координатами (i, j, k) .

Функция потерь согласованности цикла $\Phi\pi$ согласованности цикла (cycle consistency loss) предложена в задаче перевода одного изображения в другое [367], к задаче повышения разрешения применена в [362]. Её идея заключается в том, что сгенерированное изображение I^{SR} снова приводится к изображению низкого разрешения I^{DS} , которое должно быть идентично исходному изображению низкого разрешения I^{LR} . $\Phi\pi$ согласованности цикла вычисляется как среднеквадратичное отклонение:

$$U_{cycle}(I^{DS}, I^{LR}) = \frac{1}{hwc} \sqrt{\sum_{i,j,k} \left(I_{i,j,k}^{DS} - I_{i,j,k}^{LR}\right)^2}. \quad (2.15)$$

К модели ГСНСР, использующей также $\Phi\pi$ общих изменений, добавлялась $\Phi\pi$ согласованности цикла с различными весами.

В табл.2.2 приведены меры качества, полученные при добавлении к целевой функции ФП согласованности цикла с различными весами.

Таблица 2.2. Влияние веса ФП согласованности цикла на меры качества изображения

Вес ФП	PSNR (больше-лучше)	SSIM (больше-лучше)
0	25.09	0.746
10^{-5}	25.35	0.754
10^{-4}	25.64	0.761
10^{-3}	25.17	0.742
10^{-2}	24.69	0.727
10^{-1}	24.72	0.729
1	24.77	0.726

Функция потерь текстуры *ФП текстуры* (texture loss), предложенная в [218], является основной составляющей в задаче передачи стиля изображения [217]. К задаче повышения разрешения эта ФП впервые применена в [327].

Текстура изображения определяется из корреляции между значениями функции активации по разным каналам одного и того же слоя, при прохождении изображения через свёрточную нейронную сеть, предложенную в работе [330]. Используется матрица Грама $G^{(l)} \in \mathbb{R}^{c_l \times c_l}$ (l — номер слоя нейросети , c_l — количество каналов в этом слое), которая отражает сходство между каждой парой векторов: если два вектора похожи друг на друга, то их скалярное произведение будет большим и, следовательно, матрица Грама будет иметь большие значения. Необходимо минимизировать расстояние между двумя матрицами Грама, соответствующими реальному и сгенерированному изображениям [192].

Компоненты матрицы $G^{(l)}$ задаются как

$$G_{ij}^{(l)}(I) = \left\langle \phi_i^{(l)}(I), \phi_j^{(l)}(I) \right\rangle, \quad (2.16)$$

где $\phi_i^{(l)}$ — карта признаков i -го канала в l -м слое, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — скалярное произведение (сумма произведений соответствующих значений) слоёв нейросетей. Тогда сама ФП текстуры выглядит следующим образом:

$$U_{texture}(I^{SR}, I^{HR}) = \sum_{c_l, l \in \Lambda} \frac{1}{c_l^2} \sqrt{\sum_{i,j} \left(G_{ij}^{(l)}(I^{SR}) - G_{ij}^{(l)}(I^{HR}) \right)^2}. \quad (2.17)$$

Внешнее суммирование берётся на выходе слоев активации, в используемой конфигурации сети — это слои с номерами $\Lambda = \{8, 17, 26, 35\}$ [330]. К модели ГСНСР, применяющей также ФП общих изменений, добавлялась ФП текстуры с различными весами. В табл.2.3 приведены меры качества, полученные при добавлении к целевой функции ФП текстуры с различными весами.

Таблица 2.3. Влияние веса ФП потерь текстуры на меры качества изображения

Вес ФП	PSNR (больше-лучше)	SSIM (больше-лучше)
0	25.09	0.746
10^{-4}	25.25	0.756
10^{-3}	25.18	0.738
10^{-2}	25.34	0.762
10^{-1}	26.84	0.811
1	25.23	0.753

На рис. 2.13 представлена схема расчета ФП согласованности цикла и ФП текстуры.

Комбинация ФП. Произведена попытка скомбинировать исследуемые функции: к модели ГСНСР, использующей также ФП общих изменений, добавлены

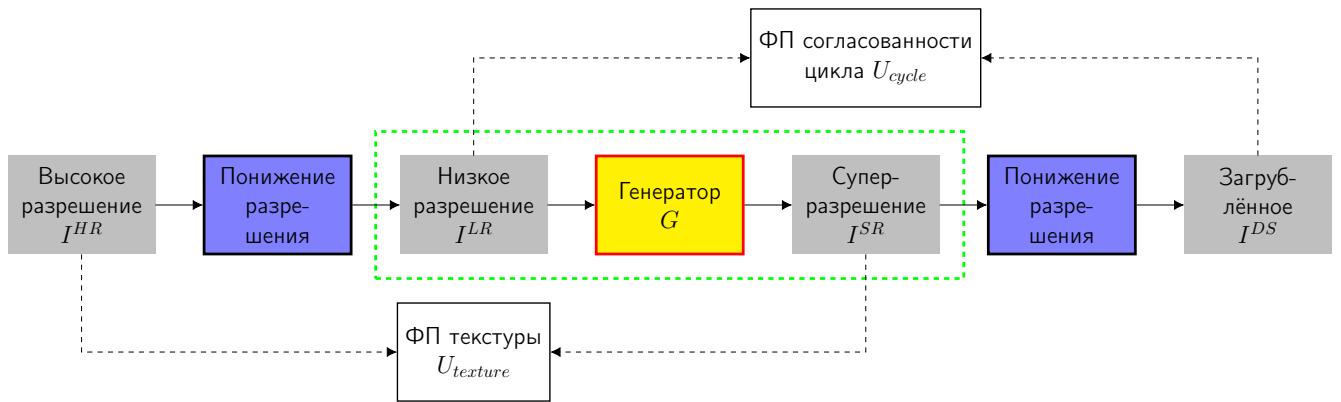


Рис. 2.13. Схема вычисления ФП

ФП текстуры и согласованности цикла с коэффициентами, показавшими наилучший результат в разд. 2.2 и 2.3.

2.3.4. Развитие метода обучения ИНС

Развиваемый метод L1 представляет оптимальное решение для обработки изображений различного содержания. Он не привязан к определенным типам объектов, что делает его достаточно универсальным. Метод использует модель Multi-scale Residual Network [21, 271]. Ключевыми факторами для выбора такой модели стали ее компактность – более шести миллионов свободных параметров, а также работоспособность на одноканальных изображениях. В качестве функции потерь при обучении использовалась MeanAbsoluteError (L1 Loss), как наиболее сбалансированное между вычислительной сложностью и результативностью и получило подтверждение в других исследованиях [365]. Для достижения эталонного разрешения выполняется операция суперразрешения на 1 итерацию больше, чем необходимо для достижения эталонного значения, после чего разрешение понижается с помощью процедуры билинейной передискретизации. Для обучения в условиях дефицита обучающих образцов применялся специализированный метод аугментации [21, 62, 231].

Таким образом, применение развитого нейросетевого метода повышения пространственного разрешения спутниковых данных для решения поставленных задач состоит в выполнении следующей последовательности действий.

- Определение типа задачи, требующие повышения пространственного разрешения спутниковых данных.
- Выбор одного из развитых нейросетевых методов суперразрешения, подходящего для решения конкретной задачи.
- Выбор предварительно обученной нейросетевой модели с топологией, соответствующей решаемой задаче проекта.
- Ввод спутниковых изображений и, при необходимости, предварительная обработка (в зависимости от решаемой задачи).
- Выполнение процедуры суперразрешения с помощью выбранной нейросетевой модели.
- Передача созданного изображения повышенного пространственного разрешения для дальнейшей обработки и анализа (например, для нейросетевой сегментации объектов для трехмерной реконструкции объектов, методом, описанным в разделе 3.4 настоящей работы).

2.3.5. Численные эксперименты

Вычислительные эксперименты проводились на специально собранной базе изображений железнодорожной инфраструктуры. Важным критерием качества изображения служила экспертная визуальная оценка. Кроме того, в качестве показателей качества работы были выбраны меры, описанные ниже. Экспериментально подобраны весовые коэффициенты при целевой функции, используемой при тренировке ГСНСР, такие, что обученная ГСНСР показывает оптимальный результат.

Оценка качества изображений

Качество получаемых изображений оценивается как с привлечением численных критериев, так и путем визуального анализа. Для количественной оценки использовались меры, описанные ниже.

Пиковое отношение сигнала к шуму PSNR вычисляется по формуле (1.4).

Индекс структурного сходства учитывает структуру изменения информации, т.е. взаимосвязь между пикселями, располагающимися пространственно близко друг к другу - формула (1.5).

Принимая во внимание, что назначением разрабатываемого метода является улучшение качества изображений антропогенных ригидных объектов (например, объектов транспортной инфраструктуры), целесообразно помимо численных характеристик использовать визуальный анализ качества восстановленных изображений. Показатели визуального качества можно сформулировать следующим образом [290]:

- сохранение спектральных особенностей в изображениях (внешний вид объектов обработанного изображения проверяется на основании внешнего вида тех же самых объектов на оригинальном изображении);
- резкость границ объектов на восстановленном изображении;
- отсутствие артефактов на восстановленном изображении.

Сбор и подготовка обучающих данных.

Для тестирования разработанного метода на основе ГСН использовались спутниковые изображения антропогенных ригидных объектов. Большое внимание уделялось объектам транспортной инфраструктуры, таким как такие как железнодорожное полотно, вагоны, сооружения, находящиеся в непосредственной близости к железной дороге, и др [101]. Сбор и подготовка обучающих данных проводились соответствующим образом. В качестве исходных данных

выбрано панхроматическое изображение высокого разрешения (линейный размер пикселя 0.3 м, разрядность 16 бит), на котором представлен фрагмент московского региона площадью около 53 км^2 , содержащий около 78 км железнодорожных линий. Использованы данные некоммерческого проекта OpenStreetMap [312]. Для получения разметки железнодорожных объектов на исходной карте применялся веб-инструмент Overpass turbo [315], основанный на данных OpenStreetMap. Далее на исходном изображении выделялись точки — центры фрагментов, которые вырезались и служили изображениями обучающей выборки.

Изображения обучающей выборки имеют размер 512×512 пикселов. Этот размер выбран, исходя из характерных размеров целевых объектов на изображениях. Для построения обучающей выборки использованы 8000 фрагментов, представляющих железнодорожную инфраструктуру, и 2000 случайно выбранных посторонних для предотвращения переобучения.

Вычислительные эксперименты проводились на персональном компьютере со следующими характеристиками: графический ускоритель: NVIDIA Tesla K80; центральный процессор: Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.30GHz; оперативная память: 12 Гб.

Особенности процесса обучения

Приведение исходного изображения в низкое разрешение осуществлялось при помощи уменьшения размера в 4 раза посредством бикубической интерполяции. В процессе обучения использовался алгоритм градиентного спуска Adam [256]. Размер тренировочной выборки составляет 9500 изображений, валидационной — 500 изображений. Количество эпох для полного обучения модели: 100. Разработка и обучение искусственных нейронных сетей выполнялись с использованием инфраструктуры ЦКП «Информатика» ФИЦ ИУ РАН [144]. Время обучения одной эпохи равно около 90 с, время одной эпохи с валидацией и сохранением результатов — около 270 с, полное время обучения — около 8 ч.

Результаты тестирования метода ГСНСР.

Тестирование качества работы модели на основе архитектуры ГСНСР и комбинированной ФП осуществляется на наборе изображений, не участвовавших в процессе обучения. Средние значения мер качества PSNR и SSIM, расчетанные на тестовом наборе, приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Влияние на качество изображения веса ФП согласованности цикла, примененная в модели ГСНСР, показано в таблице 2.2. Максимальные значения PSNR и SSIM и наилучшее визуальное качество в данном эксперименте демонстрирует модель с коэффициентом 10^{-5} .

Влияние на качество изображения веса ФП текстуры значительно влияет на качество изображения в модели ГСНСР, как показано в таблице 2.3. Количественные меры PSNR и SSIM получили значительный прирост при коэффициенте 0.1, но по визуальному восприятию наиболее качественное изображение получено при коэффициенте 0.01.

По результатам экспериментов выбраны оптимальные коэффициенты, с которыми дополнительные ФП входят в оптимизируемый функционал:

$$U = V(G, D) + 2 \cdot 10^{-8} U_{TVL} + 10^{-2} U_{texture}. \quad (2.18)$$

ФП согласованности цикла в итоге не вошла в оптимальную комбинацию. На рис. 2.11,в представлен пример изображения, полученного при обучении с использованием исходной целевой функции $V(G, D)$ (2.13) в сети [352], на рис. 2.11,г — результат использования модифицированной ФП (2.18).

Результаты тестирования метода L1-ИНС.

Примеры результатов повышения разрешения панхроматического канала тестовых фрагментов спутниковых изображений представлены на рисунках 2.14 , 2.15. Качество улучшаемых изображений оценивается путем визуального анализа и с привлечением численных критериев, описанных выше. Приведенные фрагменты изображений демонстрируют лучшее визуальное качество

повышения разрешения с использованием разработанной L1-модели нейросети (для краткости обозначена как L1-ИНС) в сравнении с традиционными методами передискретизации изображений (методом ближайшего соседа, билинейной интерполяцией и бикубической интерполяцией). Это наглядно видно на фрагментах, представленных на рисунках 2.14, *d* и 2.15, *d*. Линейные инфраструктурные объекты, имеющие малый поперечный размер (ограды, разделительные полосы) заметно лучше воспроизводятся при использовании L1-ИНС. Визуальное качество таких объектов приближается к их качеству на эталонных фрагментах, приведенных для сравнения на рисунках 2.14, *e* и 2.15, *e*. Количественные оценки качества повышения разрешения предложенной L1-ИНС в сравнении с классическими методами передискретизации представлены в таблице 2.4.

Визуальный и статистический анализ показывают существенное преимущество нейросетевого метода повышения разрешения перед классическими методами передискретизации. Количественные показатели нейросетевой модели согласуются с ведущими мировыми исследованиями в данной области, в частности с [325, 351].

На рисунке 2.16 показан результат совместного применения метода нейросетевого сверхразрешения и слияния изображений вероятностным методом для повышения пространственного разрешения изображений инфраструктурных объектов, полученных аппаратурой спутника “WorldView-2”.

На рисунке 2.17 представлено сравнение результатов работы нейросетевого метода при двухкратном и четырёхкратном сверхразрешении на спутниковых данных, полученных аппаратурой спутника WorldView-2. Разрешение исходных мультиспектральных изображений, приведённых в строке (а) повышенено в 8 раз при двухкратном нейросетевом сверхразрешении (результат показан в строке (б)) и в 16 раз при четырёхкратном нейросетевом сверхразрешении (результат показан в строке (в)). Визуальное сравнение результатов показывает, что при четырехкратном нейросетевом сверхразрешении объекты обладают более четко выделенными контурами по сравнению с использованием двухкратного суперраз-

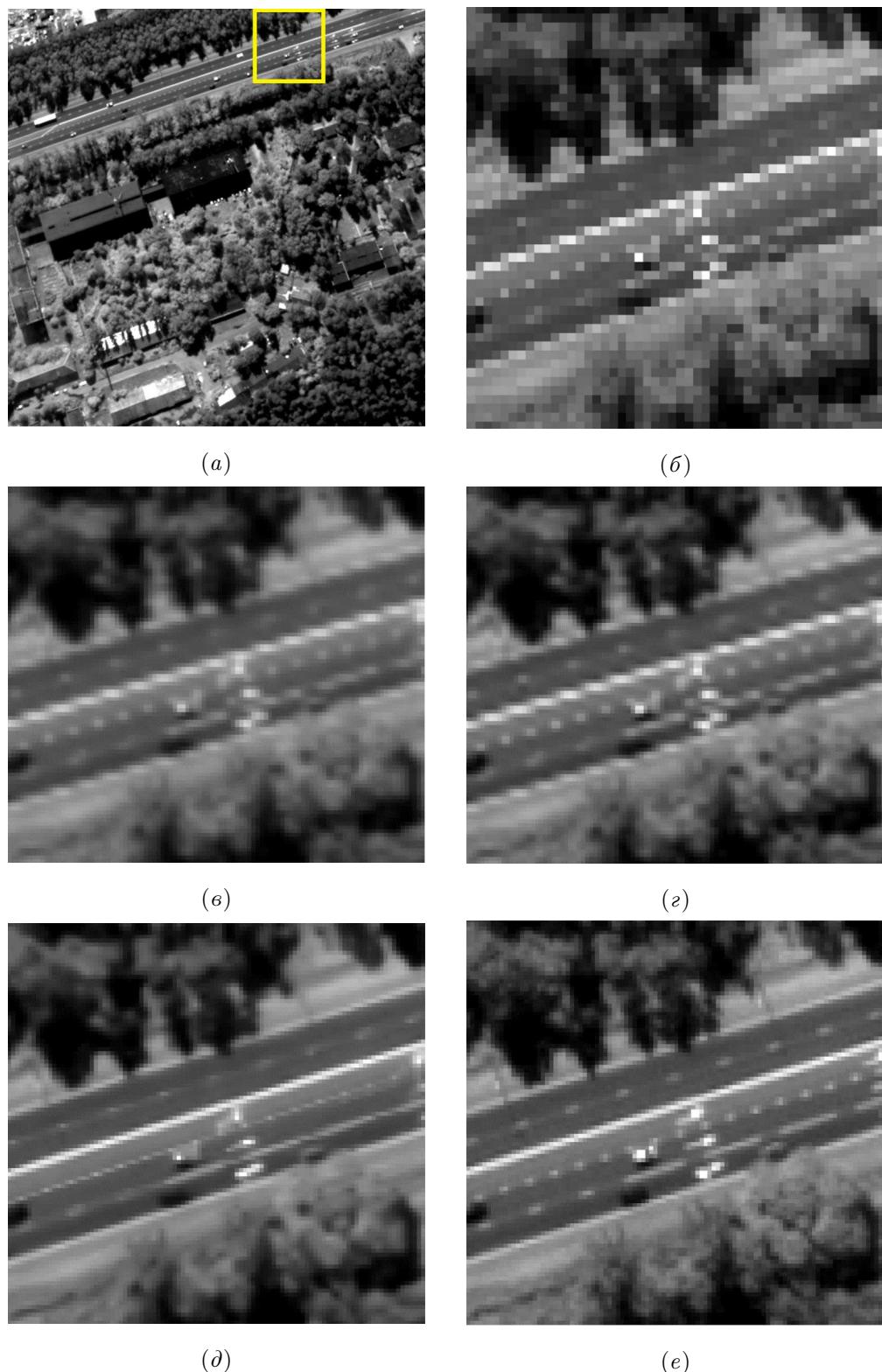


Рис. 2.14. Пример повышения разрешения изображения автомобильной дороги: а — исходное изображение с выделенным фрагментом; б — метод ближайшего соседа; в — метод билинейной интерполяции; г — метод бикубической интерполяции; д — повышения разрешения с использованием разработанной L1 ИНС; е — эталонное изображение

решения. Это достаточно хорошо различимо на изображениях автомобилей и элементов построек.

Проведено сравнение результатов работы нейросетевого метода при двукратном и четырёхкратном сверхразрешении [22]. Показано, что в результате применения метода нейросетевого сверхразрешения совместно с вероятностным методом (слияния мультиспектрального и панхроматического изображений) пространственное разрешение исходного мультиспектрального изображения 2 м повышалось до 0.25 м при двукратном сверхразрешении и до 0.125 м при четырехкратном сверхразрешении. Визуальный анализ показал, что во втором случае антропогенные объекты дают более чётко выделенные границы по сравнению с первым. Количественные меры качества, полученные при использовании разработанных моделей ИНС двукратного и четырёхкратного сверхразрешения приведены в таблице 2.5. Также в ней приведены лучшие значения анализируемых количественных мер при использовании классических методов интерполяции при передискретизации изображений (метод ближайшего соседа, билинейная интерполяция, бикубическая интерполяция).

Таблица 2.4. Количественные оценки L1-ИНС в сравнении с классическими методами передискретизации

Метод передискретизации	PSNR, db (больше-лучше)	SSIM (больше-лучше)
Ближайшего соседа	24.97	0.79
Билинейная	26.91	0.83
Бикубическая	26.91	0.84
L1-ИНС	31.85	0.92

Таким образом, разработан метод повышения пространственного разрешения спутниковых изображений с использованием нейросетей, в том числе генеративно-состязательных. Характерная особенность разработанного метода по-

Таблица 2.5. Сравнение количественных мер качества ИНС сверхразрешения

	MSSIM (больше-лучше)	PSNR (больше-лучше)	NRMSE (меньше-лучше)	RMSE (больше-лучше)	Q (больше-лучше)
Сверхразрешение x2	0.942	33.27	0.063	0.023	0.990
Сверхразрешение x4	0.941	33.66	0.061	0.023	0.991
Классические методы (лучший результат)	0.887	28.52	0.11	0.040	0.975

вышения разрешения спутниковых изображений — объединение нейросетевого сверхразрешения на основе машинного обучения по репрезентативной обучающей выборке и паншарпенинга (слияния панхроматического и мультиспектральных изображений), который основан на расчёте наиболее вероятных векторов признаков в окрестности каждого элемента изображения.

2.4. Исследовательский программный комплекс повышения информативности спутниковых изображений

Ниже в данном разделе описан исследовательский программный комплекс (ИПК), разработанный для обработки и анализа экспериментальных данных с использованием методов, описанных в настоящей работе. Схема ИПК показана на рисунке 2.18.

ИПК реализует в интерактивном и пакетном режимах полный цикл обработки данных, полученных при космическом мониторинге антропогенных объектов с использованием разработанного комплексного нейросетевого подхода. Он включает несколько последовательно выполняемых процедур, позволяющих

повысить информативность спутниковых изображений для решения различных задач. Процесс обработки спутниковых изображений состоит из следующих основных стадий, перечисленных в порядке их выполнения.

- Предобработка – нормализация освещённости панхроматического и спектральных каналов спутниковых изображений с целью «растяжения» спектра освещённости «на всю шкалу», определяемую битностью изображения. Помимо улучшения визуального восприятия космических изображений это позволяет повысить эффективность последующих стадий обработки.
- Сверхразрешение (для панхроматического канала) – повышение пространственного разрешения панхроматического канала спутникового изображения (до 4 x раз) нейросетевыми методами. Коэффициент повышения пространственного разрешения (не обязательно целое число) задаётся на этапе машинного обучения искусственной нейронной сети (ИНС) и зависит от постановки конкретной экспериментальной задачи. По результатам серии экспериментов может быть выбран оптимальный коэффициент. На этой стадии может осуществляться также повышение пространственного разрешения снимка, полученного с одного спутника до пространственного разрешения снимка, полученного с другого спутника с целью последующего сравнения их информативности.
- Передискретизация – номинальное повышение пространственного разрешения спектральных каналов до уровня пространственного разрешения панхроматического канала. Это техническая стадия, не приводящая к повышению информативности изображений, требуемая для корректной работы алгоритмов последующих стадий.
- Геокоррекция – совмещение спектральных каналов с панхроматическим каналом изображения;

- Слияние (паншарпенинг) – повышение пространственного разрешения спектральных каналов с использованием панхроматического канала спутникового изображения в качестве опорного с применением вероятностного метода, описанного в разделе 1.5, или одного из известных методов на выбор [290].
- Сегментация – создание дополнительных растровых каналов, несущих контурную информацию об объектах различных классов, обнаруженных по спутниковым изображениям местности нейросетевым методом. В отличие от стадии Сверхразрешение на стадии Сегментация на вход ИНС может подаваться не только панхроматический канал, но и цветные каналы спутникового изображения.
- Дополнительная опция - создание на основе результатов сегментации векторных моделей с пространственной информацией об объектах, обнаруженных на изображённой местности.
- Визуализация этих объектов.

Таким образом, процесс обработки позволяет повысить информативность данных ДЗЗ путём повышения пространственного разрешения исходного космического изображения, сегментации различных антропогенных классов, обнаруженных по спутниковым изображениям местности нейросетевым методом, а также восстановлении пространственной информации об этих объектах, в том числе трёхмерной. На стадиях Сверхразрешение и Сегментация применяются нейросетевые методы. Для их обучения используются специализированные методы и процедуры, а также наборы ИНС различных топологий. При этом, на стадии Сверхразрешение панхроматическое изображение повышенного пространственного разрешения получается исключительно с использованием исходного изображения. На стадии Сегментации задействованная ИНС в зависимости от её топологии может использовать как панхроматическое изображение

повышенного пространственного разрешения, так и полученные в результате паншарпенинга изображения цветных каналов. Для выполнения нейросетевых процедур сверхразрешения и сегментации пользователь ИПК может выбрать модели ИНС в соответствии со спецификой конкретной решаемой задачи

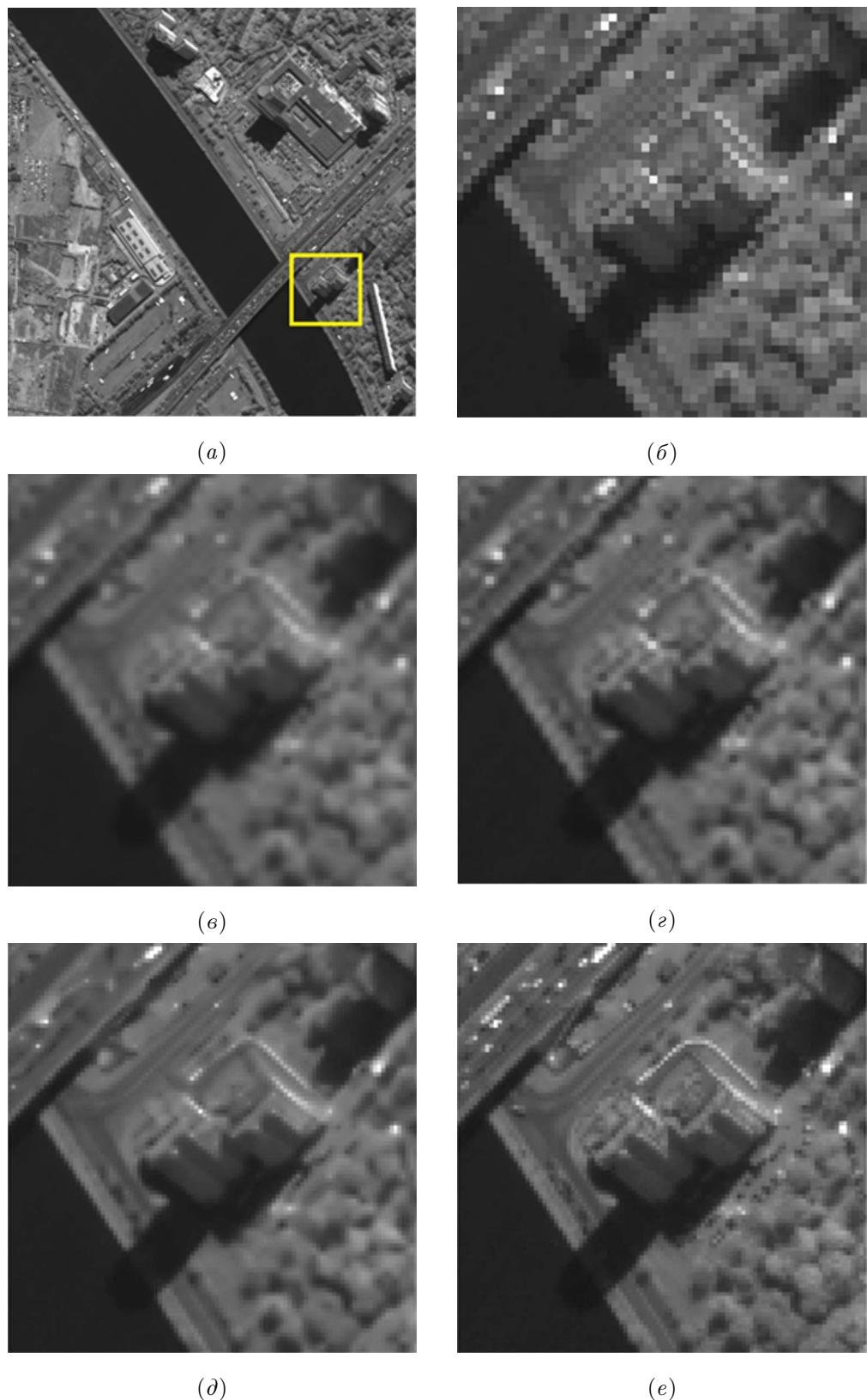


Рис. 2.15. Пример повышения разрешения изображения многоэтажного здания: а — исходное изображение с выделенным фрагментом; б — метод ближайшего соседа; в — метод билинейной интерполяции; г — метод бикубической интерполяции; д — повышения разрешения с использованием разработанной L1 ИНС; е — эталонное изображение

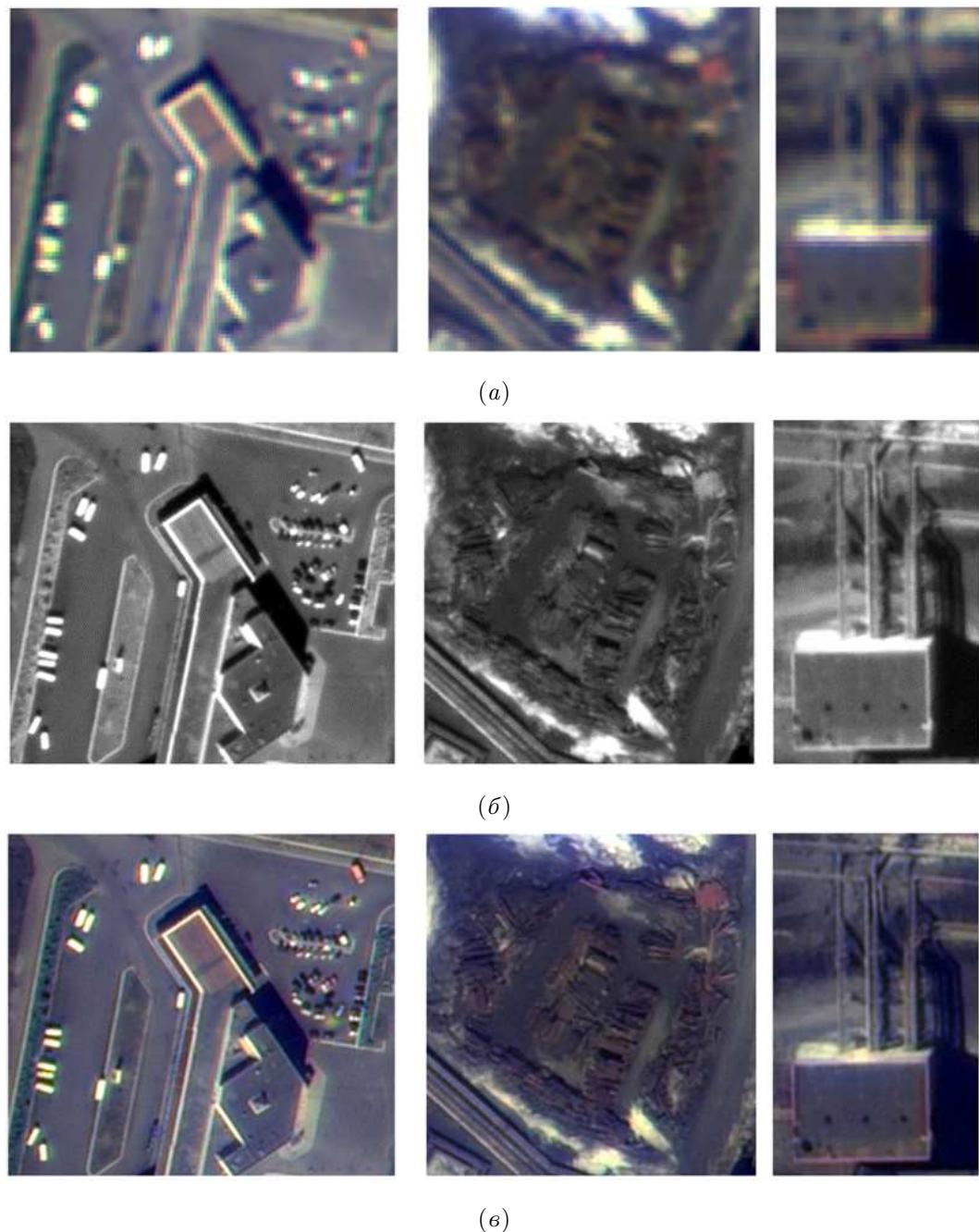


Рис. 2.16. Результаты совместного применения метода нейросетевого сверхразрешения и слияния изображений вероятностным методом. По строкам: (а) исходное мультиспектральное изображение, полученное аппаратурой спутника “WorldView-2” (разрешение 2м); (б) результат нейросетевого сверхразрешения, панхроматическое изображение с разрешением 0.25м; (в) результат слияния вероятностным методом, мультиспектральное изображение с разрешением 0.25м

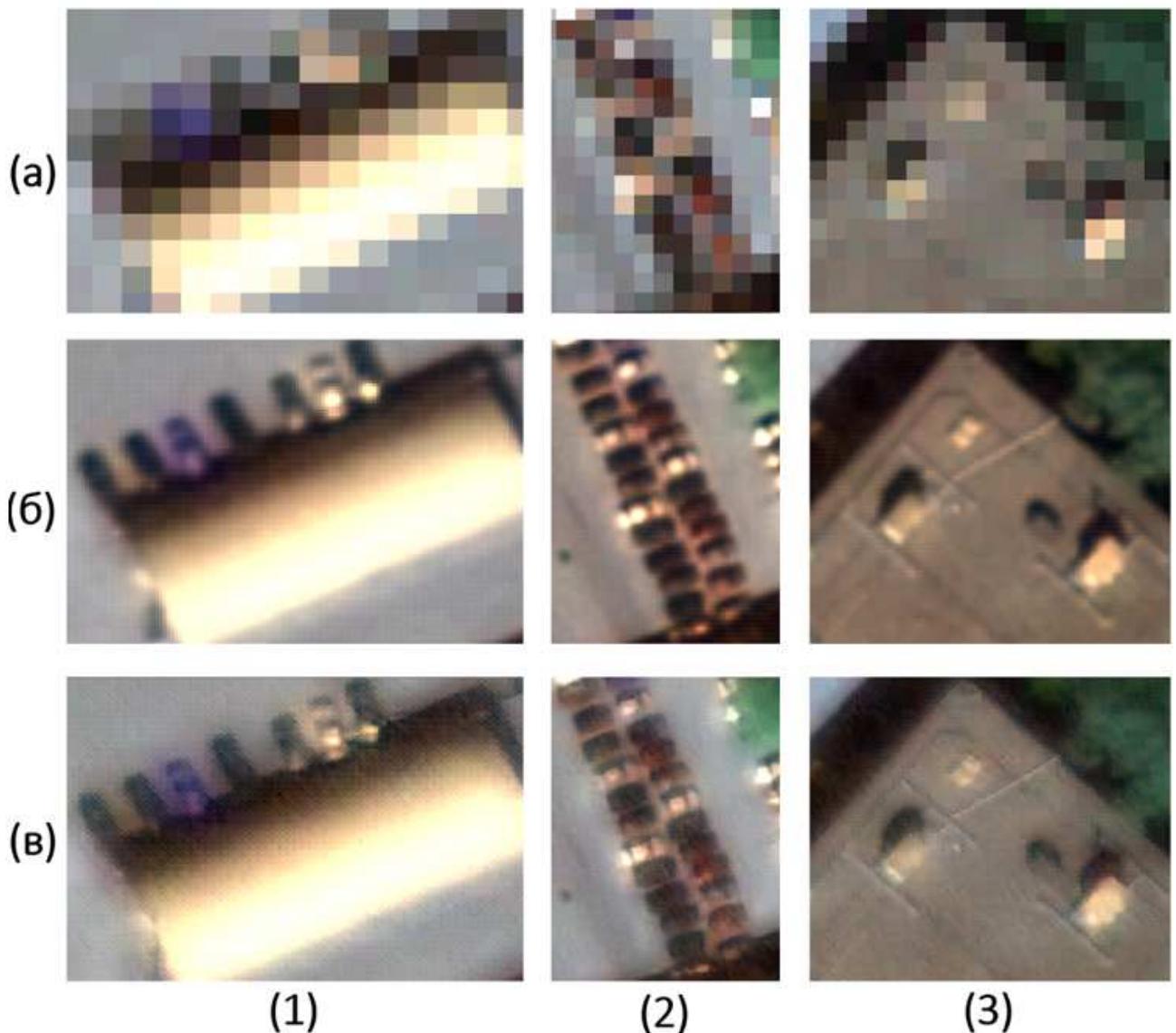


Рис. 2.17. Сравнение результатов совместного применения метода нейросетевого сверхразрешения и слияния вероятностным методом. По строкам: (а) – исходное мультиспектральное изображение разрешение 2м; (б) – результат двухкратного нейросетевого сверхразрешения и последующего слияния результата вероятностным методом (итоговое разрешение 0.25м); (в) – результат применения метода двухкратного нейросетевого сверхразрешения и последующего слияния результата вероятностным методом (итоговое разрешение 0.125м); Слева направо: (1) - участок застройки (г.Норильск); (2) – автомобильная парковка; (3) – крыша торгового центра с автомобилями

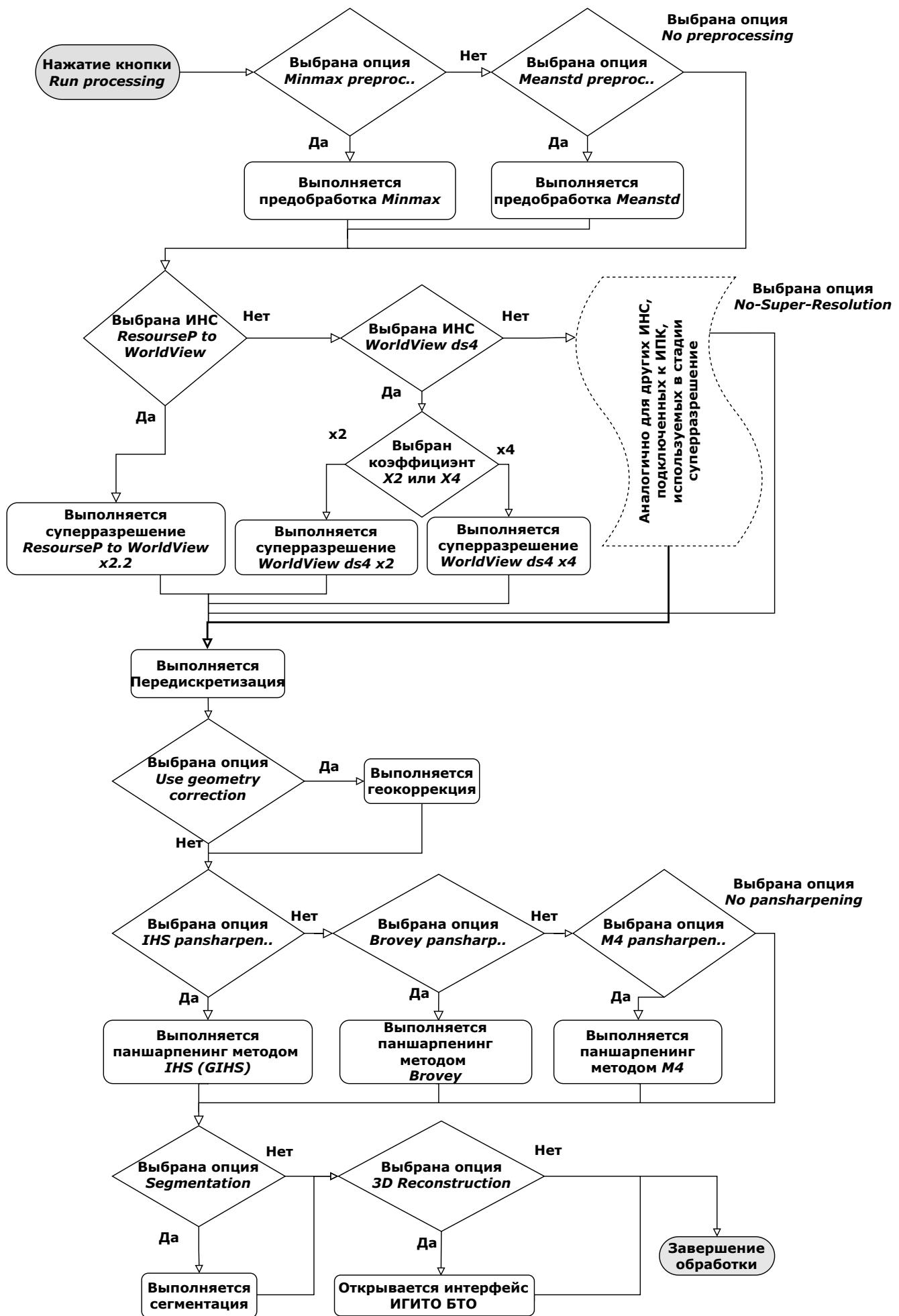


Рис. 2.18. Диаграмма исследовательского программного комплекса

Выводы к Главе 2

В главе получены следующие основные результаты:

- Разработан метод повышения разрешения изображений предназначенный для повышения четкости границ, основанный на использовании дополнительной априорной информации, например карт поверхности, представленных в векторной форме. Показана возможность использования векторной информации о геометрических свойствах объектов, получаемой из различных источников для космического мониторинга урбанизированных территорий и других задач дистанционного зондирования.
- Разработан численный метод и алгоритм обработки данных дистанционного зондирования, обеспечивающий обнаружение антропогенных объектов, в том числе транспортных средств, на данных сверхвысокого пространственного разрешения, основанный на выделении областей с близкими цветовыми характеристиками. Преимуществом предложенного метода является вычислительная простота использования и отсутствие необходимости в создании специальных баз данных для обучения и тестирования.
- Метод нейросетевого сверхразрешения применен в задаче повышения качества аэрокосмических изображений антропогенных инфраструктурных объектов. Качество изображений повышенного разрешения, генерируемых нейросетью, оценивалось количественными мерами (отношением сигнал/шум и мерой структурного сходства), а также визуально. По результатам проведённого анализа разработанная нейросеть с новой функцией потерь, показала лучшие результаты в сравнении с аналогами как по количественным мерам качества, так и при визуальной оценке.
- Анализ результатов, полученных в настоящей работе, показал, что основные преимущества и уникальность предложенного метода повышения

разрешения спутниковых изображений состоит в использовании только свойств входного изображения при нейросетевом подходе, а также в возможности повышения пространственного разрешения космических изображений в 2–8 раз при таком объединении.

Предложенные в главе методы и алгоритмы реализованы программно и внедрены:

- при создании макета исследовательского программного комплекса повышения качества изображений в ходе составной часть научно-исследовательской работы по теме «Разработка методов и математических моделей повышения разрешающей способности космической аппаратуры наблюдения инфракрасного и микроволнового диапазонов для бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) маломассогабаритных космических аппаратов и их экспериментальная отработка»;
- при создании макета исследовательского программного комплекса повышения качества изображений (МПК) в ходе работы выполненной при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0312).

Экспериментальная отработка алгоритмов повышения качества изображений проведена на коллекции спутниковых изображений различных объектов, включая объекты железнодорожной инфраструктуры.

На созданное программное обеспечение получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

- «Модуль повышения разрешения с использованием априорной информации в векторной форме при анализе объектов и границ» [69];
- «Программа для повышения пространственного разрешения мультиспектральных спутниковых изображений объектов железнодорожной инфра-

структурой с использованием опорных изображений, предобработанных генеративно-состязательными нейросетями» [72];

- ряд дополнительных программных модулей, использовавшихся при разработке методов и алгоритмов обработки изображений [65–67, 69, 71].

Глава 3

Методы и алгоритмы комплексирования и анализа данных для определения трёхмерных характеристик объектов

Развитие вычислительной техники сделало актуальным создание компьютерных систем, позволяющих восстанавливать трёхмерные сцены и строить модели наблюдаемых объектов по изображениям, получаемым аппаратурой дистанционного наблюдения. В данной главе решаются задача реконструкции трёхмерной поверхности объектов по двумерным изображениям и задача построения трёхмерных моделей этих объектов по совокупности признаков. Представлены подходы, позволяющие развить методы и алгоритмы, работающие в режиме близком к реальному времени. Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [6, 60, 61, 105, 107, 110, 113, 231].

3.1. Основные направления развития методов трёхмерного машинного зрения

Наибольшую часть информации об окружающем мире человек получает посредством зрения [87, 143]. Изучение и моделирование естественных и развитие искусственных систем зрительного восприятия является актуальной научной задачей [105–107]. Важным направлением развития систем машинного зрения является создание алгоритмов и систем, в той или иной мере моделирующих человеческое зрение. Основной механизм восприятия трёхмерной формы объектов по отношению к зрению человека состоит в восстановлении формы объекта по бинокулярной проекции – стереопсис. Вследствие специфического

расположения глаз мозг человека обычно получает схожие изображения сцены из двух различных точек в пространстве, что позволяет создавать ощущение расстояния до объекта и оценивать его форму [247]. Другие возможности восприятия трёхмерной формы объектов, также реализуемые человеческим мозгом, состоят в извлечении трёхмерной формы из движения и из теней. Эти возможности также развиваются в системах машинного зрения.

Восстановление трёхмерной сцены по одному или нескольким её снимкам является одной из важных задач дистанционного зондирования [181, 211, 214, 268]. Актуальны задачи определения характеристик окружающего пространства, такие как локальное распознавание рельефа с беспилотных летательных аппаратов в реальном времени, а также ориентирования роботов в трёхмерном пространстве [107, 165, 239, 307, 332]. Сложность этих задач состоит в том, что вычисления должны проходить в реальном времени.

Подходы к восстановлению трёхмерной информации в системах машинного зрения разнообразны. Методики съёмки можно разделить на монокулярные, (съёмка из одного положения), и бинокулярные (съёмка одновременно из двух или более положений) [215]. В общем случае, при числе положений более двух, методики называют мультиокулярными [215]. Методики съёмки разделяются на одновременные и разновременные по числу временных моментов. В случае разновременной съёмки алгоритмы обработки существенно усложняются в сравнении с одновременной. При этом свойства исследуемых объектов могут существенно влиять на возможности трёхмерной реконструкции.

Практически для всех методов и алгоритмов восстановления трёхмерной информации имеет значение необходимость учёта затенений (перекрытий), которая существенно усложняет и замедляет работу алгоритмов трёхмерного зрения [183, 215, 235, 275, 304]. При этом должны учитываться изменения условий регистрации изображений [52, 131, 151].

При оценке алгоритмов трёхмерного зрения следует оценивать возможности их работы в реальном времени. Хотя возможности вычислительной техники

растут, этот фактор всё ещё может быть существенным ограничением при выборе подхода к решению практических задач.

Развиваемые в настоящей главе методы трёхмерного машинного зрения играют важную роль при реализации человека-машинного взаимодействия в реальном времени, в частности при решении следующих задач:

- детектирование живого человека в зоне наблюдения и отслеживание его перемещения, а также детектирование и отслеживание частей тела человека [113, 114, 195, 205, 215, 270];
- восстановление трёхмерной формы лица, распознавание человека по лицу, оценка нарушений билатеральной симметрии лица и дистанционной диагностики патологий человека [92, 93, 110, 113, 114, 119, 121, 195, 299].

3.2. Выбор методов стереореконструкции

Рассмотрим основные подходы к обработке изображений, которые могут быть использованы при создании алгоритмов, позволяющих проводить трехмерную стереореконструкцию в реальном масштабе времени.

3.2.1. Совмещение изображений при трёхмерной реконструкции

При восстановлении формы трёхмерных объектов по двум или более двумерным изображениям ключевую роль играет стереосовмещение — совмещение определенных признаков наблюдаемых объектов на этих изображениях. На двумерных изображениях в качестве примитивов (элементов) при совмещении могут использоваться точки, линии и площадки. Соответственно, алгоритмы совмещения можно классифицировать так: совмещение площадок, основанное на корреляции текстур (пространственной структуры) яркостей пикселов; совмещение точечных признаков, основанное на сходстве их окрестностей; совмещение участков линий (границ объектов) на изображениях.

Для совмещения изображений при восстановлении формы трёхмерных объектов важно иметь хорошие детекторы признаков, используемых при совмещении. Для выделения линий (границ объектов) могут использоваться математические дифференциальные операторы и свёртка изображений с шаблонами различной ориентации.

Для выделения точек границ используются специальные граничные операторы на основе свёртки заданной маски с изображением [161, 228–230, 254, 287, 319], детекторы границ [162, 182, 193, 234, 288, 309]. Для подготовки изображений к операции совмещения в большинстве случаев необходима предобработка, повышающая контрастные характеристики изображений. Хорошие результаты даёт предобработка путём эквализации (выравнивание локальных гистограмм), в результате которой усиливаются пространственные вариации сигнала с характерными масштабами, меньшими, чем размер окна [105, 107]. В настоящем исследовании используется предобработка входных изображений, основанная на процедуре их эквализации.

Совмещение на основе локальной корреляции

Основная идея подхода состоит в следующем. Выбирается площадка на первом изображении и выполняется сканирование области на втором изображении для нахождения соответственной площадки, где изображён тот же участок поверхности. При сканировании заданной области выбирается та площадка из второго изображения, которая даёт максимум меры корреляции. Алгоритмы могут отличаться выбором меры корреляции и правилами выбора площадок — кандидатов на соответствие [213]. После нахождения соответственной площадки выполняется расчёт диспаратности и глубины (удалённости площадки от точки наблюдения). Удалённость может определяться как для точки, так и для некоторой области, которая соответствует определённому объекту или части объекта.

Наличие априорной информации о характерной структуре объекта позво-

ляет улучшить процесс поиска лучшей корреляции благодаря использованию следующей последовательности операций [313]: сегментация каждого изображения стереопары, совмещение двумерных сегментов корреляционным методом для определения соответственных областей с использованием различных характеристик сегментов (расположение, форма, взаимное расположение с другими областями), дальнейший анализ в соответствии с априорными знаниями о структуре объекта.

Каждое найденное отождествление при совмещении наиболее информативных участков может быть проверено методом обратного совмещения [232, 268]. Процесс обработки включает несколько итераций уточнения и подтверждения совмещений. Однако, корреляционный анализ полей яркости имеет ряд недостатков. Трудности могут возникать в тех местах, где нарушается гладкость поверхности, представленной на изображении. На линии разрыва необходимо проводить уточнение соответствий. Трудности могут также возникать на равномерно освещенных гладких местах поверхности. Тем не менее, вычислительная простота корреляционных алгоритмов делает доступной их реализацию в реальном времени. Поэтому в настоящей работе используется подход, основанный именно на корреляционном совмещении участков изображений. При этом в качестве дополнительных могут использоваться алгоритмы на основе совмещения точечных признаков и на совмещении границ. Ниже приведена их краткая характеристика.

Заслуживают внимания алгоритмы, основанные на совмещении точечных признаков. [163, 293]. Алгоритм совмещения, который является реализацией вычислительной теории стереоизрения человека [282]. Алгоритмы на основе точечных признаков удобны для задач фотограмметрии, поскольку дают возможность достижения высокой точности смещений. Их существенным недостатком является требование хорошего соответствие окон поиска для снижения числа ложных соответствий. Таким образом, метод совмещения, основанный на точечных признаках, хорошо работает лишь при условии, что изображения уже

находятся в близком соответствии.

Общая схема алгоритмов, основанных на совмещении границ (линейных признаков), включает следующие операции [288]: выделение границ на изображениях; аппроксимация границ линейными сегментами; поиск соответствующих сегментов с аналогичными свойствами (ориентация, расположение, интенсивность); оценка правильности совмещений с применением меры связности. Попытки создать алгоритм стереосовмещения, основанный на линейных признаках делались разными авторами [227, 227, 255]. Хотя границы содержат больше информации, чем изолированные точки, в целом имеют место те же трудности. Тем не менее, алгоритм, основанный на отождествлении границ может применяться для исправления ошибок стереосовмещения [291].

Для коррекции недостоверной диспаратности и ликвидации возможных разрывов также используются методы, основанные на аппроксимации результатов совмещения функцией, гладкой по всей области интереса, [216, 336]. Для минимизации используются численные методы [355]. В качестве начального приближения может использоваться модель, построенная на основании результатов стерео совмещения корреляционным методом.

3.2.2. Возможности восстановления формы объектов по одиночным изображениям

Во всех подходах, анализируемых ниже, используется предположение о том, что исследуемый объект является твёрдым (риgidным), то есть его форма неизменна в течение времени наблюдения.

Традиционные подходы к восстановлению трёхмерной поверхности ригидных объектов по одиночным изображениям таковы:

- восстановление формы поверхности с учётом взаимного перемещения объекта и камеры (shape-from-motion) - метод стереореконструкции состоит в использовании изменений изображения, вносимых изменением ракурса

съёмки объекта и его освещения [344];

- восстановление поверхности путём анализа теней и формы границ (shape-from-shading).

Если смещение между отдельными используемыми изображениями невелико, хорошие результаты дает метод, основанный на построении полей скоростей точек на изображениях [240]. Методы различаются по типу используемой проекции [165, 208, 257, 279, 342, 355]).

Алгоритмы обычно включают такие стадии: оценка параметров движения ригидного объекта по изображениям, а затем — восстановление структуры объекта. Для нахождения параметров трёхмерного движения раздельно определяют вращение и перемещение объекта [181, 239, 303, 332], либо пытаются определить все параметры движения одновременно [209, 277, 340].

Дальнейшее развитие методов данного класса выходит за рамки настоящей работы вследствие сложности их технической реализации при дистанционных исследованиях аэрокосмическими средствами.

Новые возможности восстановления формы объектов по одиночным изображениям, получаемым дистанционными аэрокосмическими средствами, появились в связи с развитием методов, основанных на машинном обучении, интеллектуальном анализе данных и применении искусственных нейронных сетей. Развитию этих методов посвящён раздел 3.4 настоящей работы.

3.3. Стереореконструкция в реальном времени

В этом разделе описывается метод, предназначенный для восстановления трёхмерной поверхности объектов со скоростью, близкой к режиму реальному времени. Под обработкой данных в реальном времени подразумевается обработка, на которую затрачивается время не превышающее некоторой заданной пороговой величины. Как правило, пороговая величина может быть задана так,

чтобы время обработки поступающих данных от источника информации не превышало времени получения новых данных в потоке данных от этого источника.

Рассмотрим кратко выбор основных методов обработки изображений, которые наиболее существенно влияют на возможность выполнения стереореконструкции в режиме реального времени:

- Выбор метода получения входных изображений и геометрических параметров съёмки.
- Выбор методов подготовки данных для стереореконструкции, предварительной обработка изображений.
- Выбор базового метода стереореконструкции.

Условия съёмки для стереореконструкции в режиме реального времени

Для стереореконструкции в режиме реального времени ограничимся случаем двух камер (бинокулярная система) и нормальной стереосъёмкой (см. рис. 3.1), характеризуемой следующими условиями:

1. оптические оси камер параллельны;
2. геометрически камеры могут быть переведены одна в другую параллельным переносом вдоль оси OY изображений;
3. камеры находятся на расстоянии b друг от друга (это расстояние называемое стереобазисом).

При нормальной стереосъёмке соответственные точки в системах координат своих изображений имеют одинаковые ординаты, но разные абсциссы. Разность абсцисс двух соответственных точек называются X -диспаратностью, которую, для краткости будем называть просто диспаратностью, поскольку при нормальной стереосъёмке Y -диспаратность является постоянной величиной, не зависит от x, y .

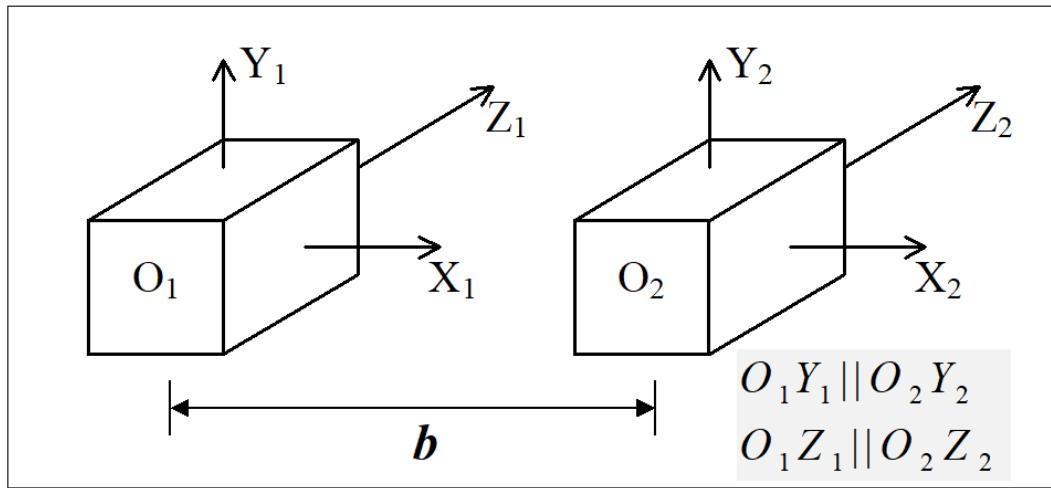


Рис. 3.1. Положение камер при нормальной стереосъёмке

Исходные изображения, введенное в компьютер, представляются квадратными целочисленными матрицами с дискретными ограниченными значениями элементов (пикселов), описывающие функцию $B(x, y)$, где B — величина зарегистрированного сигнала в точке с координатами (x, y) (x и y являются целочисленными аргументами - растровое представление изображения). Зарегистрированный сигнал B пропорционален физической яркости изображенного элемента поверхности.

Для стереореконструкции в режиме реального времени требуется создание, алгоритмов, автоматически восстанавливающих поверхность по текстуре там, где текстура хорошо выражена, и выполняющих интерполяцию там, где текстура выражена слабо [196, 214]. Однако, многие из таких алгоритмов не всегда пригодны для работы в реальном времени.

В общем случае при стереореконструкции должно уделяться внимание эффекту затенения [196, 214, 255, 291, 304], физический смысл которого состоит в том, что на поверхности объекта присутствуют области (или отдельные точки), которые не видны на одной из камер, поскольку они закрыты от этой камеры другими участками поверхности [105, 107]. В настоящей работе считается, что площадь областей затенения невелика. При этом затенение трактуется как потеря соответственных точек и восполняется соответствующим методом.

Предварительная обработка изображений Корреляционный метод основан на сопоставлении текстуры, поэтому целесообразна предобработка, выделяющая текстуру изображения [105, 107]. Поэтому для выделения текстуры выбрана локальная эквализация [131]. Для каждой точки изображения (x, y) выполняются следующие действия: в окрестности заданной точки вычисляется локальная гистограмма сигнала $h(B)$ в окне с размером w , подбираемым эмпирически, затем выполняется преобразование $B' = f(B)$, причём вид функции $f(B)$ подбирается таким образом, чтобы гистограмма преобразованного сигнала стала равномерной с использованием формулы 1.20:

$$h(B) = \text{const.} \quad (3.1)$$

В результате выполнения операции эквализации контрастируются пространственные вариации сигнала с характерными масштабами, меньшими w . Крупномасштабные вариации сигнала, как правило связанные с изменением освещенности в пределах кадра, в результате эквализации подавляются. На рис. 3.2 представлен пример обработки изображений операторами эквализации с разными величинами полуширины окна.

Базовый метод стереореконструкции Применяемый метод восстановления трёхмерной поверхности основывается на поиске совпадающих текстурных элементов на двух изображениях.

Алгоритм стереореконструкции по изображениям, прошедшим процедуру предобработки, включает поиск соответствий и восстановление формы объекта по найденным соответственным точкам.

Обрабатываются два изображения объекта, сделанных одновременно из разных точек пространства — стереопара. Составляющие стереопары назовём L- и R-изображениями соответственно. Точки на левом и правом изображениях назовём соответственными точками если они являются изображениями одной и той же точки на поверхности объекта, а расстояние между этими точками —

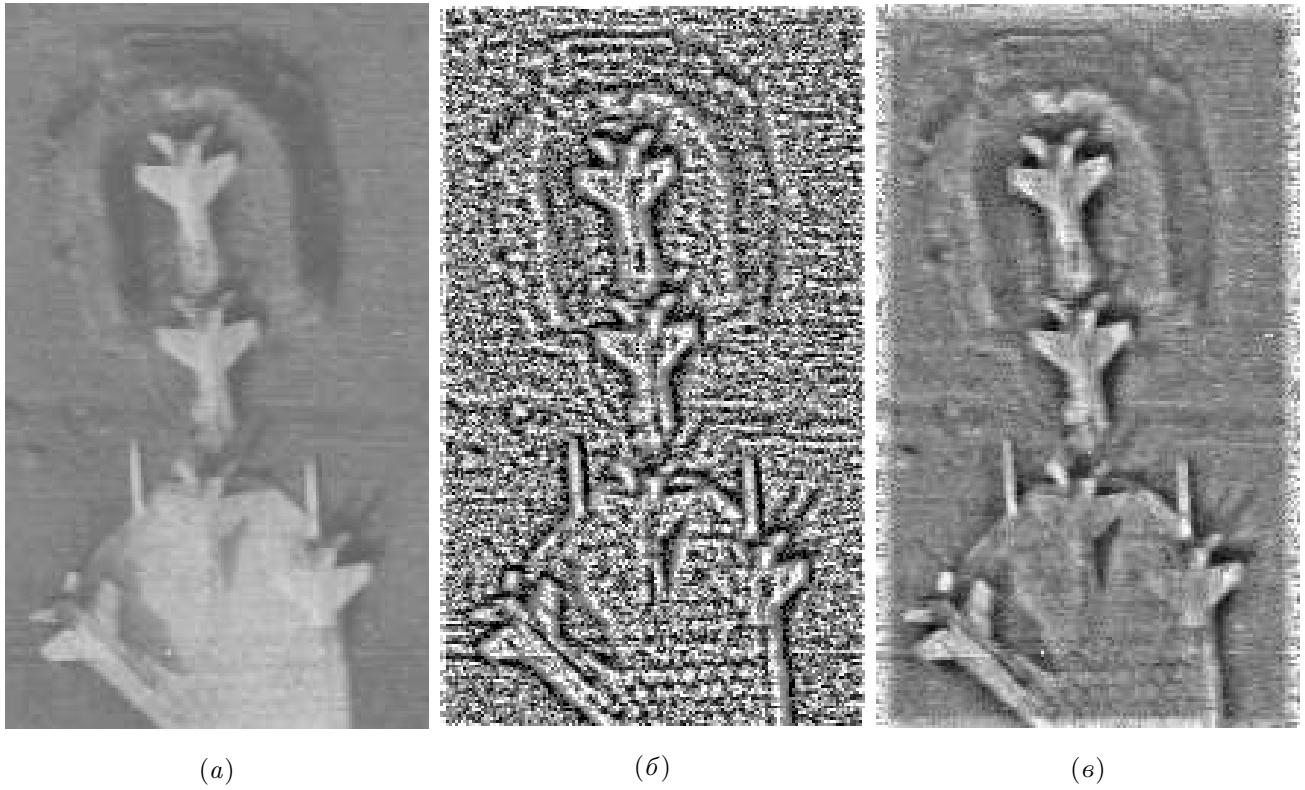


Рис. 3.2. Исходное изображение (а) и результат эквализации с различной полушириной окна: (б) 3, (в) 8

диспаратностью. Опишем процесс восстановления трехмерной поверхности объекта на основе измерения диспаратности. Поверхность объекта будем описывать функцией $z = z(x, y)$, где z — удалённость точки поверхности от плоскости Oxy (предметной плоскости) перпендикулярно оптическим осям камер, как показано на рис. 3.3.

Точки, расположенные на предметной плоскости $z = 0$, имеют с базовую диспаратность d_0 . Расстояние от камеры до предметной плоскости может быть произвольным. Отклонение диспаратности конкретных соответственных точек от базовой диспаратности Δd характеризует форму поверхности объекта. Как правило, размеры деталей объекта значительно меньше расстояния от объекта до камеры. Таким образом, имеют место соотношения:

$$\frac{d_0}{f} = \frac{b}{l}, \quad \frac{d_0 + \Delta d}{f} = \frac{b}{l - \Delta l}, \quad \Delta l \ll l,$$

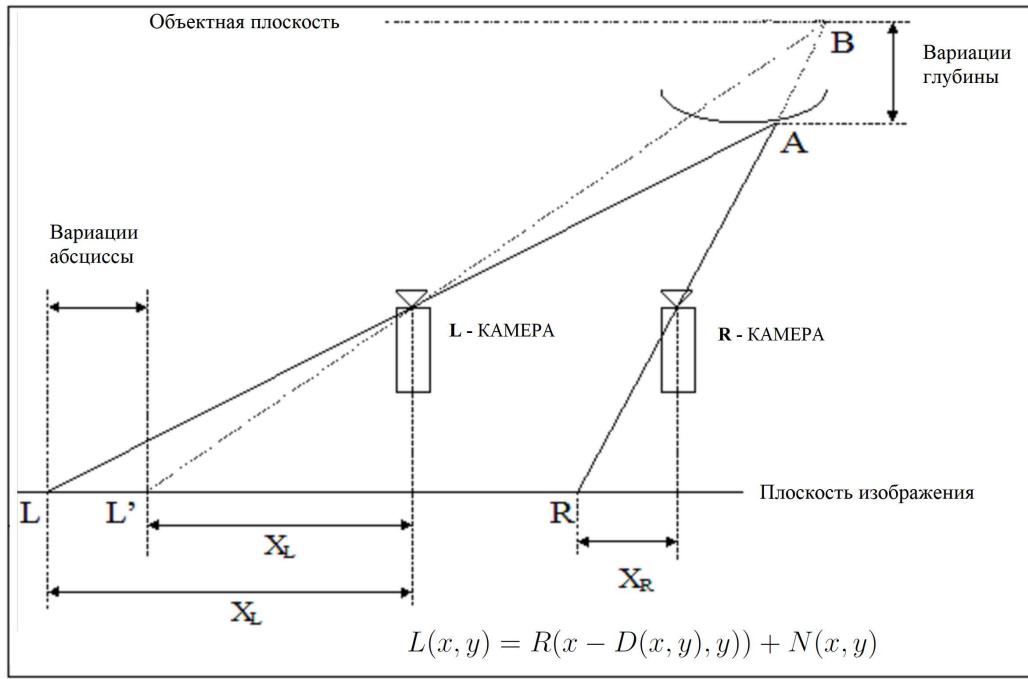


Рис. 3.3. Измерение диспаратности при нормальной стереосъёмке

откуда следует:

$$z(x, y) = \Delta l = \frac{l^2}{f b} \Delta d = \frac{l^2}{f b} (d - d_0) = \frac{l^2}{f b} (\rho(L, R) - d_0), \quad (3.2)$$

Искомая функция $z(x, y)$ пропорциональна отклонению диспаратности от базового значения, причём коэффициент пропорциональности определяется геометрией системы и может быть принят равным единице для упрощения дальнейших выкладок. Таким образом, измерение диспаратности эквивалентно измерению возвышений точек на поверхности объекта относительно предметной плоскости.

Диспаратности $D_X(x, y)$, $D_Y(x, y)$, входят в уравнение:

$$L(x, y) = R(x - D_X(x, y), y - D_Y(x, y)) + N(x, y), \quad (3.3)$$

где $L(x, y)$ и $R(x, y)$ — соответственно левое и правое изображения стереопары, $N(x, y)$ — шумовая составляющая, связанная с погрешностями измерений. Диспаратности $D_X(x, y)$, $D_Y(x, y)$ подлежат определению. Аналитическое решение уравнения 3.3 затруднительно в общем случае. Поэтому для оценки диспаратности используются численные методы.

При нормальной стереосъёмке можно упростить уравнение 3.3, положив без ограничения общности

$$D_Y(x, y)) = 0.$$

Обозначив при этом для простоты $D(x, y) = D_X(x, y)$ можем записать

$$L(x, y) = R(x - D(x, y), y)) + N(x, y). \quad (3.4)$$

Применимость того или иного метода зависит от объекта исследования. Для слабоконтрастных объектов, не имеющих элементов правильной геометрической формы, наилучшим является корреляционный алгоритм измерения диспаратности [105, 107]. Далее описано развитие такого алгоритма для работы в реальном времени.

3.3.1. Измерение возвышений корреляционным методом

Используется корреляционный метод стереореконструкции, поскольку он позволяет хорошо оптимизировать вычислительные операции [105, 107]. Целесообразность такого подхода к стереореконструкции хорошо согласуется с результатами работ, посвященных изучению восприятия трёхмерного мира зрительной системой человека [212, 248, 249, 282, 287, 356].

Основные правила для стереосовмещения изображений с учётом этой теории таковы: единственность (в каждой точке изображения может быть получено единственное значение диспаратности), непрерывность (функция, описывающая изменение диспаратности является гладкой везде за исключением разрывов в местах заслонения поверхности).

Известные подходы к созданию алгоритмов такого типа были предложены в работах [228, 229, 287].

Участок поверхности объекта на левом и правом изображениях имеет сходную структуру в силу геометрических условий, однако, вследствие небольшого различия угла наблюдения, различия в значениях яркости имеются. Поэтому

для поиска соответственной точки не подходит простое попиксельное сравнение, а следует использовать сравнение на основе той или иной функции корреляции.

Вокруг точки (x, y) на одном изображении (базисном) задаётся область вычисления корреляционной функции, имеющая форму и размеры, которые подбираются эмпирически в зависимости от параметров объекта исследования. Поиск соответствия на втором (сканируемом) изображении выполняется области сканирования, форма и размеры, которой также подбираются эмпирически в зависимости от конкретных геометрических параметров условия съёмки (см.рис. 3.4). Диспаратностью в точке (x, y) называется меру различия между

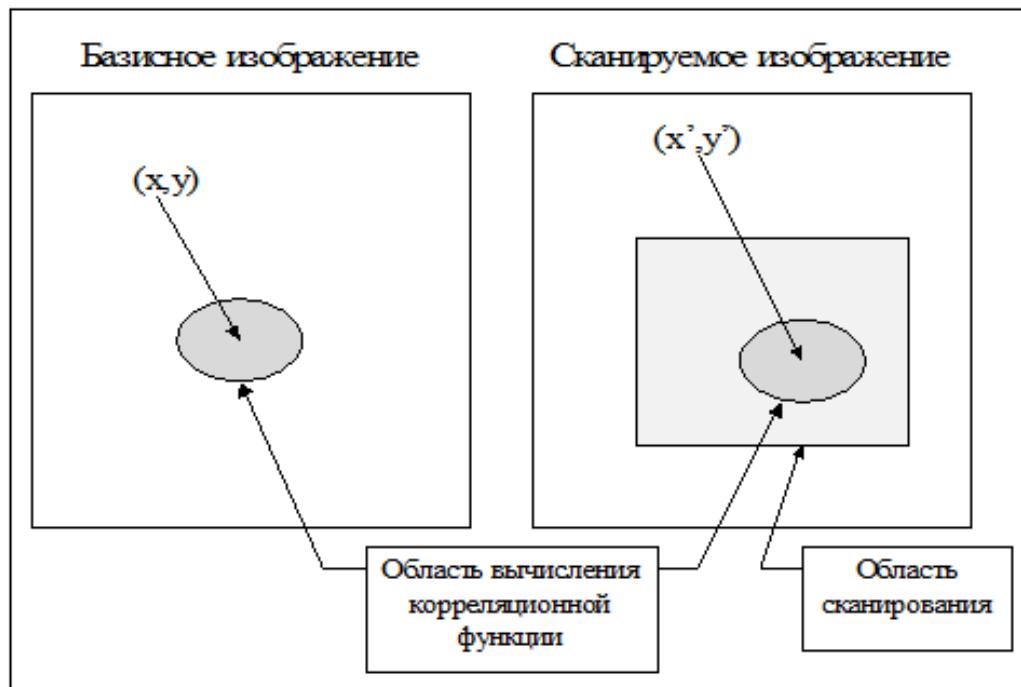


Рис. 3.4. Области сканирования и вычисления мер корреляции

координатами (x, y) и координатами той точки на сканируемом изображении, которой соответствует лучшее значение меры корреляции :

$$D(x, y) = \rho((x, y), (x', y')) . \quad (3.5)$$

где

$$(x', y') = \arg \max_{(x', y')} C_F(I(x, y), I(x', y')) \quad (3.6)$$

C_F мера корреляции двух областей изображения. В простейшем случае нормальной стереосъёмки y - диспаратность отсутствует, поэтому диспаратность определяется разностью x - координат

$$D(x, y) = x - x' .$$

Описанная процедура выполняется для каждой точки из заданной области интереса базисного изображения (области, где необходимо провести измерение трёхмерной формы объектов). Рассмотрим дополнительные особенности корреляционного метода, связанные с работой в реальном времени: особенности выбора областей обработки, классы применимых мер корреляции, возможность работы со сверхразрешением [106, 107].

Выбор областей обработки. Приведём простейшую оценку для размеров области сканирования при исследовании объект съёмки размером Δx по оси OX и Δz по оси OZ (см. рис. 3.3). Максимальное отклонение диспаратности от базового значения можно оценить из (3.2)

$$\Delta d = \frac{fb}{l^2} \Delta z , \quad \Delta z \ll l .$$

Оценка размера изображения соответствует условию $\Delta\xi = \frac{f}{l} \Delta x$. Для большинства практически важных применений, таких как аэрокосмическая съёмка объектов на земной поверхности или стерео реконструкция лица человека, можно положить $\Delta z < \Delta x$. Из сделанного предположения при условии $b \ll l$, получим оценку

$$\frac{\Delta d}{\Delta\xi} = \frac{b}{l} \frac{\Delta z}{\Delta x} < \frac{b}{l} \ll 1 ,$$

Анализ геометрических условий съёмки позволяет сделать ряд заключений:

- максимальное значение диспаратности должно быть значительно меньше размера изображения;

- область сканирования значительно меньше всего изображения и может быть задана в форме вытянутого прямоугольника;
- область вычисления меры корреляции должна быть достаточно велика по сравнению с мелкими деталями объекта;
- размер области, используемой для вычисления меры корреляции должен быть мал по сравнению с крупными деталями рельефа;
- область вычисления меры корреляции должна быть выпуклым множеством прямоугольной формы с центром в точке интереса.

Выбор меры корреляции

В системе стереозрения используются два изображения (стереопара), характеристики которых (яркость, контрастность и др.) могут отличаться в силу различия физических условий съёмки. В классической системе стереозрения, состоящей из двух камер, работающих синхронно, физические характеристики камер могут отличаться. Если стереопара формируется в результате быстрого перемещения одной камеры, например в результате перемещения спутника при космической съёмке, условия съемки также могут различаться как вследствие изменения настроек камеры, так и в силу изменения геометрии освещения. Это приводит к различию характеристик получаемых изображений. Корреляционная функция, которая вычисляет заданную меру корреляции, должна быть устойчивой к различиям в средней яркости фрагментов изображений. Понятие корреляционной функции следует уточнить применительно к решаемой задаче. Традиционное представление корреляционной функции имеет вид:

$$C_F = \frac{\Re(f_1, f_2)}{\sqrt{\Re(f_1, f_1)\Re(f_2, f_2)}} ,$$

где \Re — мера сходства между f_1 и f_2 , вычисляемая по подмножеству w множества W . Здесь W — изображение, w — область вычисления корреляционной

функции. Знаменатель в этом представлении может быть положен для нормировки равным произведению площадей областей вычисления корреляционной функции изображения на среднеквадратичные отклонения яркости в этих областях.

Канонический вид корреляционной функции оказался не очень удобен при стереореконструкции в реальном времени [105, 107]. Как показали проведённые вычислительные эксперименты, для оценки меры сходства хорошо подходят функции вида [107]:

$$\begin{aligned}\mathfrak{R}_{f_1, f_2, \omega}^* &= \sum_{i=1}^n |(f_1(\mathbf{x}_1 + \Delta_i) - M_1(\mathbf{x}_1)) - (f_2(\mathbf{x}_2 + \Delta_i) - M_2(\mathbf{x}_2))| , \\ \mathfrak{R}_{f_1, f_2, \omega}^* &= \sum_{i=1}^n |f_1(\mathbf{x}_1 + \Delta_i) - f_2(\mathbf{x}_2 + \Delta_i)| .\end{aligned}$$

Поскольку такие меры сходства убывают с возрастанием сходства сравниваемых функций, для приведения к привычному традиционному виду и нормировки эмпирически выбирается константа C_N и вычисляется мера корреляции вида [105]:

$$C_F = \max \left\{ 1 - \frac{C_F^*(\mathfrak{R}^*)}{C_N}, 0 \right\} . \quad (3.7)$$

Приведение к такому виду целесообразно также потому, что важны только большие значения меры корреляции, соответствующие большому сходству между фрагментами изображения, а малые значения этой меры можно не принимать в расчёт [107].

Сверхразрешение при трёхмерной реконструкции

Как следует из методики определения диспаратности, чем выше пространственное разрешение изображения, тем лучше должна быть точность вычисления диспаратности. Соответственно, более детально должна быть восстановлена карта возвышений поверхности объекта. Поэтому применение любого из методов повышения пространственного разрешения, в частности методов, опи-

санных в Главах 1, 2, должно повышать детальность стереореконструкции. Однако, при обработке изображений в режиме реального времени, не всегда целесообразно применение алгоритмов повышения пространственного разрешения к целому изображению, поскольку это требует значительных дополнительных вычислительных ресурсов. Поэтому целесообразно применение алгоритма локального сверхразрешения, который описан ниже. Опишем метод сверхразрешения, который позволяет увеличить число градаций возвышения по сравнению с числом градаций диспаратности. При вычислении диспаратности по формуле 3.6, результат может принимать небольшое число дискретных значений, вследствие чего шкала высот является довольно грубой.

Метод локального сверхразрешения позволяет увеличить число градаций диспаратности, используя информацию о окрестности положения максимума корреляционной функции. Алгоритм состоит в следующем: максимум и соседние с ним точки интерполируются кривой, имеющей выпуклость вверх, например, параболой. Затем находится абсцисса точки экстремума (максимума) этой кривой. Найденная абсцисса принимается за значение диспаратности (см. рис. 3.5).

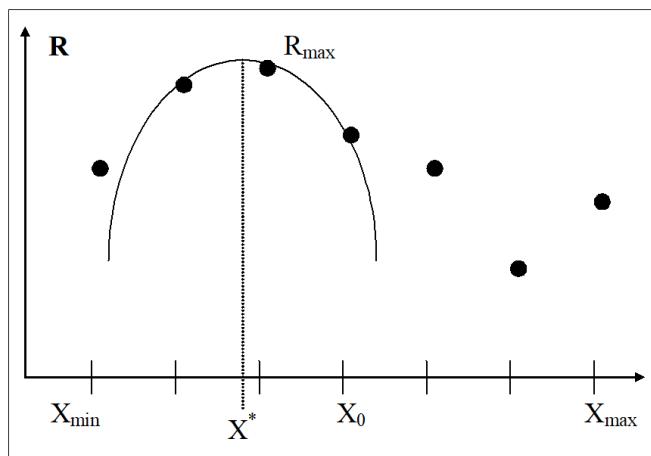


Рис. 3.5. Локальное сверхразрешение при вычислении диспаратности

При использовании такого алгоритма количество градаций диспаратности может быть значительно больше, чем при вычислении дискретных значений.

Верификация вычислений и коррекция недостоверной информации

При вычислении диспаратности возможны ошибки корреляционного алгоритма. Например, при сканировании может появиться несколько локальных максимумов, вследствие наличия нескольких областей, похожих на базисную область. Это может привести к выбору неверной соответственной точки и появлению неверного значения диспаратности. Для устранения ошибок в случае регулярной текстуры используется верификация вычисления диспаратности обратным проходом. Алгоритм состоит в следующем: после того, как для точки (X_L, Y_L) базисного изображения найдена соответственная точка (X_R, Y_R) на сканируемом изображении, базисное и сканируемое изображения меняются местами снова выполняется поиск соответственных точек. Если точки, найденные при прямом и обратном проходе совпадают в пределах заданной погрешности, эта пара точек считается правильной. В противном случае эта пара точек обозначается как недостоверная.

Другая возможная причина ошибок — отсутствие текстуры, когда нельзя найти положения максимума меры корреляции. Для подавления ошибок в этом случае устанавливается эмпирический порог меры корреляции, ниже которого сравниваемые области исключаются из дальнейшего рассмотрения, обозначаются как недостоверные. Этот процесс может регулироваться подбором нормировочной константы в (3.7).

В результате работы алгоритма стереореконструкции формируется объёмный образ объекта в виде трёхмерной поверхности $F(x, y)$. Значения функции $F(x, y)$ представляют диспаратности в точках (x, y) и пропорциональны расстояниям от точек трёхмерного объекта до предметной плоскости. На сформированной поверхности $F(x, y)$ присутствуют некоторые точки, которые признаны недостоверными, потому что:

- меры корреляции оказались меньше заданного порога;
- оценки диспаратности вышла за пределы, установленными априорными

порогами.

Совокупность недостоверных точек, образующих связный объект, назовём областью недостоверной диспаратности U . Таким образом возникает задача восстановления поверхности $F(x, y)$ в областях недостоверной диспаратности.

Области недостоверной диспаратности обычно возникают на однородных элементах объекта, где текстура изображения является слабоконтрастной. Для того, чтобы заполнить области недостоверной диспаратности, целесообразно аппроксимировать функцию $F(x, y)$ в этих областях поверхностями второго порядка $f = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + g$, коэффициенты которой вычисляются по методу наименьших квадратов, то есть

$$\iint_{\Omega} (F(x, y) - f(x, y))^2 dxdy \rightarrow \min_{a, b, c, d, e, g}. \quad (3.8)$$

Интеграл берётся по опорной области Ω , которая формируется для каждой области недостоверной диспаратности с использованием морфологической операции делатации.

В случае дискретных функций F система линейных уравнений относительно a, b, c, d, e и g записывается в матричном виде

$$\sum_{\omega} \begin{pmatrix} x_i^4 & y_j^2 x_i^2 & x_i^3 y_j & x_i^3 & y_j x_i^2 & x_i^2 \\ x_i^2 y_j^2 & y_j^4 & x_i y_j^3 & x_i y_j^2 & y_j^3 & y_j^2 \\ x_i^3 y_j & y_j^3 x_i & x_i^2 y_j^2 & x_i^2 y_j & x_i y_j^2 & x_i y_j \\ x_i^3 & x_i y_j^2 & x_i^2 y_j & x_i^2 & x_i y_j & x_i \\ x_i^2 y_j & y_j^3 & x_i y_j^2 & x_i y_j & y_j^2 & y_j \\ x_i^2 & y_j^2 & x_i y_j & x_i & y_j & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ g \end{pmatrix} = \sum_{\omega} \begin{pmatrix} F_{ij} x_i^2 \\ F_{ij} y_j^2 \\ F_{ij} x_i y_j \\ F_{ij} x_i \\ F_{ij} y_j \\ F_{ij} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Параметры, полученные при решении системы позволяют создать наилучшее заполнение области недостоверной диспаратности квадратичной поверхностью.

Оптимизация вычислительной сложности

Вычислительная сложность напрямую зависит от числа пикселов изображения, для которых производится поиск соответственных. Для базового алгоритма такое множество совпадает с областью интереса. Число элементарных арифметических операций (таких как сложение и умножение) оценивается как

$$n \sim NSL . \quad (3.10)$$

где N — число точек сетки , S — число точек области сканирования , L — число точек области вычисления меры корреляции.

Задача уменьшения вычислительной сложности состоит в поиске методов, позволяющих уменьшить число n путём уменьшения одного или нескольких его составляющих.

Неплохие результаты даёт такой простой способ уменьшения числа вычислений. Сетка точек разрежается в N раз по двум направлениям. Объём вычислений уменьшается сразу в N^2 раз. На разреженной сетке находятся дисперсии. Затем проводится интерполяции на все остальные точки области интереса. При больших разрежениях целесообразна интерполяция путём построения гладкой поверхности, проходящей через точки сетки. Вычислительные эксперименты показали, что в чистом виде такая методика неэффективна, так как при малом разрежении вычислительные затраты остаются значительными, а при большом разрежении заметно теряется точность в точках, не принадлежащих сетке. Вычислительные эксперименты показали также эффективность применения пирамидальных алгоритмов и данных [105, 107]. Пирамидальность означает то, что вычисления разбиваются на несколько уровней. Сначала рассчитываются характеристики, относящиеся к большим фрагментам изображений, затем проводится уточнение для фрагментов меньшего размера с использованием ранее полученной информации [1, 105, 107, 336]. Для трёхмерной реконструкции эффективен подход, основанный на двухуровневой пирамидальности [105, 107]. На первом (верхнем) уровне пирамиды выполняются вычисления дисперсии с

большим разрежением. На втором (нижнем) уровне диспаратности вычисляются с малым разрежением с учётом результатов, полученных на первом уровне. Результаты первого уровня используются также для уменьшения областей сканирования. Размер области вычисления меры корреляции также изменяется при переходе на другой уровень.

На первом пирамидалном уровне производятся вычисления на сильно разреженной сетке. Поскольку результаты будут использоваться далее, вычисления и проверка выполняются с использованием больших областей сканирования и расчёта меры корреляции, а также с выполнением обратного прохода. При возникновении недостоверных диспаратностей вычисления повторяются для ближайших соседних точек. Точки, в которых не получено достоверного значения, объединяются в области недостоверной диспаратности. После вычисления диспаратности на сильно разреженной сетке выполняется интерполяция гладкой поверхностью.

На втором уровне пирамид выполняются вычисления на слабо прореженной сетке, при этом исключаются точки где значения диспаратностей уже известны. В результате прохождения первого уровня алгоритма в точках сетки имеются опорные значения диспаратности. Это позволяет существенно уменьшить область сканирования, а также уменьшить область вычисления корреляционной функции. При высоком уровне корреляции, можно отказаться от применения обратного прохода. Таким образом, информация, полученная на первом уровне, позволяет уменьшить все три множителя в формуле (3.10). Реализация описанного пирамидалного алгоритма в [105, 107, 110] позволила снизить вычислительные затраты в 20 раз по сравнению с алгоритмом, не использующим пирамидалность.

3.3.2. Дополнительные возможности применения

стереореконструкции в режиме реального времени

Обеспечение стереореконструкции в реальном времени даёт новые возможности развития методов и алгоритмов дистанционных измерений. В первую очередь это связано с использованием динамических характеристик движущихся объектов для уточнения положения объектов в пространстве и параметров, характеризующих форму этих объектов.

Восстановление трехмерной поверхности движущегося объекта по серии изображений

Система стереозрения реального времени позволяет также реализовать метод восстановления трехмерной поверхности по серии изображений, полученных одно камерой при движении объекта относительно камеры [94, 258]. Метод использует координатную систему, связанную с объектом, как показано на рисунке 3.6, *a*. При расчетах используется параллельная проекция (рисунок 3.6, *б*), которая является аппроксимацией стандартной перспективной проекции [94, 258]. Точка объекта проецируется вдоль линии, соединяющей фокус камеры с центром масс объекта, на гипотетическую плоскость изображения, параллельную реальной реальной плоскости изображения и проходящую через центр масс объекта. Затем точка проецируется на реальную плоскость изображения с помощью перспективной проекции, что эквивалентно масштабированию координат точки в соответствии с соотношением фокусного расстояния камеры и расстояния между плоскостями. Для восстановления трехмерной поверхности используется серия последовательных изображений движущегося объекта. Серия изображений разбивается на набор пар изображений, каждая из которых рассматривается как виртуальная стереопара и обрабатывается корреляционным методом для нахождения карт диспаратности [94, 258].

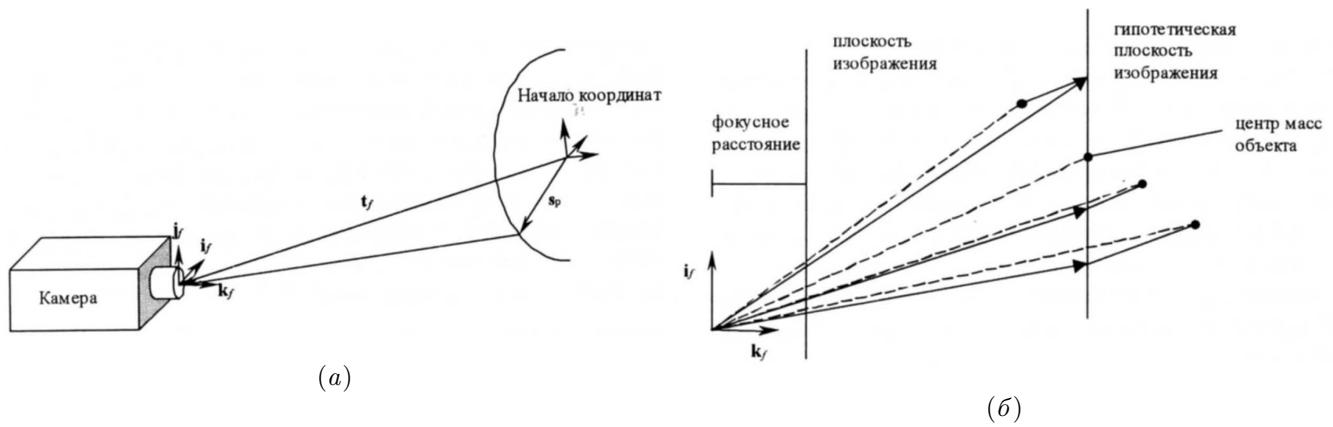


Рис. 3.6. Система координат, связанная с движущимся объектом (а) и параллельная проекция, используемая при расчётах (б)

Использование динамических характеристик объекта

Развитие систем машинного зрения, связано с человеко-машиинным взаимодействием [125–129, 300, 301]. В этих системах дистанционные трёхмерные измерения сочетаются с детектированием и отслеживанием перемещений объектов с применением моделирования оптических потоков и нейросетевых технологий [125, 164, 358]. В таких комбинированных системах для повышения точности и скорости детектирования и отслеживания объекта (в частном случае — человека, лица и черт лица) реализован метод параллельной обработки последовательностей оптических изображений в двух потоках, как показано на рисунке 3.7.

В одном потоке, представленном на схеме блоками "динамической" обработки, выполняется вычисление двумерных оптических потоков и оценка заранее обученной нейросетью степени сходства с заданным набором движущихся объектов. В то же время во втором потоке, представленном на схеме блоками "статической" обработки, проводится стереореконструкция зоны наблюдения, восстановление формы детектированных объектов и вычисление их трёхмерных характеристик [125, 164, 358]. Производится дистанционный сбор двумерных и трёхмерных данных о зоне наблюдения. На основе двумерных данных об оптических потоках с помощью нейросетевых классификаторов выделяются

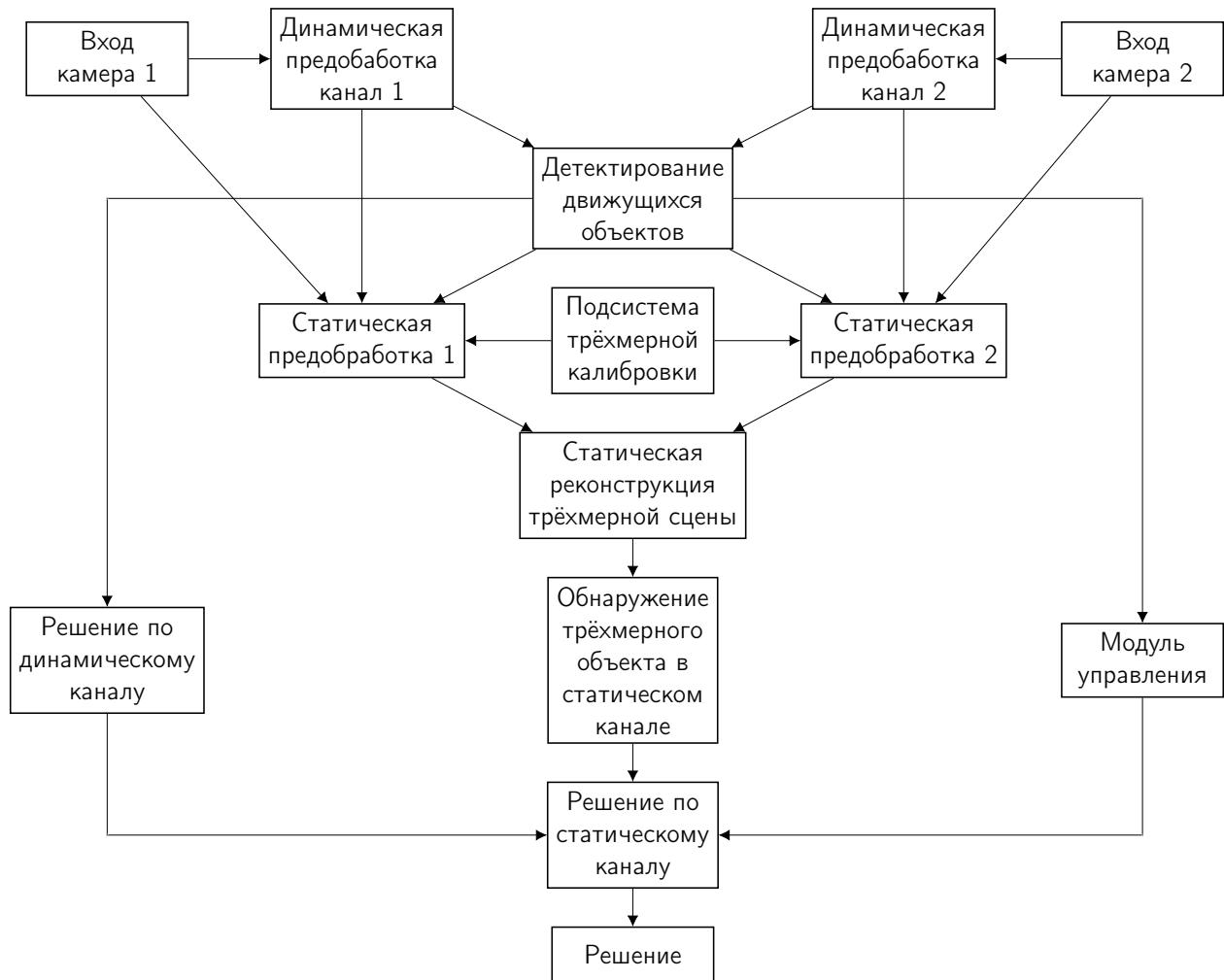


Рис. 3.7. Блок-схема параллельной обработки при стереореконструкции и детектировании движущихся объектов

регулярные динамические объекты, напоминающие движение объекта интереса — человека. Затем в трёхмерной зоне интереса проводится проверка наличия трехмерных объектов, напоминающих по размеру и форме объект интереса.

Обработка изображений в реальном времени позволяет проводить выделение и отслеживание объектов в условиях зашумленного фона, при слабом освещении, при частичном перекрытии объектов и быстром их перемещении по сложным траекториям [125, 126, 129]. На рисунке 3.8 показана блок-схема комплекса алгоритмов, используемых для детектирования лица человека в режиме реального времени [164].

Благодаря совмещению разработанного методу стереореконструкции с анализом оптических потоков, обеспечена возможность эффективного выделения

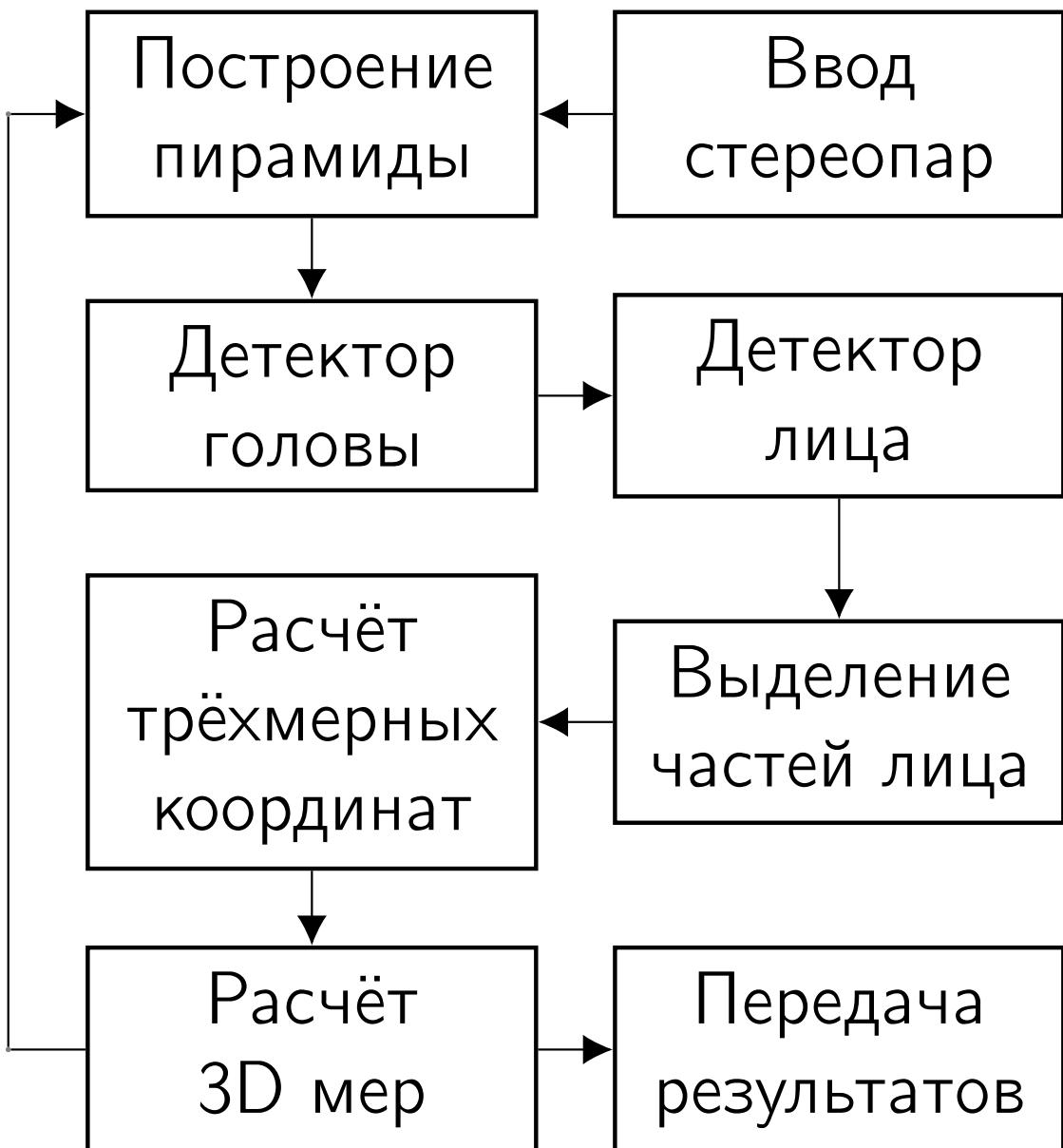


Рис. 3.8. Блок-схема детектирования лица человека в режиме реального времени

лиц, которые частично перекрыты другими объектами. Комплексирование методов детектирования позволяет применять их в условиях, когда фон сильно зашумлен или задан сложный сценарий съемки.

Для явного и эффективного представления системы биометрического детектирования/отслеживания разработан вид архитектуры биометрической системы распознавания, который позволяет эффективно распараллеливать процесс отслеживания. Основная отличительная особенность состоит в том, что мо-

дуль слежения распараллеливается за счет использования независимо слежения за точками, областями и графом, а также модуля координации указанных типов слежения [129, 358]. Данный способ распараллеливания процесса слежения позволяет улучшить работу и обеспечить детектирование в реальном масштабе времени быстро движущихся объектов, например, в случае быстрой смены ракурсы человеком. С другой стороны, данный способ обеспечивает устойчивость к перекрытию объектов шуму в видеопоследовательности. Если устойчивое отслеживание по точкам проводиться не может, система переключается в режим устойчивого слежения по областям и структуре графа лица человека. В случае значительного ухудшения работы системы или сбоев консистентности областей в графе лица производится новая стереореконструкция. При этом выявлен оптимальный гибридный метод, использующий интеграцию двухмерного отслеживания с методом оценки карты глубины, который использует методы локального выделения признаков, инвариантные к освещенности, что позволяет вычислить пространственные углы между локальными точками и оценить ракурс объекта. Разработанная система стереоотслеживания лица обладает следующими свойствами: работает в режиме обнаружения одного лица и более; отделяет лица от сложного фона; остается работоспособной при большом скоплении людей; обеспечивает высокий уровень устойчивости и целостности за счет применения интеллектуального модуля устройства слежения за лицом человека; имеет высокую производительность обработки в режиме реального времени; поддерживает работоспособность в условиях различной освещенности.

3.3.3. Программная реализация и примеры применения стереореконструкции реального времени

Методы и алгоритмы, описанные выше, использовались при создании программно-аппаратных комплексов, предназначенных для детектирования человека в зоне наблюдения, отслеживания перемещения человека, детектирования и распознавания лица человека [94, 107, 110, 113, 164, 258, 358].

Приведём несколько примеров применения разработанных алгоритмов стереореконструкции при решении различных задач:

- восстановлении трёхмерной формы лица в системе машинного зрения;
- детектировании объектов в зоне наблюдения с измерением физического расстояния до этих объектов;
- оценке наблюдаемых объектов при съёмке с летательных аппаратов.

В качестве примера восстановления рельефа гладкой трёхмерной поверхности сложной формы по слабоконтрастным изображениям, получаемым в бинокулярной системе компьютерного зрения, работающей в реальном масштабе времени, приведем изображения лица человека. На рис. 3.9 показан пример измерения карты диспаратностей лица человека в режиме реального времени [110,297].

Для каждого из двух изображений исходной стереопары выполнена предварительная обработка с помощью операции локальной эквализации изображений 3.1 для облегчения поиска соответственных точек корреляционным методом. Полученные изображения приведены на рис. 3.9, *a*,3.9, *b*. Восстановление карты диспаратности проводилось по методике, описанной в разделе 3.3. Для уменьшения вычислительной сложности применялось пирамидальное представление изображений, включающее два уровня пространственного разрешения. Восстановленные карты диспаратности на шагах низкого и высокого разрешения показаны на рис. 3.9, *c*,3.9, *g* соответственно. Хотя диапазон изменения целочисленных диспаратностей в пределах наблюдаемого объекта невелик и составляет несколько единиц, применение сверхразрешения позволило получить достаточно плавное изменение восстановленных диспаратностей, что выражается в плавном изменении градаций серого на изображениях рис. 3.9, *c*,3.9, *g*.

Более точные результаты трёхмерной реконструкции в реальном времени такого слабоконтрастного и подвижного объекта как человеческое лицо получаются при использовании подхода, основанного на детектировании антропо-

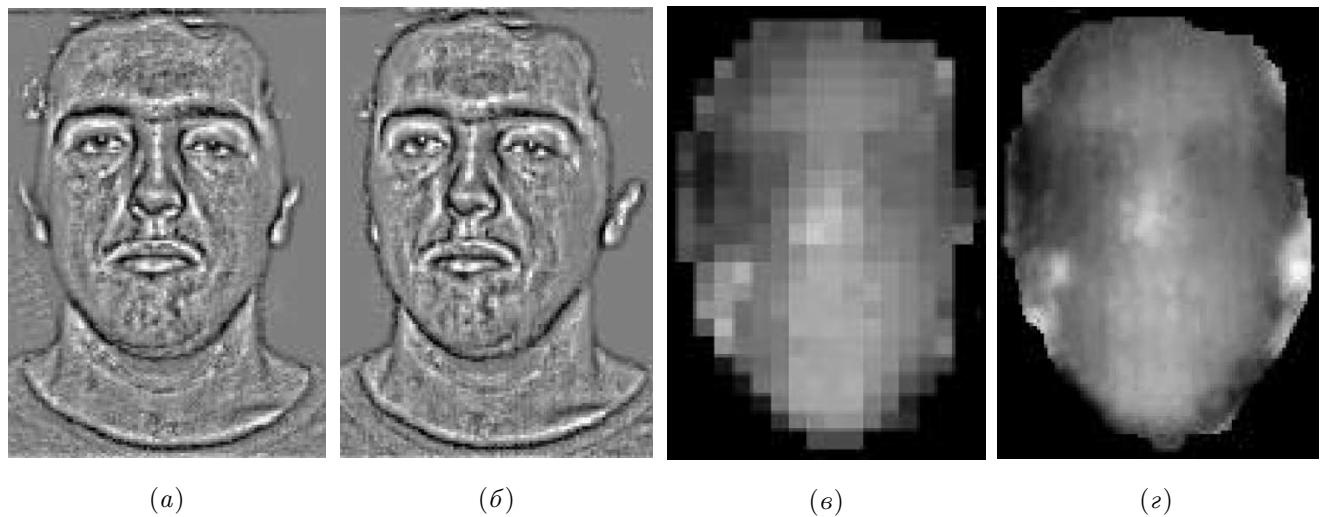


Рис. 3.9. (а, б)- исходная стереопара после локальной эквализации изображений,(в, г)-восстановленные карты диспаратности на шагах низкого и высокого разрешения соответственно

метрических точек лица и слежении за их динамикой. На рис. 3.10 показан пример измерения карты диспаратностей лица человека в режиме слежения за антропометрическими точками лица человека в мультибиометрической системе реального времени [127, 129, 164, 358].

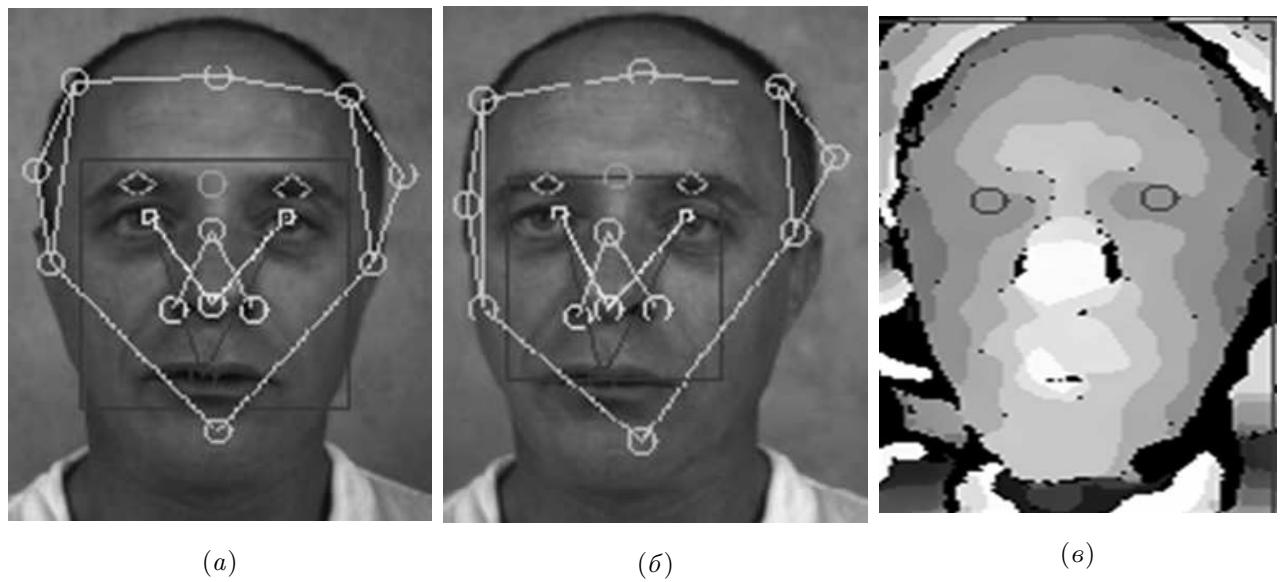


Рис. 3.10. (а, б)- исходная стереопара в режиме слежения за антропометрическими точками лица человека,(в)-карта диспаратности, восстановленная с учетом антропометрических точек лица человека

Возможности использования трёхмерных характеристик объекта из его

движения относительно камеры можно продемонстрировать на примере слежения за перемещением лица человека в поле зрения камеры [94, 164, 258].

На рис. 3.11 показан пример измерения карты возвышений лица человека на основе вычисления карт X - и Y -диспаратностей.

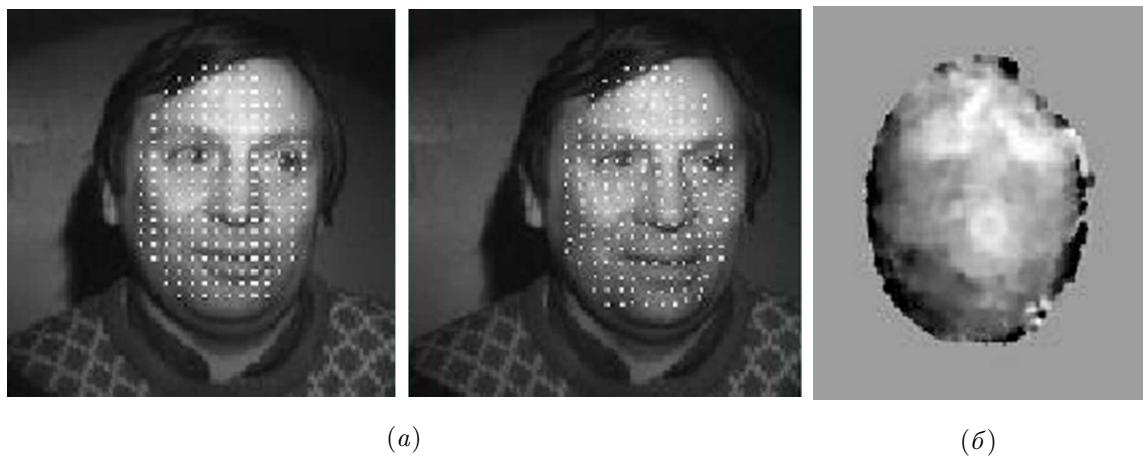


Рис. 3.11. (а) — изображения лица в видео-последовательности с нанесенной сеткой вычисления диспаратности; (б) — восстановленная карта возвышения лица, полученная по карте диспаратности

Практически важным свойством систем машинного зрения, использующих стереореконструкцию, является возможность раздельного детектирования объектов в различных зонах, на различном расстояниях от камер. Это важно для компьютерных систем, взаимодействующих с человеком в реальном трёхмерном мире, в частности для роботов, имеющих стереоскопическую систему зрения. Пример раздельного детектирования объектов в на различном расстояниях от такого робота показан на рисунке 3.12:(а) — одно из исходных изображений, получаемых системой стереозрения небольшого робота, (б) — карта диспаратности в ближней зоне наблюдения, на которой автоматически сегментировано изображения ноги человека, (в) — карта диспаратности в средней зоне наблюдения системы стереозрения робота, где автоматически сегментированы изображения находящихся в средней зоне предметов , (г) — ноги человека, выделенные в дальней зоне наблюдения системы стереозрения.

Пример использования метода стереореконструкции на данных съёмки с

летательного аппарата показан на рис. 3.13. Хотя полученный результат не даёт достаточной точности для надёжного распознавания объекта по его восстановленной форме, он позволяет отличить реальный трёхмерный объект от его имитации, сделанной с помощью двумерного изображения.

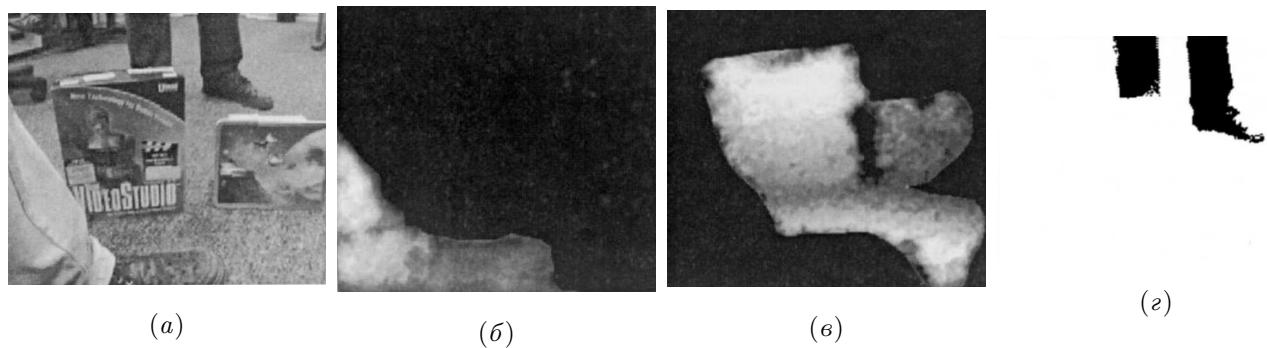


Рис. 3.12. (а) — одно из исходных изображений системы стереозрения небольшого робота, (б, в, г)—карты диспаритности, соответственно, в ближней, средней и дальней зонах наблюдения системы стереозрения робота (объяснение в тексте)

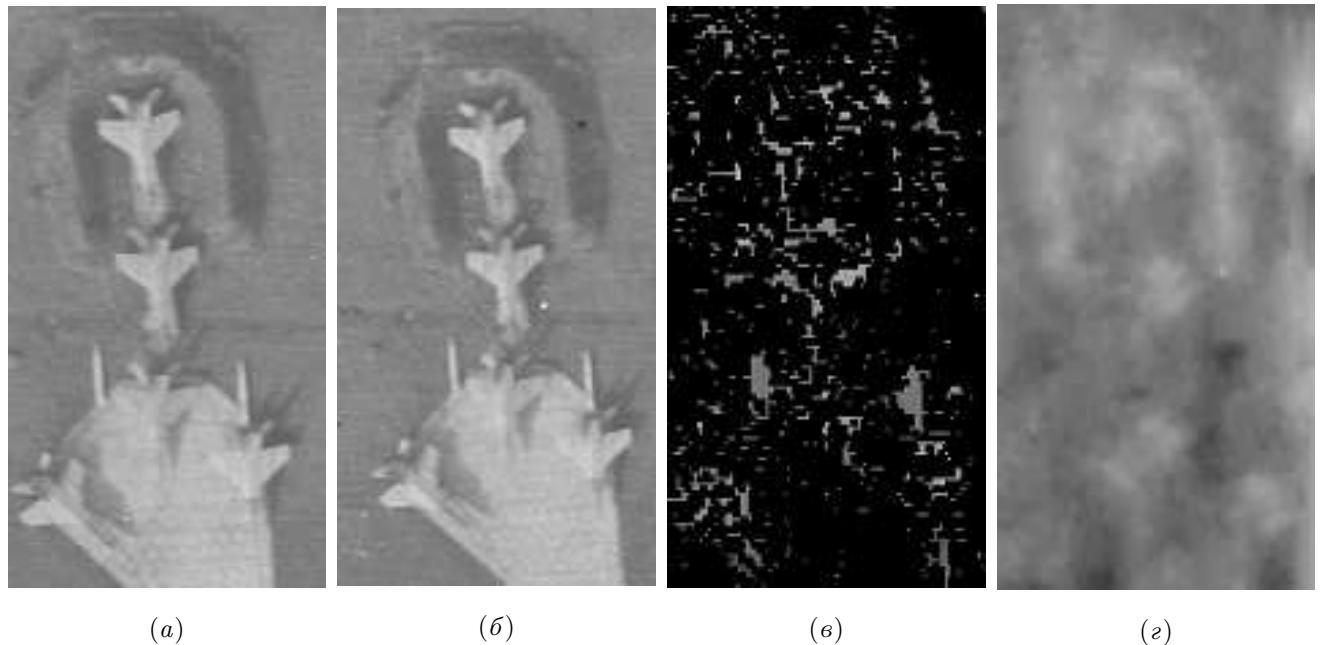


Рис. 3.13. (а, б) —исходная стереопара, (в) — точки с надёжно распознанной диспаритностью, (г) — результат работы алгоритма с коррекцией

Таким образом, развит метод дистанционных измерений трёхмерных характеристик различных объектов с использованием стереопар изображений, в том числе для применения в реальном времени.

3.4. Разработка метода вычисления трехмерных характеристик объектов по одиночным спутниковым изображениям

Повышение информативности спутниковых изображений с практической точки зрения должно включать согласованное решение задач повышения пространственного разрешения изображений для обеспечения возможности изучения наблюдаемых объектов с большей детализацией и извлечения трёхмерной информации о наблюдаемых объектах с возможным привлечением вспомогательной информации об условиях съёмки при использовании одиночных изображений.

3.4.1. Выбор подхода к извлечению трёхмерной информации из одиночных аэрокосмических изображений

Методы решения этих задач, используемые в настоящее время, можно разделить на следующие группы:

- Традиционные («классические») методы, основанные на понимании исследователями-экспертами исследуемых процессов и явлений и нахождении в них эмпирических закономерностей.
- Методы машинного обучения, в основном использующие искусственные нейронные сети, основанные на обработке больших наборов данных и автоматическом выделении закономерностей.

Для построения трёхмерных моделей ригидных объектов по одному спутниковому изображению в первую очередь должна быть решена задача измерения геометрических размеров наблюдаемых объектов в трёхмерном пространстве по двумерным данным, представленным в изображении. По отношению к геометрическим размерам в плоскости (X, Y) подстилающей поверхности (для

простоты пренебрежём кривизной этой поверхности) задача решается достаточно просто, поскольку геометрические размеры пикселя спутникового изображения всегда известны с хорошей точностью из технических условий съёмки и характеристик аппаратуры. Эта информация предоставляется операторами космической съёмки в сопроводительной информации (метаданных) к спутниковым изображениям. Задача измерения геометрических размеров по вертикали (по оси координат OZ , направленной перпендикулярно горизонтальной плоскости, наиболее полно может быть решена при наличии стереопары изображений (двух изображений, одновременно снятых пространственно разнесёнными камерами с параллельными оптическими осями). Высота объекта — одна из основных характеристик, важных для геоаналитических сервисов. Анализ высотной структуры городских территорий может быть полезен для многих прикладных задач, например при оценке плотности в регионах. По стереопаре изображений вычисляется карта дисперсий, позволяющая измерить удалённость наблюдаемых участков поверхностей от камеры и, как следствие от плоскости (X, Y) [107, 213]. Активно развиваются методы извлечения 3D информации из одиночных спутниковых изображений, которые предполагают как привлечение вспомогательных данных, так и дополнительную операторскую обработку данных спутниковой съёмки [4, 5, 61]. Задача дистанционного измерения физических параметров зданий по спутниковым изображениям решается до настоящего времени, как правило, с помощью ручного дешифрирования. Это требует значительного времени при обработке картографами данных по обширным территориям [86]. Поэтому актуальна разработка нового метода для автоматической оценки высот объектов на основе однократного изображения дистанционного зондирования. Для практических применений актуальны методы, позволяющие проводить автоматическую обработку серий спутниковых изображений и выполнять измерение высот объектов с использованием их теней и вспомогательной информации об условиях съёмки [61, 86].

Первые автоматизированные алгоритмы определения высоты объекта по

данным дистанционного зондирования применяли стереопары изображений. В настоящее время эта проблема может быть решена в автоматическом режиме. Решение показывает высокую точность, но требует дорогостоящих данных — стереопар спутниковых снимков субметрового разрешения. Другие подходы основаны на картировании по радарным данным или материалам воздушно-лазерного сканирования [86].

Автоматическая сегментация изображений открывает возможность автоматизации процедуры восстановления 3D-моделей здания и других антропогенных объектов.

Для использования относительно дешёвых спутниковых данных актуально развитие подхода, основанного на извлечении трёхмерной информации их геометрических формами стен, крыши и теней на одиночных изображениях.

Большинство предлагаемых методов до настоящего времени опирались на традиционные подходы к обработке изображений [54, 56, 86]. При этом интенсивно развивается подход к извлечению геометрии зданий и других объектов с помощью интеллектуальных методов глубокого обучения для сегментации изображений [60, 61, 86].

Рассмотрим возможности комплексировании традиционных и развивающихся методов глубокого обучения для дистанционного измерения трёхмерных характеристик объектов по спутниковым изображениям. Традиционные методы повышения пространственного разрешения спутниковых изображений, в частности метод спектрального слияния с использованием опорного изображения, метод фильтрации с интерполяцией данных, вероятностный метод, метод повышения разрешения с использованием априорной векторной информации описаны в главах 1, 2 настоящей работы.

Традиционные методы извлечения трёхмерной информации из изображений можно группировать следующим образом [61, 117]:

1. Методы, базирующиеся на анализе теней [86, 124].

2. Метод автоматизированного получения моделей зданий, использующий связь обработки 2D-изображения и 3D-моделирования зданий, которые классифицируются по типу крыши [140, 194].
3. Метод, задействующий данные ГИС и топопланов для локализации и позиционирования участков изображения, оценки высот объектов. Для текстурирования стен используются наземные фотографии зданий с разных ракурсов [99].

Среди методов, использующих машинное обучение и искусственные нейронные сети (ИНС) можно выделить следующие:

- ИНС типа автоэнкодера на базе топологии DeepResUNet ([323], позволяющие с высокой точностью различать здания на изображениях сверхвысокого разрешения и с высокой надежностью классифицировать принадлежность каждого пикселя изображения к зданию или фону [361]).
- Автоматический подход на основе глубоких свёрточных нейросетей для прогнозирования карты высот непосредственно из изображений RGB [294].
- Использование информации о тенях для автоматической оценки высот зданий по монокулярным спутниковым изображениям путём сегментации теней с последующим расчётом высот на основе геометрии сцены [86].
- Привлечение вспомогательных данных, например от лидаров для реконструкции наиболее информативной модели здания [335].
- Комплексирование нескольких ИНС, например в работе [157].
- Комплексирование ИНС и классических алгоритмов [158]. Первая ИНС — для определения базовых линий крыш зданий. Вторая ИНС — для построения карты высот с использованием данных лидара. Дальнейшая аналитическая обработка воссоздаёт конструкцию здания по принципу подобия одному из предопределенных классов.

Анализ показывает общую тенденцию к превосходству методов, основанных на ИНС, ввиду возможности их адаптации к различным условиям эксплуатации и наборам данных и способности к извлечению данных из сложных иерархий признаков, включающих спектральные, геометрические, структурные, текстурные и другие свойства объектов. В настоящее время полносвёрточные ИНС являются фактически стандартом для построения методов извлечения информации из изображений.

3.4.2. Развитие нейросетевого метода оценки трёхмерных характеристик ригидных объектов

Основной подход к восстановлению трёхмерных моделей объектов основан на оценке их трёхмерных параметров с использованием метаданных спутникового снимка, содержащихся в паспорте изображения. Возможен также альтернативный подход, основанный на извлечении масштабирующих коэффициентов по известным типизированным объектам, присутствующим в изображении [60, 61]. Восстанавливаются форма и геометрические параметры ригидных антропогенных объектов по их растровым областям, сегментированным с помощью ИНС.

Предложенный метод основан на использовании теней и видимых частей стен и крыш. Для сегментации изображения применяются глубокие свёрточные нейронные сети [61].

Интерпретация данных, извлечённых ИНС, по-прежнему требует построения традиционных алгоритмов. Это связано с низким уровнем приспособленности ИНС для работы с данными в векторном представлении.

Предлагаемый метод построения трёхмерных моделей объектов земной поверхности основан на многомасштабном подходе и предполагает, что исходные данные могут быть предварительно подготовлены с использованием одного из методов повышения разрешения. Выбор архитектуры ИНС описан в [6, 61, 160].

Реализация предлагаемого метода включает два этапа обработки спутни-

ковых изображений.

На первом этапе выполняется интегральный анализ изображения, целью которого является выявление основных свойств и соотношений объектов на изображении:

- Принадлежность объектов к заданному набору тематических классов: здания, сооружения, дороги и др.
- Принадлежность пикселов пространственным классам: крыши и стены зданий, поверхность земли.
- Принадлежность пикселов теням от объектов.
- Принадлежность пикселов значимой окрестности объектов.
- Группировка пикселов изображения в объекты [61].

На втором этапе проводится индивидуальный (локальный) анализ каждого выявленного объекта, целью которого является построение его трёхмерной модели. Каждый объект подвергается различным процедурам обработки в зависимости от типа объекта [61]:

- уникальные объекты определяются по заранее известным пространственным положениям и не подвергаются обработке, для них используются готовые 3D-модели;
- типовые объекты определяются по тематическому классу объекта, определённому на этапе интегрального анализа подвергаются специализированной (для данного типа объектов) процедуре определения свойств;
- для остальных объектов выполняется процедура восстановления геометрии.

Третий тип обработки является наиболее сложным и включает два этапа обработки данных:

- извлечение геометрических признаков (граней крыши и стен) с помощью свёрточной ИНС [274];
- интерпретация полученных геометрических признаков [61].

Принципиальная схема метода представлена на рис. 3.14 (обучение) и 3.15 (работа).



Рис. 3.14. Обучение методов извлечения трёхмерной информации о наземных объектах инфраструктуры из спутникового изображения

Для обучения искусственной нейронной сети применяется процедура «обучения с учителем». Это означает наличие обучающего набора данных, которые должны быть предварительно размечены и содержать примеры классов, которые должны распознаваться нейросетью после завершения процесса обучения.

На этапе предварительной обработки проводится оценка интегральных параметров изображения (например, вертикальных и плоскостных масштабных коэффициентов). В процессе обработки данных в ИНС, формируется нейросетевая модель, аппроксимирующая оценку вероятности принадлежности каждого пикселя исходного изображения каждому из интерпретируемых классов, что соответствует задаче семантической сегментации [326]. Эти данные образуют набор полей оценок вероятностей. Нейросетевая модель семантической сегментации способна распознавать и локализовать объекты нескольких классов,

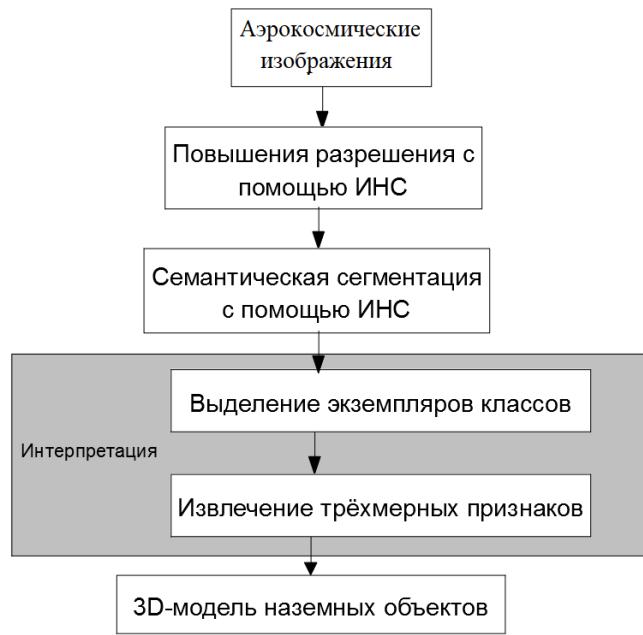


Рис. 3.15. Работа метода извлечения трёхмерной информации о наземных объектах инфраструктуры из спутникового изображения

каждый из которых имеет собственные уникальные особенности, усложняющие распознавание. Результатом распознавания должен быть набор полей оценок вероятностей (растровых масок), попиксельно соответствующих исходным изображениям.

На основе сформированных полей вероятностей производится синтез признаков, в рамках которого осуществляется бинаризация путем порогового преобразования или его адаптивных вариантов, а также последовательность логических операций над ними, обеспечивающая взаимную консистентность классов [61]. Результат синтеза признаков, представляющий собой набор растровых изображений, обрабатывается с помощью набора процедур аналитической интерпретации, в которых можно выделить основные этапы: выделение экземпляров объектов; извлечение трехмерных пространственных признаков отдельных антропогенных объектов. Аналитическая интерпретация может быть выполнена многократно для различных вариантов параметров синтеза признаков. Оптимальный вариант параметров синтеза признаков выбирается путем сопоставления показателей качества, соответствующих разным вариантам параметров.

В процессе исследований были произведены две модификации U-Net [60, 61]. Изменения в них были направлены, главным образом, на стабилизацию работы в условиях малой обучающей выборки, а также на адаптацию к специфике аэрокосмических изображений. Принципиальная схема ансамбля ИНС для извлечения информации о наземной инфраструктуре приведена на рис. 3.16.

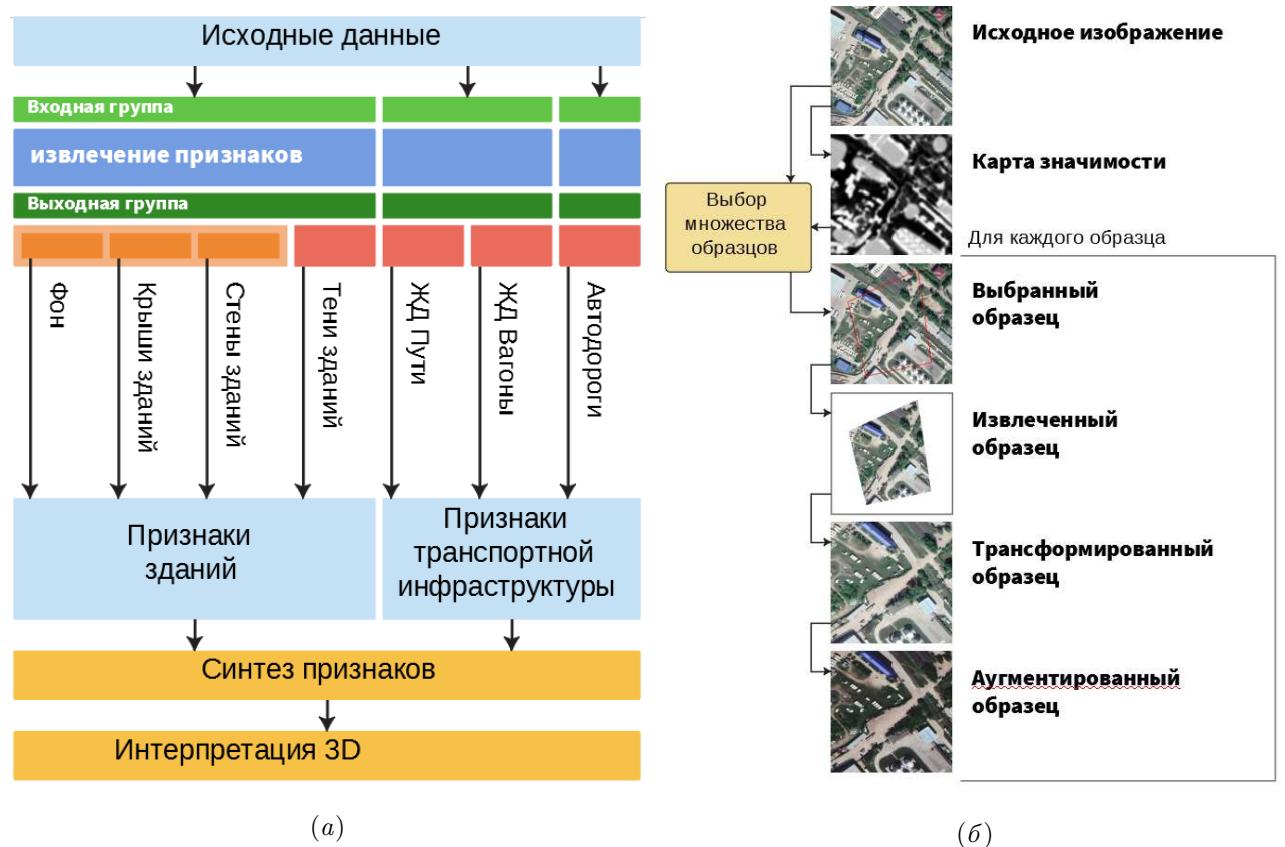


Рис. 3.16. Принципиальные схемы: а) ансамбля ИНС для извлечения информации о дорожной инфраструктуре; б) методики извлечения и аугментации обучающих образцов

Обучение нейросетевых моделей в условиях дефицита обучающих образцов и дисбаланса классов имеет ряд особенностей [62]. Общий дефицит обучающих изображений, а также количественный и площадной дисбаланс классов, в совокупности с их большим объёмом (значительно превышающим возможности современных GPU), приводят к затруднению в использовании обучающей выборки непосредственно.

Общепринятым решением этих проблем является процесс аугментации обучающей выборки, заключающейся во внесении контролируемых искажений,

что позволяет значительно повысить её репрезентативность. Это означает, что ИНС, обученная по данной выборке должна такие же характеристики (с учётом допустимой погрешности), как при обучении по генеральной совокупности. Аугментация предполагает расширение имеющегося датасета путем различных допустимых искажений: геометрические и спектральные преобразования, добавления шума и т.д. Разработана методика, учитывающая как общую практику аугментации визуальных данных, так и специфику спутниковых изображений [62]. Принципиальная схема методики представлена на рис. 3.16, б. Если в обучающей выборке классы представлены неравномерно (дисбаланс классов), используется метод вероятностной аугментации [96].

Применение разработанной методики позволяет сформировать обучающие и валидационные выборки произвольного объёма.

Для количественной оценки семантической сегментации при обработке спутниковых изображений предложенным методом использованы меры IoU , $F1$. Эти меры определяются следующим образом. IoU (Intersection-over-Union, мера Жаккара) — оценка, используемая для измерения точности детектора объектов в конкретном наборе данных:

$$IoU = \frac{TP}{TP + FN + FP},$$

где TP (True Positive) — число истинно положительно детектированных пикселов; FP (False Positive) — число ложно положительно детектированных пикселов; TN (True Negative) — число истинно негативно детектированных пикселов; FN (False Negative) — число ложно негативно детектированных пикселов. $F1$ — оценка качества классификатора, которая определяется как среднее гармоническое значение точности P и полноты R :

$$F1 = \frac{2PR}{P + R}.$$

Полученные значения $F1$ и IoU представлены в таблице 3.1 [6, 21, 22, 160]. Пример результатов интерпретации изображений представлены на рис. 3.16.

Таблица 3.1. Количественные оценки качества распознавания основных классов предложенной нейросетевой моделью семантической сегментации

Наименование объекта	Мера F1	Мера IoU
Здание	0.896	0.812
Крыша здания	0.896	0.812
Стена здания	0.60	0.43
Тень здания	0.872	0.773
Область железной дороги	0.78	0.64
Автодорога	0.62	0.45

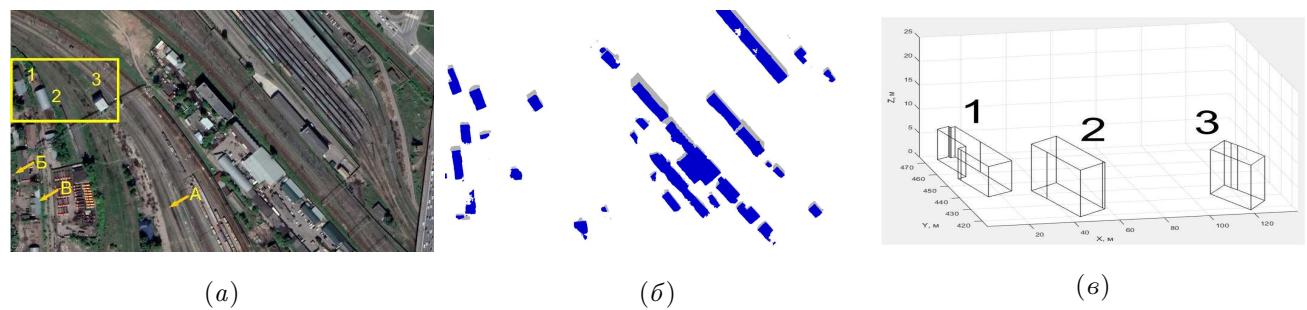


Рис. 3.17. Семантическая сегментация и построение трехмерных моделей зданий с помощью ИНС : (а) тестовое спутниковое изображение;(б) результат семантической сегментации зданий (в) трехмерная модель зданий 1–3 (фрагмент изображения)

3.4.3. Программная реализация разработанного метода

Описанный выше метод построения трехмерных моделей на земной поверхности по монокулярным спутниковым изображениям использован при создании макета исследовательского программного комплекса (МПК) повышения качества изображений в ходе прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Разработка методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения аэрокосмических изображений для мониторинга объектов железнодорожного транспорта» [146].

Входящий в МПК программный блок трехмерной реконструкции принимает на вход результаты сегментации, выдаваемые нейросетью при обработке

спутникового изображения, и выполняет построения геометрических моделей объектов на земной поверхности. В МПК выполняется определение формы основания и среднего значения высоты зданий. Работа программного блока трехмерной реконструкции включает оценку масштабирующих коэффициентов, которые могут быть получены как с использованием метаданных спутниковой съемки, так и по результатам сегментации типовых объектов хозяйственной инфраструктуры [60, 61, 231]. Тестирование МПК проводилось на специально подготовленном наборе тестовых спутниковых изображений. Пример обработки одного из спутниковых изображений из тестового набора представлен на рис. 3.17. Для тестового изображения (а) выполнена сегментация (б), на базе которой построена трёхмерная модель зданий (в), восстановленная по результатам интерпретации данных семантической сегментации [166]. Построенные модели позволили рассчитать средние геометрические параметры объектов 1, 2, 3 соответственно: высоты 6.4 м, 9.8 м, 9.4 м; периметры 92.2 м, 80.7 м, 60 м; площади 357.4 м^2 , 374.0 м^2 , 216.4 м^2 ; объёмы 2269 м^3 , 3647 м^3 , 2023 м^3 . Большинство зданий, даже частично скрытых деревьями, выявлено полностью. Получены довольно чёткие контуры крыш, стен и теней зданий, а также сегментация их частей на границе изображения.

Дальнейшим развитием предложенного метода построения трехмерных моделей является комплексный нейросетевой подход, разработанный при выполнении исследований по теме «Разработка фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше, в том числе в арктическом регионе, по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования». Подход направлен на повышение информативности спутниковых данных при космическом мониторинге на основе методов машинного обучения и включает: повышение пространственного разрешения изображений для обеспечения возможности изучения наблюдаемых объектов с большей детализацией; извлечение трехмерной информации о наблюдаемых объектах из одиночных изображений с возможным привлечением вспомогательной инфор-

мации об условиях съемки. Предложенный комплексный подход позволяет автоматизировать процесс извлечения трехмерных пространственных данных об антропогенных объектах из спутниковых изображений и снизить трудоемкость обработки спутниковых изображений при спутниковом мониторинге импактных районов. Проведенные численные эксперименты, показали преимущества разработанных нейросетевых методов в сравнении с традиционными методами при повышении пространственного разрешения спутниковых изображения инфраструктурных объектов импактных районов Арктики [20, 22].

Представленный подход позволяет автоматизировать процессы повышения пространственного разрешения и извлечения трёхмерных пространственных данных о наземных объектах из спутниковых изображений, что является наиболее трудоёмким процессом при спутниковом мониторинге.

В рамках предложенного комплексного подхода создан исследовательский программный комплекс, реализующий в интерактивном и пакетном режимах полный цикл обработки спутниковых изображений, включающий нескольких, последовательно выполняемых стадий обработки: повышение пространственного разрешения включая двух- или четырехкратное суперразрешение на основе искусственных нейросетей и паншарпенинг с возможностью выбора метода слияния изображений; нейросетевая сегментация для создание дополнительных информативных классов; анализ результатов сегментации для оценки трехмерных моделей антропогенных объектов [21, 22]. Описан проведенный цикл обработки и анализа экспериментальных данных для обучения и тестировании методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта, разработанных для повышения информативности спутниковых данных при космическом мониторинге: подготовка и разметка больших объемов данных ДЗЗ; обучение ИНС на подготовленном обучающем наборе данных; тестирование обученных ИНС на подготовленном тестовом наборе данных и оценка критериев повышения информативности спутниковых данных.

Проведённые численные эксперименты, показали преимущества разрабо-

танных нейросетевых методов в сравнении с традиционными методами при повышении пространственного разрешения спутниковых изображения объектов инфраструктуры.

Получаемые с помощью предложенного метода трёхмерные модели можно использовать в качестве данных для геоинформационных систем. Такие данные применимы для мониторинга инфраструктурных объектов, в том числе расположенных в труднодоступных районах, например в импактных районах Арктики [21, 22].

Таким образом, развит метод комплексирования данных для дистанционных измерений пространственных характеристик антропогенных объектов по одиночным спутниковым изображениям. Показана перспективность предложенного метода для повышения информативности спутниковых данных при космическом мониторинге, в том числе в труднодоступных районах.

Выводы к Главе 3

В главе описаны следующие основные результаты:

- Проведен анализ состояния развития систем трёхмерного машинного зрения с точки зрения решения задачи дистанционного измерения трёхмерных характеристик объектов и восстановление карт высот местности по одному или нескольким её снимкам. Показано, что при наличии технических возможностей, наиболее эффективные методы дистанционного измерения трёхмерных характеристик объектов основаны на комплексировании данных от двух или более сенсоров, объединённых в систему стереоскопического зрения.
- Предложен метод и алгоритмы восстановления трёхмерной поверхности объекта с целью использования его пространственных характеристик, работающие в реальном масштабе времени. Для решения задачи избран

корреляционный алгоритм стереореконструкции, как наиболее быстрый по сравнению с прочими методами восстановления трёхмерной поверхности. Предложен также метод восстановления трехмерной поверхности по серии изображений, полученных одно камерой при движении объекта относительно камеры.

- Рассмотрены различные случаи ошибок корреляционного алгоритма, предложены и реализованы методы коррекции этих ошибок, не ухудшающие быстродействия алгоритма. Приведены примеры восстановления рельефа гладкой трёхмерной поверхности сложной формы по слабоконтрастным изображениям, получаемым в бинокулярной системе компьютерного зрения.
- Предложен подход к решению задачи измерения геометрических размеров наблюдаемых объектов в трёхмерном пространстве по двумерным данным, представленным в спутниковом изображении, основанный на комплексировании традиционных методов обработки изображения с методами, основанными на машинном обучении и интеллектуальном анализе данных с применением искусственных нейронных сетей. Предложен численный метод извлечения трёхмерной информации о наземных объектах из одиночного спутникового изображения, включающий применение нейросетевой модели семантической сегментации спутникового изображения и извлечения трёхмерных пространственных данных о наземных объектах с привлечением данных об условиях спутниковой съёмки.
- Предложенные методы и алгоритмы измерений трёхмерных характеристик объектов, использованы при создании программно-аппаратного комплекса обработки изображений, предназначенного для обнаружения человека в зоне наблюдения и отслеживания его перемещения в этой зоне, а также в макете исследовательского программного комплекса повыше-

ния качества изображений для мониторинга объектов железнодорожного транспорта. На результаты работы получена правовая защита в виде патентов РФ [125–129].

- Описанный подход к построению трехмерных моделей на земной поверхности по моноокулярным спутниковым изображениям использован при создании макета исследовательского программного комплекса (МПК) повышения качества изображений в ходе прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Разработка методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения аэрокосмических изображений для мониторинга объектов железнодорожного транспорта» (универсальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0312).

Глава 4

Методы дистанционного измерения пространственных спектров водной поверхности по оптическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости

Данная глава посвящена разработке методов и алгоритмов, позволяющих получать достоверную информацию о пространственных спектрах морского волнения по оптическим изображениям в широком диапазоне условий. Разрабатываются специальные восстанавливающие операторы, которые строятся на основе учёта различных условий формирования изображений, характеристик аппаратуры дистанционного зондирования, условий формирования морских волн.

Результаты настоящей главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [27, 28, 36, 38, 59, 111, 112, 171, 175, 176, 302].

4.1. Пространственно-временная структура поверхностного волнения и возможности дистанционного измерения её характеристик

4.1.1. Значение дистанционного измерения пространственных спектров морских волн

Регистрация пространственных спектров поверхностных волн актуальна при решении многих фундаментальных и прикладных проблем. Получение информации о таких спектрах важно для изучения различных физических процессов, происходящих вблизи границы океана и атмосферы [175]. Простран-

ственные спектры морских волн, получаемые при обработке аэрокосмических изображений, являются эффективным средством дистанционного мониторинга различных явлений, происходящих в морях и океанах. Дистанционный мониторинг морских акваторий эффективен для решения научных задач в области океанологии, метеорологии, геоэкологии, геоинформатики, для прикладных задач в различных отраслях экономики (рыбное хозяйство, морской транспорт, добыча нефти и газа и др.), а также охраны окружающей среды в морях и океанах. Дистанционный мониторинг открывает возможность измерения двумерных спектров поверхностных волн на больших акваториях, в том числе в труднодоступных местах. Особенно актуально развитие методов дистанционного мониторинга в связи с возрастающим негативным антропогенным и природным воздействием на водную среду исследуемых акваторий [8, 170, 176].

Важной задачей, решаемой при космическом мониторинге объектов, является контроль процессов и явлений, создающих угрозу для безопасной эксплуатации этих объектов. Одна из существенных угроз связана с морским волнением, под воздействием которого может происходить абразия (размытие) берегов, представляющая реальную угрозу для различных объектов на побережье [9, 97, 103, 132]. Для правильной оценки степени воздействия морского волнения на объекты, находящиеся на берегу, необходимо иметь информацию о распределении волновой энергии по длинам волн и направлениям. Такое распределение описывается пространственными спектрами морской поверхности [76]. Мониторинг спектров ветрового волнения в акваториях морей и океанов позволяет производить расчёт и прогноз разнообразных характеристик поверхностных волн (высота, период, длина, генеральное направление распространения волн, одномерные и двумерные частотные и пространственные спектры, угловое распределение энергии волн и др.).

Физические особенности процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, а, следовательно, и характер спектров морского волнения, зависят от скорости и продолжительности действия приповерхностного ветра, от длины

разгона и других условий [76, 139, 141]. Поэтому важно исследование спектров волнения в широком диапазоне длин волн на обширных акваториях при различных условиях волнообразования. Для проведения таких исследований перспективно использование аэрокосмических методов дистанционного зондирования [9, 170]. Такие методы могут с успехом применяться для анализа спектров ветрового волнения на обширных акваториях [28, 29]. Для получения информации о пространственных спектрах высот и уклонов морского волнения в области высоких пространственных частот могут использоваться оптические изображения высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (от единиц до десятков см), полученные с низколетящих летательных аппаратов (вертолеты, самолеты) и морских платформ, а также методы восстановления этих спектров по спектрам изображений [38]. С развитием современных космических средств стало возможным получение спутниковых оптических изображений высокого и очень высокого пространственного разрешения (от 1 м до десятков см), что значительно повысило возможности исследования спектров поверхностного волнения на обширных акваториях в широком диапазоне пространственных частот [28, 29, 38].

Для достоверной оценки двумерных и одномерных спектров поверхностного волнения по спутниковым оптическим изображениям должны использоваться специальные методы восстановления характеристик морского волнения по полям яркости, регистрируемым космическими датчиками. При этом применяются специальные математические восстанавливающие операторы, которые строятся на основе учёта различных условий формирования изображений и характеристик аппаратуры дистанционного зондирования [7, 28, 29, 36, 38, 111, 112, 116].

Разработке восстанавливающих операторов посвящена настоящая глава. Для валидации спектров волнения, рассчитываемых по космическим изображениям, проводится их сопоставление со спектрами, полученными стандартными волнографами в контролируемых условиях. Метод валидации основан на со-

поставлении энергетических характеристик поверхностного волнения, измеряемых по пространственным спектрам оптических изображений, с результатами измерений характеристик волнения, выполняемых на месте [7, 28, 29]. Этот метод и результаты его применения приведены ниже, в Главе 5.

4.1.2. Описание пространственно-временной структуры поверхностного волнения

Пространственно-временная структура поверхностного волнения изменяется случайным образом под воздействием многих естественных факторов естественного и антропогенного происхождения [109]. Для компактного представления информации о структуре поверхностного волнения и её изменениях под влиянием различных процессов, целесообразно использовать пространственные и частотные спектры морских волн, характеризующие распределение волновой энергии по длинам волн [109, 141]. Рассмотрим подход к исследованию пространственных спектров морской поверхности (МП) [76, 77, 141]. Поскольку возвышения взволнованной поверхности моря изменяются от координат и времени, будем использовать в дальнейшем изложении для описания МП понятие *поля*. Поле — случайная функция от нескольких переменных (координат и времени).

Взволнованная морская поверхность представляет собой *поле возвышений* (волновых аппликат)

$$z = \zeta(x, y, t), \quad (4.1)$$

где (x, y, t) — прямоугольная декартова система координат, в которой плоскость (x, y) совпадает с уровнем спокойной (невзволнанной) водной поверхности; t — время. Фиксируя (4.1) в момент времени $t = t_0$, получим двумерную случайную функцию

$$z = \xi(x, y) = \zeta(x, y, t)|_{t=t_0}. \quad (4.2)$$

При изучении поверхностного волнения с использованием оптических изображений регистрируются характеристики МП, соответствующие фиксированному

моменту времени. Поэтому в настоящей работе будет рассматриваться представление волнения именно в форме (4.2).

Поле яркости МП, регистрируемое на оптическом изображении, формируется в результате отражения и преломления света по законам геометрической оптики, как будет рассмотрено ниже. Поэтому [29, 111] структуру морской поверхности наряду с полем возвышений $\xi(x, y)$ удобно характеризовать *полями уклонов* (или градиентов) вдоль осей

$$\xi_\alpha(x, y) = \frac{\partial \xi(x, y)}{\partial \alpha}, \quad \alpha = x, y. \quad (4.3)$$

Поле уклонов (градиентов) морской поверхности в произвольном направлении φ с учётом (4.3) можно выразить как

$$\beta_\varphi(x, y) = \xi_x(x, y) \cos \varphi + \xi_y(x, y) \sin \varphi. \quad (4.4)$$

Учитывая свойства преобразования Фурье, можно связать энергетический спектр поля уклонов (4.4) с энергетическим спектром $\Psi(\mathbf{k})$ поля возвышений $\xi(x, y)$ [111]:

$$\Phi_\varphi(\mathbf{k}) = (k_x \cos \varphi + k_y \sin \varphi)^2 \Psi(\mathbf{k}). \quad (4.5)$$

где k_x, k_y — волновые числа (циклические пространственные частоты), компоненты волнового вектора $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$;

φ — азимутальный угол среднего градиента яркости МП [111].

Соотношение (4.5) может быть использовано для восстановления спектра возвышений $\Psi(\mathbf{k})$, если спектр уклонов измерен экспериментально, например по данным, извлекаемым из аэрокосмического изображения:

$$\Psi(\mathbf{k}) = \Phi_\varphi(\mathbf{k}) (k_x \cos \varphi + k_y \sin \varphi)^{-2}. \quad (4.6)$$

Однако соотношение (4.6) восстанавливает спектр возвышений не при всех значениях \mathbf{k} , поскольку при

$$k_x/k_y = -\operatorname{tg}(\varphi), \quad (4.7)$$

то есть для направления, перпендикулярного азимутальному углу среднего градиента яркости МП, выражение $(k_x \cos \varphi + k_y \sin \varphi)^2$ обращается в нуль. Поэтому в окрестности прямой (4.7) в спектре уклонов имеет место дефицит информации о спектре возвышений МП. Для полного восстановления спектра $\Psi(\mathbf{k})$ применяется многопозиционный метод [36, 111]. В соответствии с этим методом в пределах изображения выделяются M ($M \geq 2$) фрагментов, по которым могут быть восстановлены спектры уклонов, соответствующие разным ориентациям градиента.

При пространственной стационарности волнения выделенным фрагментам соответствует один и тот же спектр возвышений $\Psi(\mathbf{k})$ что позволяет записать систему из M уравнений

$$\Phi_m(\mathbf{k}) = (k_x \cos \varphi_m + k_y \sin \varphi_m)^2 \Psi(\mathbf{k}), \quad m = \overline{1, M}. \quad (4.8)$$

Из этой системы можно определить искомый спектр

$$\Psi(\mathbf{k}) = \frac{\sum_{m=1}^M \Phi_m(\mathbf{k})}{\sum_{m=1}^M (k_x \cos \varphi_m + k_y \sin \varphi_m)^2}. \quad (4.9)$$

Таким образом, для восстановления двумерного спектра возвышений морской поверхности необходимо иметь спектры уклонов для двух или более направлений.

Необходимую совокупность спектров уклонов можно получить различными способами:

- стереосъёмка, при которой одновременно регистрируются изображения с двух или более камер, имеющих различные направления визирования МП;
- обработка нескольких фрагментов изображений, получаемых при аэрофотосъёмке с широким углом визирования, в предположении о простран-

ственной стационарности волнения в пределах участка поверхности, захватываемого полем зрения камеры;

- обработка разновременной съёмки того же участка поверхности с различных ракурсов с использованием предположения о временной стационарности волнения.

При обработке одномоментного спутникового изображения не выполняется ни одно из перечисленных условий. Поэтому восстановление двумерного спектра возвышений морской поверхности возможно только частично — вне угловой окрестности прямой, определяемой условием (4.7).

Для получения спектров уклонов МП, будем искать восстанавливающий оператор \mathbf{R} , позволяющий перейти от спектра фрагмента оптического изображения $S(\mathbf{k})$ к спектру уклонов $\Phi(\mathbf{k})$:

$$\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}S(\mathbf{k}). \quad (4.10)$$

4.2. Анализ методов определения спектров волнения по оптическим изображениям

Поле яркости МП формируется в результате отражения от неё света, приходящего из верхней полусферы, и преломления на ней восходящего светового потока, образующегося при рассеянии света в водной толще [12]. При этом яркость каждого элемента МП определённым образом связана с её уклонами (4.3). Сигналы, регистрируемые на оптическом изображении, связаны с полем яркости передаточной характеристикой регистрирующей аппаратуры и, следовательно, также содержат информацию об уклонах поверхности в диапазоне пространственных частот, определяемом пространственным разрешением и полем зрения аппаратуры [15, 98, 122, 150, 363].

Функция, связывающая уклоны элемента МП с его яркостью, в ряде ситуаций освещения бывает неоднозначной, т. е. определённым значениям яркости

могут соответствовать различные уклоны поверхности ξ_x, ξ_y . По этой причине при пространственном спектральном анализе МП не используется пересчёт значений сигнала на изображении в значения уклонов морской поверхности, а исследуется связь между интегральными характеристиками поверхности и изображения [36, 37, 111].

В первых работах, посвящённых определению двумерных спектров возвышений морской поверхности по оптическим изображениям, использовался метод стереофотосъёмки [77]. Синхронно регистрировались два изображения (стереопара) одного участка МП с двух разных точек зрения. Стереосъёмка может выполняться с двух летательных аппаратов, корабля, неподвижной измерительной платформы [7, 150, 363]. По полученным стереопарам на специальном устройстве (стереокомпаратore) определяются возвышения поверхности ξ в зависимости от координат x, y и делается оценка спектра возвышений $\Psi(\mathbf{k})$. Существенным недостатком метода стереофотосъёмки является трудоёмкость и малая производительность обработки стереопар, что не позволяет использовать этот метод для оперативной диагностики состояния морской поверхности. Следует отметить также технические трудности, возникающие вследствие необходимости синхронной регистрации изображений со значительным стереобазисом.

Более перспективны для оперативной диагностики состояния МП методы восстановления спектров волнения, использующие съёмку с одной позиции. В этих методах используются различные модельные представления об условиях формирования сигнала и, соответственно, разные приёмы его обработки. Известные методы измерения спектров МП по оптическим изображениям можно классифицировать следующим образом:

- восстановление спектров морской поверхности в предположении о пропорциональности регистрируемого сигнала уклонам морской поверхности (линейная модель сигнала) [14, 104];

- оценка нелинейных искажений спектров морской поверхности и выбор оптимальных условий съёмки [137, 185, 292];
- коррекция нелинейных искажений в зависимости от условий формирования изображения [12, 36, 38, 111, 112];
- оценка параметров спектров морской поверхности, в том числе энергетических характеристик волнения, по регистрируемым сигналам (в том числе по бликовой составляющей изображения) [98, 116, 122, 150, 262, 363].

Методы получения двумерных спектров волнения по изображениям, зарегистрированным из одной точки наблюдения, разработаны в [36, 37]. Остановимся подробнее на анализе основных известных методов восстановления спектров морской поверхности.

4.2.1. Методы восстановления спектров волнения на основе линейной модели формирования поля яркости

При изучении физического механизма формирования поля яркости морской поверхности получил распространение подход, согласно которому поверхность рассматривается как совокупность элементарных площадок (фацетов), отражающих и преломляющих свет в соответствии с законами геометрической оптики (фацетная модель морской поверхности [185, 292]). При таком подходе яркость элемента морской поверхности, с координатами (x, y) определяется уклонами поверхности в этой точке (4.3). Это позволяет представить рассматриваемый на изображении сигнал в виде [36, 111]

$$b(x, y) = L(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)), \quad (4.11)$$

где $L(x, y, \xi_x, \xi_y)$ — передаточная функция, зависящая от условий формирования поля яркости и характеристик регистрирующей аппаратуры.

В линейной модели формирования изображения МП функция $L(\xi_x, \xi_y)$ в каждой точке поверхности (x, y) раскладывается в ряд Тейлора по уклонам

ξ_x, ξ_y и отбрасываются члены разложения, имеющие порядок выше первого. Таким образом, сигнал представляется в виде линейной функции:

$$b(x, y) = L(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)) = \tilde{C}_0(x, y) + \sum_{\alpha=x,y} \tilde{C}_\alpha(x, y) \xi_\alpha(x, y), \quad (4.12)$$

где $\tilde{C}_\alpha(x, y)$, $\alpha = x, y$ — весовые функции, вид которых определяется условиями формирования сигнала, $\tilde{C}_0(x, y)$ — тренд сигнала, определяемый изменениями средней яркости МП в пределах поля зрения.

Методы учёта и устранения тренда сигнала достаточно хорошо развиты (например, метод линейной регрессии). Кроме того, спектр составляющей $\tilde{C}_0(x, y)$ локализован в низких пространственных частотах. В частности, при $\tilde{C}_0 = const$ он пропорционален δ -функции волновой поверхности. Сделанные допущения позволяют представить сигнал в виде

$$b(x, y) = \sum_{\alpha=x,y} C_\alpha \xi_\alpha(x, y). \quad (4.13)$$

Спектр сигнала (4.13) $\mathbf{S}[b](\mathbf{k})$ связан со спектром возвышений МП $\Psi(\mathbf{k}) = \mathbf{S}[\xi](\mathbf{k})$ соотношением

$$\hat{S}[b](\mathbf{k}) = (C_x k_x + C_y k_y)^2 \Psi(\mathbf{k}), \quad (4.14)$$

где \mathbf{S} — оператор спектральной плотности, преобразующий функцию пространственных координат (x, y) в функцию, описывающую распределение мощности сигнала в зависимости от волновых векторов $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$. Спектральная плотность представляет мощность, приходящуюся на единичную площадку в плоскости волновых чисел (циклических пространственных частот) k_x, k_y .

Это соотношение может быть использовано для восстановления спектра МП $\Psi(\mathbf{k})$ при всех значениях \mathbf{k} , за исключением прямой, определяемой уравнением 4.7

$$\frac{k_x}{k_y} = -\frac{C_y}{C_x = -\operatorname{tg}(\varphi_d)}. \quad (4.15)$$

Множитель $(C_x k_x + C_y k_y)^2$ стремится к нулю вблизи волнового азимута φ_d . Поэтому в окрестности прямой (4.15) в спектре изображения имеет место дефицит

информации о спектре возвышений МП. Для полного восстановления спектра $\Psi(\mathbf{k})$ применяется многопозиционный метод, основанный на соотношении (4.9). В пределах изображения выделяются M фрагментов $b^{(m)}(x, y)$, $m = 1, M$, допускающие представление вида (4.13) с коэффициентами $C_x^{(m)}$, $C_y^{(m)}$, $m = 1, M$. Этим фрагментам должны соответствовать различные условия формирования сигнала, а значит, разные ориентации градиента сигнала

$$\varphi_c^{(m)} = \operatorname{arctg} \left(\frac{C_y^{(m)}}{C_x^{(m)}} \right). \quad (4.16)$$

При пространственной стационарности волнения выделенным фрагментам соответствует один и тот же спектр возвышений морской поверхности $\Psi(\mathbf{k})$, что позволяет использовать соотношение (4.9).

Коэффициенты $C_x^{(m)}$, $C_y^{(m)}$, необходимые для восстановления спектра $\Psi(\mathbf{k})$ по формуле (4.9), можно определить различными способами [36, 111, 112]. Наиболее простой метод состоит в следующем. Сначала для спектров $S^{(m)}(\mathbf{k})$ определяются направления с минимальной интегральной энергией. Это позволяет рассчитать соотношение $C_y^{(m)}/C_x^{(m)}$ для каждого из фрагментов. Затем для каждого из фрагментов строятся одномерные разрезы спектров по различным направлениям, как это описано в разделе 1.3 (формула 1.14). Путём сопоставления разрезов спектров двух фрагментов определяется отношение $C_x^{(1)}/C_x^{(2)}$.

При этом один из коэффициентов $C_x^{(m)}$, $m = 1, \dots, M$ определяется из сопоставления с контактными данными, либо задается равным произвольной константе. В последнем случае спектр $\Psi(\mathbf{k})$ восстанавливается в относительных единицах измерения. Известен также способ определения коэффициентов $C_x^{(m)}$, $C_y^{(m)}$, предполагающий аппроксимацию фрагментов изображения линейными функциями, параметры которых служат для определения $C^{(m)}$. Недостатком рассмотренных методов является зависимость результата измерений от состояния волнения. Существуют методы определения величин $\varphi_C^{(m)}$, $C_x^{(m)}$, $C_y^{(m)}$ устраивающие этот недостаток.

4.2.2. Оценка искажений измеряемых спектров волнения нелинейностью условий формирования сигнала

Не ограничиваясь линейными членами, можно представить поле яркости в виде [36, 37]

$$b(x, y) = L(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)) + N(x, y, \xi_x(x, y)), \quad (4.17)$$

где N — нелинейная составляющая сигнала, содержащая члены, пропорциональные ξ_x^2 , ξ_y^2 , ξ_x^3 , ξ_y^3 и т. д. Из-за наличия составляющей N спектр изображения МП может сильно отличаться от его оценки, получаемой в линейной модели (4.13). Количественная оценка возникающих искажений спектров представляет сложную задачу. Аналитическое решения для реальных условий формирования изображений до настоящего времени не получено.

Для оценки нелинейных искажений спектров МП для функции N , ограниченной квадратичными членами разложения, использован изотропный равновесный спектр волнения вида $\Psi \sim k^{-4}$. Получена оценка сверху для отношения нелинейного слагаемого к линейному в спектре изображения в зависимости от коэффициентов при линейных и нелинейных членах разложения (4.17). Относительная погрешность оценки в спектрах уклонов морской поверхности возрастает с увеличением волнового числа k [111]. При съёмке в надир искажения спектров минимальны при зенитном угле Солнца 60° и составляют ≈ 1.2 для волн на воде метровой длины. С приближением Солнца к зениту искажения резко возрастают. Полученные результаты не могут быть использованы для восстановления спектров уклонов по спектрам изображения морской поверхности, так как оценки погрешностей сверху не передают реальной зависимости между $\Phi(\mathbf{k})$ и $S(\mathbf{k})$, а аналитический расчёт нелинейных искажений весьма сложен уже в квадратичном приближении функции N . Кроме того, сама квадратичная модель функции N является слишком грубым приближением, например в области солнечной дорожки, где наблюдается большое количество резких выбросов яркости (бликов) в точках зеркального отражения солнечного света.

Трудности, возникающие при аналитическом решении задачи, приводят к необходимости разработки численных методов оценки нелинейных искажений спектров морской поверхности. Численное моделирование двумерных полей уклонов и яркости морской поверхности впервые было выполнено в [185]. Моделирование включало синтез поверхности с заданным спектром, расчёт поля яркости при заданных условиях освещения и сопоставление спектра поля яркости со спектром поверхности. По результатам моделирования были определены геометрические параметры условий наблюдения, обеспечивающие минимальные нелинейные искажения (угол визирования 60° от вертикали, азимут визирования 135° относительно азимута Солнца при зенитном угле Солнца 45°). Однако даже при оптимальных условиях визирования искажения велики и превышают 3 дБ для $\approx 50\%$ всех анализируемых значений волнового вектора \mathbf{k} . Вместе с тем методики коррекции нелинейных искажений и восстановления спектров уклонов морской поверхности в работе [185] не предложено. Следует также отметить некоторые существенные недостатки описанных в указанной работе процедур численного моделирования изображений МП. Во-первых, при использовании фацетной модели морской поверхности не учитывалась шероховатость элементов поверхности, которая может заметно влиять на их яркость при солнечном освещении. Во-вторых, не был принят во внимание свет, рассеянный в водной толще, который может влиять на спектр изображения как за счёт вклада в функцию N , так и за счёт флюктуаций интенсивности света, вызванных двойной фокусировкой света, проходящего через водную поверхность и рассеивающегося в толще воды. Численный метод моделирования изображений и восстановления спектров МП, устраняющий перечисленные недостатки, получил развитие в серии работ [36, 37, 111, 112].

Можно сделать вывод, что вследствие отклонения условий формирования сигнала от линейной модели спектры изображений морской поверхности могут значительно отличаться по форме от спектров уклонов. В то же время методы восстановления спектров уклонов в нелинейной модели сигнала развиты в на-

стоящее время недостаточно. В качестве развития таких методов рассматривается численное моделирование изображений морской поверхности в нелинейных условиях формирования сигнала.

Интегральные и параметрические методы оценки спектров волнения

На практике часто используются методы оценки характеристик спектров морской поверхности, не использующие разложение сигнала в ряд по степеням уклонов и не привлекающие Фурье-анализ изображений. Сюда прежде всего следует отнести методы оценки интегральной характеристики спектра морской поверхности, дисперсии уклонов с использованием бликовой составляющей поля яркости. Метод применялся в работах [190, 357] для определения состояния волнения и приповерхностного ветра по аэрофотоснимкам.

Метод восстановления пространственных вариаций среднеквадратичного наклон морской поверхности по солнечному блику, регистрируемому оптическими сканерами из космоса, был разработан с использованием модели волнения морской поверхности [80, 122, 150, 262, 363]. Вариации среднеквадратичного наклона могут быть связаны с поверхностными проявлениями различных процессов, происходящих в верхнем слое океана, например, искусственными сликами, внутренними волнами, градиентами мезомасштабных течений и фронтальными разделами [109]. С этой точки зрения, предложенный метод может рассматриваться как определённый шаг в направлении развития методов диагностики состояния поверхности океана из космоса.

Алгоритм восстановления основан на линейной связи вариаций яркости солнечного блика и контрастов среднеквадратичного наклона. Эта связь осуществляется через передаточную функцию, которая зависит от пространственного распределения поля средней яркости солнечного блика. При построении модели и разработке алгоритма предполагается, что основной отклик морской поверхности на её возмущения того или иного происхождения, связан с усилением или подавлением среднеквадратичного наклона поверхности. В то же

время другие статистические моменты, нормированные на среднеквадратичный наклон, изменяются незначительно [80, 150, 363].

Это предположение основано на том факте, что несмотря на сильное подавление среднеквадратичного наклона в областях, покрытых сликами, коэффициенты анизотропии уклонов меняются незначительно. При наличии двумерного поля яркости, передаточная функция может быть определена «напрямую» по усреднённым градиентам яркости, непосредственно из двумерного поля яркости солнечного блика без априорного задания какой-либо модели плотности распределения вероятности. С точки зрения дистанционного зондирования спектры мелкомасштабного волнения также очень важны. Измерения солнечного блика впервые привели к надёжным результатам, касающимся статистики уклонов поверхности [153], которые позже были подтверждены спутниковыми наблюдениями [80, 259] и радиолокационными измерениями мелкомасштабных уклонов МП [168, 237]. В тех случаях, когда двумерное поле яркости недоступно, передаточная функция определяется на основе априорного задания модели плотности распределения вероятности. Показано, что вариации яркости блика, вызванные одними и теми же явлениями, бывают как положительными, так и отрицательными. Возникновение области смены знака контраста яркости (зоны инверсии контрастов) напрямую связано с геометрией формирования изображения солнечного блика. В этой зоне передаточная функция проходит через ноль.

4.3. Разработка методов и алгоритмов восстановления спектров морской поверхности по аэрокосмическим оптическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости

Настоящий раздел посвящён разработке методов и алгоритмов восстановления пространственных спектров морской поверхности по оптическим изобра-

жениям. Ниже описаны: разработанный нелинейный многопозиционный метод восстановления спектров возвышений; методика формирования спектров возвышений морской поверхности при малых вариациях ориентации градиента сигнала в пределах кадра; процедура построения операторов, восстанавливающих спектры уклонов МП; два новых метода определения ориентации градиента сигнала.

4.3.1. Нелинейная модель формирования поля яркости морской поверхности

При разработке математической модели регистрируемого на оптическом изображении поля яркости целесообразно разделить в нём составляющие, различным образом связанные с уклонами морской поверхности. В наиболее общем виде представим сигнал в виде функции от координат (x, y) и уклонов элементов поверхности f_x, f_y :

$$b(x, y) = f_b(x, y, f_x, f_y). \quad (4.18)$$

Для дальнейшего анализа представим сигнал в виде следующей суммы [37, 111]:

$$\begin{aligned} b(x, y) = & L(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)) + L_f(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)) + \\ & + N(x, y, \xi_x(x, y), \xi_y(x, y)), \end{aligned} \quad (4.19)$$

где L — составляющая с линейной зависимостью от уклонов морской поверхности ξ_x, ξ_y ; L_f — составляющая, формируемая флюктуационной составляющей поля яркости, связанной со световыми полями в верхней и нижней полусферах, интенсивность которых является случайной функцией координат x, y ; N — составляющая с нелинейной зависимостью от уклонов морской поверхности (члены, пропорциональные $\xi_x^2, \xi_y^2, \xi_x^3, \xi_y^3$ и т. д.).

Используя для линейной составляющей L представление (4.13) и заменяя весовые функции C_x, C_y постоянными коэффициентами C_x, C_y , а тренд C_0

нулём, запишем эту функцию в виде [111, 112]:

$$L(x, y) = C\beta_\varphi(x, y), \quad (4.20)$$

где $C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$, $\beta_\varphi(x, y)$ — поле уклонов морской поверхности в направлении

$$\varphi_C = \arctg(C_y/C_x), \quad (4.21)$$

$$\beta_\varphi(x, y) = \cos \varphi_C \xi_x(x, y) + \sin \varphi_C \xi_y(x, y). \quad (4.22)$$

Коэффициенты C , C_x , C_y и ориентация φ_C определяются условиями формирования изображения (характером освещения, положением светила на небосклоне, направлением визирования).

Составляющая $L_s(x, y, \xi_x, \xi_y)$ обусловлена флюктуациями интенсивности света, отражаемого и преломляемого на границе раздела вода-воздух. Как отмечено ранее, эта составляющая сигнала формируется в основном флюктуациями подводной освещённости и характеризуется сложной зависимостью от условий освещения, первичных гидрооптических характеристик, состояния волнения. Вклад в регистрируемый сигнал нелинейной составляющей $N(x, y, \xi_x, \xi_y)$ определяется рядом параметров условий освещения, состояния волнения, а также характеристиками регистрирующей аппаратуры.

Применяя к сигналу (4.19) оператор спектральной плотности S , пропорциональный квадрату модуля преобразования Фурье, получим следующее выражение для энергетического спектра (спектральной плотности) оптического изображения:

$$S(\mathbf{k}) = \mathbf{S}[L](\mathbf{k}) + \mathbf{S}[L_f](\mathbf{k}) + \mathbf{S}_m[L, L_f](\mathbf{k}) + S_N(\mathbf{k}), \quad (4.23)$$

где $\mathbf{S}[f]$ обозначает оператор спектральной плотности, примененный к функции f , а символом $S_N(k)$ обозначена сумма составляющих спектра изображения, связанных с нелинейной частью сигнала N :

$$S_N(k) = S[N](k) + S_m[L, N](k) + S_m[L_f, N](k). \quad (4.24)$$

Спектр линейной составляющей сигнала пропорционален спектру уклонов морской поверхности,

$$\mathbf{S}[L](k) = C^2 \Phi(k), \quad (4.25)$$

где Φ — спектр поля уклонов (4.22). Спектр флюктуационной составляющей $S[L]_f$ может быть определен при известных условиях съёмки.

Введем определение восстанавливающего оператора \mathbf{R} , позволяющего перейти от спектра оптического изображения $S(k)$, полученного при известных условиях формирования сигнала, к спектру уклонов морской поверхности $\Phi(\mathbf{k})$ в направлении, определяемом этими условиями:

$$\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R} S(\mathbf{k}). \quad (4.26)$$

При таком определении оператор \mathbf{R} зависит от многомерного вектора W_R , компонентами которого являются параметры условий получения оптического изображения, $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\mathbf{k}, W_R)$. В линейной модели сигнала, при $N = L_f = 0$, восстанавливающего оператора тождественно равен константе: $\mathbf{R} = C^{-2}$. Метод построения восстанавливающего оператора при произвольных условиях формирования оптического изображения рассматривается ниже в настоящей главе. Методы восстановления пространственно-спектральных характеристик поверхности по аэрокосмическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости основан на численном моделировании полей излучения, формируемых при отражении света морской поверхностью и преломления света, рассеянного в водной толще [3, 36, 111, 112]. При численном моделировании учитывается отражение и преломление света на границе раздела воздух-вода. Геометрическая схема, используемая при численных расчётах, показана на рис. 4.1. На этом рисунке показаны векторы единичной длины, используемые при расчётах:

\mathbf{r}_1 — указывает направление в верхней полусфере, откуда приходит свет, попадающий в приемник после отражения от морской поверхности;

\mathbf{r}_2 — указывают направление в нижней полусфере, из которого исходит свет, попадающий в приемник после преломления на морской поверхности;

- \mathbf{r}_\odot — направление на Солнце;
 \mathbf{r}_s — направление на приемник;
 ν — единичный вектор нормали к поверхности.

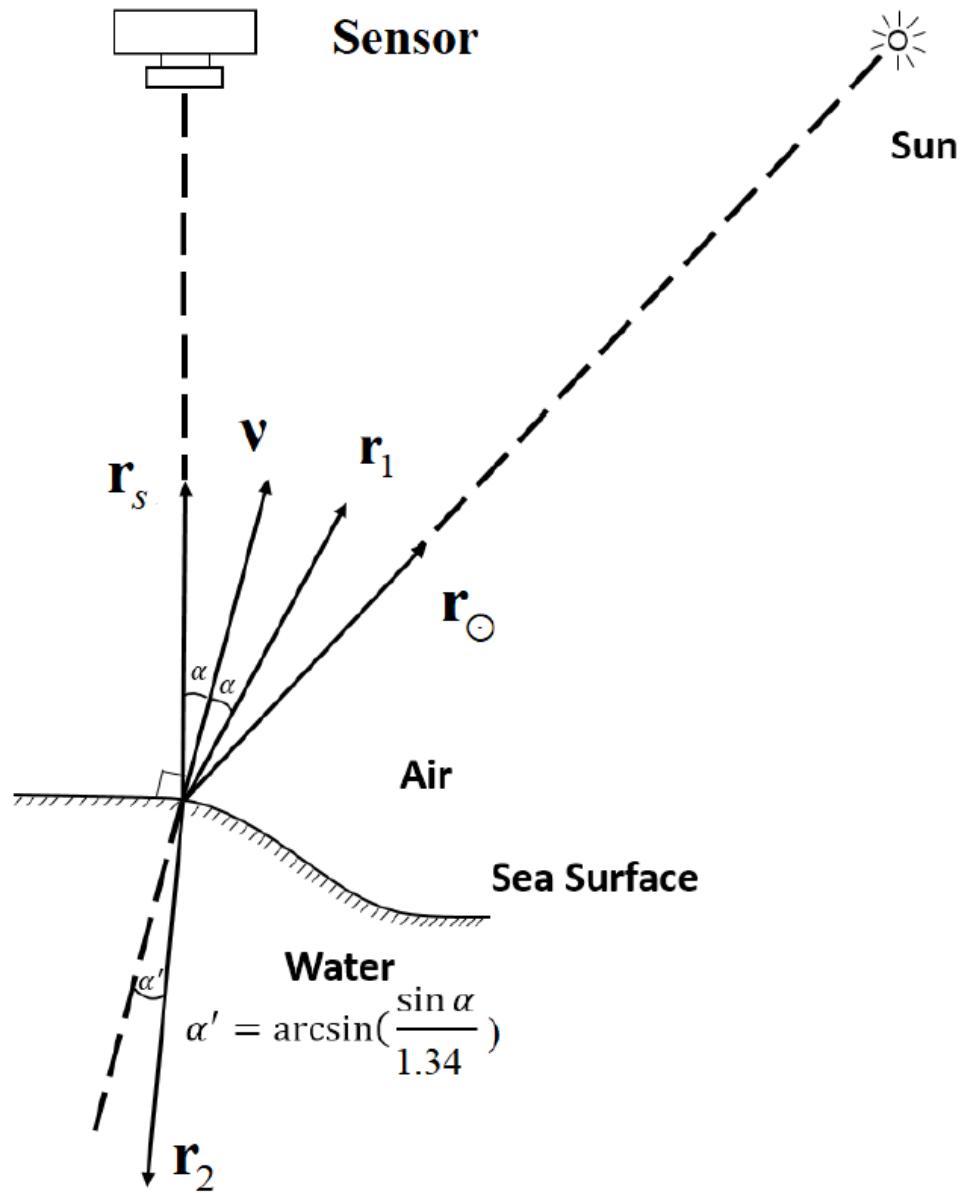


Рис. 4.1. Схема отражения и преломления света на границе раздела воздух-вода. Векторы единичной длины указывают направления в верхней и нижней полусферах, из которых исходит свет, попадающий в приемник после отражения и преломления

4.3.2. Многопозиционный метод восстановления спектров возвышений морской поверхности

Как показано в разделе 4.1, для восстановления спектров возвышений морской поверхности может использоваться многопозиционный метод, основанный на комбинировании спектров уклонов для нескольких направлений с использованием формулы 4.9.

Спектр поля возвышений МП $\Psi(\mathbf{k})$ связан со спектром изображения $S(\mathbf{k})$ соотношением:

$$\begin{aligned}\Psi(\mathbf{k}) &= \mathbf{R}S(\mathbf{k})/\gamma(\mathbf{k}), \\ \gamma(\mathbf{k}) &= (k_x \cos \varphi_C + k_y \sin \varphi_C)^2.\end{aligned}\tag{4.27}$$

Рассмотрим возможности определения $\Psi(\mathbf{k})$ по $S(\mathbf{k})$ и параметрам условий \mathbf{W}_R . Выражение (4.27) обращается в ноль на прямой $k_x = -k_y \operatorname{tg} \varphi_C$ в плоскости волновых векторов. Это ведёт к невозможности полного восстановления спектра возвышений МП $\Psi(\mathbf{k})$ по спектру изображения $S(\mathbf{k})$ из-за особенности в знаменателе.

Для полного восстановления спектра возвышений морской поверхности необходимо использовать несколько спектров уклонов морской поверхности $\Phi^{(m)}(\mathbf{k})$, $m = 1, \dots, M$, ($M \geq 2$), соответствующих разным ориентациям $\varphi_C^{(m)}$. Такие спектры могут быть восстановлены по спектрам разных фрагментов оптического изображения, соответствующим разным условиям:

$$\Phi^{(m)}(\mathbf{k}) = R(\mathbf{k}, \mathbf{W}_R^{(m)}) S^{(m)}(\mathbf{k}).\tag{4.28}$$

Запишем M уравнений, связывающих спектры $\Phi^{(m)}$ со спектрами возвышений участков морской поверхности [295]:

$$\Phi^{(m)}(\mathbf{k}) = \gamma^{(m)}(\mathbf{k}) \Psi^{(m)}(\mathbf{k}), \quad m = 1, \dots, M,\tag{4.29}$$

Предположим, что всем спектрам уклонов $\Phi^{(m)}$ соответствует один и тот же спектр возвышений, $\Psi^{(m)}(\mathbf{k}) = \Psi(\mathbf{k})$ для всех m .

Такое возможно либо в предположении о пространственной стационарности волнения, либо в том случае, когда обрабатывается несколько оптических изображений одного участка МП, полученных с разных точек наблюдения (например, стереопара). Просуммировав все уравнения (4.29) и используя введенный выше восстанавливающий оператор \mathbf{R} , получим:

$$\Psi(\mathbf{k}) = \frac{\sum_{m=1}^M \mathbf{R}^{(m)} S^{(m)}(\mathbf{k})}{\sum_{m=1}^M \gamma^{(m)}(\mathbf{k})}, \quad (4.30)$$

где

$$\gamma^{(m)}(\mathbf{k}) = (\cos \varphi_C^{(m)} k_x + \sin \varphi_C^{(m)} k_y)^2. \quad (4.31)$$

Переводя функции $\gamma^{(m)}$ в полярные координаты (k, φ) , можно представить (4.30) в виде

$$\Psi(\mathbf{k}) = \frac{\sum_{m=1}^M \mathbf{R}^{(m)} S^{(m)}(\mathbf{k})}{k^2 \sum_{m=1}^M \cos^2(\varphi - \varphi^{(m)})}. \quad (4.32)$$

Рассмотрим ситуацию, когда спектры возвышений разных участков $\Psi^{(m)}$ различны. В этом случае в результате решения системы уравнений (4.29) может быть получена некоторая усреднённая оценка спектра возвышений по M фрагментам. Проанализируем возможность восстановления среднего арифметического спектра возвышений по M участкам морской поверхности

$$\langle \Psi(\mathbf{k}) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \Psi^{(m)}(\mathbf{k}). \quad (4.33)$$

Пусть

$$\Psi^{(m)}(\mathbf{k}) = \langle \Psi(\mathbf{k}) \rangle + \delta \Psi^{(m)}(\mathbf{k}). \quad (4.34)$$

Тогда выражение (4.30) можно записать в виде

$$\langle \Psi(\mathbf{k}) \rangle = \frac{\sum_{m=1}^M \mathbf{R}^{(m)} S^{(m)}(\mathbf{k}) - \sum_{m=1}^M \gamma^{(m)}(\mathbf{k}) \delta \Psi^{(m)}(\mathbf{k})}{\sum_{m=1}^M \gamma^{(m)}(\mathbf{k})}. \quad (4.35)$$

При увеличении числа используемых фрагментов M возмущения спектров $\delta \Psi^{(m)}$ скомпенсируют друг друга в (4.35) и формула сведётся к виду (4.30), если возмущения изотропны, т.е. зависят только от $|\mathbf{k}|$. Таким образом формула (4.30)

позволяет восстанавливать средние спектры возвышений МП, если возмущения спектра возвышений, равномерно распределены по азимуту.

Рассмотрим возможность получения оценки среднего арифметического спектра возвышений фрагментов в случае, когда возмущения $\delta\Psi^{(m)}$ неизотропны. Для этого введём оценки спектра возвышений вида

$$\Psi_\varepsilon^{(m)}(\mathbf{k}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta\varphi^{(m)} = \left| \arctan\left(\frac{k_x}{k_y}\right) - \varphi^{(m)} \right| \leq \varepsilon^{(m)}, \\ \frac{\Phi(\mathbf{k})}{\gamma^{(m)}(\mathbf{k})}, & \text{если } \Delta\varphi^{(m)} > \varepsilon^{(m)}; \end{cases} \quad (4.36)$$

где $\varepsilon^{(m)}$ — величины, связанные с погрешностями исходных данных, и определим среднюю арифметическую оценку

$$\langle \Psi_\varepsilon(\mathbf{k}) \rangle = (M_\varepsilon(\mathbf{k}))^{-1} \sum_{m=1}^M \Psi_\varepsilon(\mathbf{k}), \quad (4.37)$$

где $M_\varepsilon(\mathbf{k})$ — количество фрагментов оптического изображения, для которых $\Psi_\varepsilon^{(m)}(\mathbf{k}) \neq 0$ при данном \mathbf{k} . Формула (4.37) позволяет определить для каждого \mathbf{k} средний спектр возвышений по фрагментам, в которых $\Delta\varphi^{(m)} > \varepsilon^{(m)}$.

Таким образом, для восстановления спектра возвышений МП, в оптическом изображении необходимо выделить $M \geq 2$ фрагментов, имеющих различные ориентации градиента среднего сигнала $\varphi_C^{(m)}$, определить для этих фрагментов ориентации $\varphi_C^{(m)}$ и восстанавливающий оператор $\mathbf{R}^{(m)}$, затем выполнить расчёт согласно (4.29) или (4.36), (4.37). Следует отметить, что вместо M фрагментов одного оптического изображения можно использовать M изображений морской поверхности, полученных при разных условиях визирования.

Пофрагментная оценка спектров возвышений морской поверхности

Методика восстановления спектра возвышений МП, изложенная выше, позволяет при съёмке с одной точки наблюдения получить спектр, усреднённый по пространственно разнесённым участкам морской поверхности, соответствующим оптическому изображению или фрагментам одного оптического изображения, имеющим различные ориентации градиента сигнала $\varphi_c^{(m)}$. Пространственное разнесение этих участков МП, необходимое для применения метода, может

быть значительным, сопоставимым с высотой съёмки. Зависимость ориентации φ_c от азимута визирования α_ν имеет точки, в которых $\partial\varphi_c/\partial\alpha_\nu = 0$. В окрестности этих точек ориентация φ_c практически не изменяется при изменении α_ν . Для получения разности ориентации $\Delta\varphi_c = \left| \varphi_c^{(1)} - \varphi_c^{(2)} \right| \sim 0.1$ в таких условиях нужно регистрировать оптическое изображение участков МП, отстоящих друг от друга на $\approx 50^\circ$ по азимуту визирования при направлении визирования 45° от вертикали. При высоте съёмки 1 км расстояние между этими участками составляет ≈ 1 км, что превышает характерные размеры большинства исследуемых областей проявлений антропогенного воздействия на морской поверхности.

При космическом мониторинге МП для исследования проявлений антропогенного воздействия необходима оценка спектров возвышений близко расположенных участков МП по изображениям, зарегистрированным приёмником с узким полем зрения. Для решения этой задачи предлагается следующая модификация многопозиционного метода.

Пусть изображения регистрируются сериями, по M изображений в каждой серии. Обозначим $b^{(m,j)}(x, y)$ — оптическое изображение с порядковым номером m в j -й серии, $S^{(m,j)}$ — его спектр, а $\varphi_c^{(m,j)}$ — ориентация градиента сигнала. С помощью восстанавливающих операторов $\mathbf{R}^{(m,j)}$ можно определить соответствующие спектры уклонов МП $\Phi^{(m,j)}(\mathbf{k}) = R^{(m,j)}S^{(m,j)}(\mathbf{k})$. Усреднённый спектр возвышений МП, рассчитанный для j -й серии изображений по формуле (4.30), обозначим $\Psi^{(j)}(\mathbf{k})$. Для каждого изображения j -й серии при $j \geq 2$ определим опорный спектр уклонов

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{ОП}}^{(m,j)}(\mathbf{k}) &= \gamma^{(m,j)}(\mathbf{k})\Psi^{(m,j)}(\mathbf{k}) , \\ \gamma_{\text{ОП}}^{(m,j)}(\mathbf{k}) &= \left(k \cos(\varphi - \varphi_{\text{соп}}^{(m,j)}) \right)^2 , \\ \varphi_{\text{соп}}^{(m,j)} &= \varphi_c^{(m,j)} + \pi/2 .\end{aligned}\tag{4.38}$$

Опорный спектр уклонов рассчитывается по усреднённому спектру возвышений предыдущей $(j-1)$ -й серии оптического изображения и имеет ориентацию $\varphi_{\text{соп}}$, отличающуюся от ориентации φ_c , соответствующей основному спектру, на 90° .

Оценка спектра возвышений участка морской поверхности, соответствующего m -му оптическому изображению j -й серии строится по формуле

$$\Psi^{(m,j)}(\mathbf{k}) = \frac{\Phi^{(m,j)}(\mathbf{k}) + \Phi_{\text{оп}}^{(m,j)}(\mathbf{k})}{2(\cos \varphi_c^{(m,j)} k_x)^2 + 2(\sin \varphi_c^{(m,j)} k_y)^2}, \quad (4.39)$$

которая следует из (4.29) при $M = 2$. Рассчитанный таким образом спектр представляет собой суперпозицию спектра уклонов, восстановленного по анализируемому оптическому изображению, и опорного спектра, полученного из спектра возвышений, усреднённого по предыдущей серии оптических изображений.

Предложенный метод предполагает, что число оптических изображений в серии достаточно велико, $M \gtrapprox 10$. Если характерный размер аномалий МП l_A близок к размеру мгновенного поля зрения l и в то же время $l_A \ll lM$, аномалии морской поверхности не окажут заметного влияния на усреднённые спектры возвышений $\Psi^{(j)}$, но будут проявляться в спектрах оптических изображений $S^{(m,j)}$, а следовательно и в оценках спектра возвышений МП $\Psi^{(m,j)}$. Таким образом, пространственное распределение информативных признаков спектров $\Psi^{(m,j)}$ должно адекватно отображать пространственную структуру аномалий МП с характерными размерами $l_A \approx l$.

Такой подход позволяет увеличить полосу обзора при дистанционном зондировании морской поверхности.

Методы расчёта ориентаций градиента сигнала при многопозиционном восстановлении спектров волнения Для восстановления спектра возвышений МП многопозиционным методом необходимо определить ориентации градиентов сигнала для используемых фрагментов изображений $\varphi_C^{(m)}$. Требования к методике определения этих ориентаций вытекают из особенностей решаемой задачи. Во-первых, по физическому смыслу величина $\varphi_C^{(m)}$ определяется условиями формирования изображений — направлением визирования участка поверхности и расположением источников света. Методика расчёта этой вели-

чины должна по возможности исключать зависимость получаемой оценки от характеристик волнения. Во-вторых, в реальных условиях часто возникает ситуация, когда разности между ориентациями $\varphi_C^{(m)}$ для различных фрагментов снимка невелики ($\approx 10^{-1}$ рад.). Поэтому методика определения $\varphi_C^{(m)}$ должна обеспечивать систематическую и случайную погрешности, малые в сравнении с этими разностями.

Рассмотрим с учётом сформулированных требований различные методы расчёта $\varphi_C^{(m)}$. Первый метод предполагает расчёт угловой зависимости интегральной спектральной энергии $E_r^{(m)}(\varphi)$ в заданном интервале волновых чисел. Ориентация $\varphi_C^{(m)}$ может быть определена по положениям минимума $\varphi_{\min}^{(m)}$ и максимума $\varphi_{\max}^{(m)}$ этой функции: $\varphi_c^{(m)} = \varphi_{\min}^{(m)} \pm \pi/2$ или $\varphi_c^{(m)} = \varphi_{\max}^{(m)}$. Достоинством такого подхода является то, что для расчёта $\varphi_C^{(m)}$ не требуется никакой дополнительной информации, кроме спектра изображений $S^{(m)}(k)$. Метод имеет ряд недостатков: зависимость оценки от спектра возвышений МП, сравнительно большая вычислительная сложность. Во втором методе анализируемые фрагменты оптического изображения аппроксимируются линейными функциями $b^m(x, y) = \lambda_c^{(m)} + \lambda_x^{(m)}x + \lambda_y^{(m)}y$. По их параметрам при известных условиях визирования можно рассчитать $C_x^{(m)}$, $C_y^{(m)}$ (например, при визировании в nadir $C_C^{(m)} = H\lambda_C^{(m)}$, $\alpha = x, y$, где H – высота съёмки), а затем по формуле (4.22) рассчитать $\varphi_c^{(m)}$. Данный метод даёт меньшую погрешность, хотя зависимость результата от состояния волнения сохраняется. Недостатком является также необходимость анализа исходных изображений, что затрудняет обработку при использовании оптических методов получения спектров $S^{(m)}$, например, в бортовой аппаратуре.

Рассмотрим подходы к расчёту φ_c , которые ранее не применялись при восстановлении спектров возвышений МП. Известно, что ориентация двумерной плоской фигуры может быть определена через её моменты относительно двух взаимно перпендикулярных осей, проходящих через центр масс. Определив двумерную фигуру спектра оптического изображения путём ограничения

спектральной плотности по порогу h как

$$S(\mathbf{k}) = \begin{cases} S(k) , & \text{если } S(\mathbf{k}) \geq h , \\ 0 , & S(\mathbf{k}) < h , \end{cases} \quad (4.40)$$

можно рассчитать ориентацию этой фигуры по формуле

$$\theta_s = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2I_{11}}{I_{02} - I_{20}} \right) , \quad (4.41)$$

где I_{ln} — моменты фигуры спектра порядка l, n :

$$I_{ln} = \int_{-\pi/\Delta_y}^{\pi/\Delta_y} \int_{-\pi/\Delta_x}^{\pi/\Delta_x} S_h(k) k_x^l k_y^n dk_x dk_y . \quad (4.42)$$

При изотропном спектре возвышений морской поверхности $\Psi(k)$ ориентация спектра оптического изображения θ_s совпадает с φ_c .

Известно, что спектр $\Psi(\mathbf{k})$, близок к изотропной форме в области высоких пространственных частот (коротких длин волн), а именно, при выполнении условия

$$\tilde{k} = k/k_m \gg 1, \quad (4.43)$$

где k_m — волновое число, соответствующее спектральному максимуму волнения. Поэтому величину θ_s можно использовать для оценки ориентации градиента сигнала φ_C . Преимущество этого метода расчёта φ_C заключается в уменьшении случайной погрешности оценок вследствие интегрирования по всему двумерному спектру в (4.42) и в обработке изображений только в частотной области. Недостатком метода является зависимость результата от состояния морской поверхности. Заметим, что эта зависимость используется при распознавании областей антропогенного воздействия на МП по спектрам изображений, где является существенным информативным признаком.

Представляют интерес методы расчёта $\varphi_C^{(m)}$, совсем исключающие зависимость результата от состояния МП. Используя общую модель сигнала 4.18,

запишем:

$$\begin{aligned} C_x^{(m)} &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon} \left(f_b(x_c^{(m)}, y_c^{(m)}, \varepsilon, 0) - f_b(x_c^{(m)}, y_c^{(m)}, 0, 0) \right), \\ C_y^{(m)} &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon} \left(f_b(x_c^{(m)}, y_c^{(m)}, 0, \varepsilon) - f_b(x_c^{(m)}, y_c^{(m)}, 0, 0) \right), \end{aligned} \quad (4.44)$$

где $x_c^{(m)}, y_c^{(m)}$ — координаты центра m -го фрагмента оптического изображения.

Выражения (4.44) для функции f_b произвольного вида могут быть рассчитаны численно с учётом вклада в них различных физических процессов (как указано ранее).

При известных $C_x^{(m)}, C_y^{(m)}$ можно рассчитать $\varphi_c^{(m)}$ по формуле (4.21). Дан- ный подход позволяет рассчитать $\varphi_c^{(m)}$ только из условий формирования опти- ческого изображения, независимо от состояния волнения.

Хотя численное моделирование с использованием 4.18 позволяет опреде- лить ориентации $\varphi_c^{(m)}$ при произвольных условиях формирования оптическо- го изображения, целесообразно разработать простые методики аналитической оценки этих величин для некоторых характерных условий. В соответствии с (4.22) величина $\varphi_c^{(m)}$ определяет направление нормали к изолиниям средней яр- кости морской поверхности в точке $(x_c^{(m)}, y_c^{(m)})$, поэтому для аналитической оценки $\varphi_c^{(m)}$ нужно аналитически описать эти изолинии. Опишем построение изодиний на основе углового распределение интенсивности света небосклона, формирующего поле яркости МП в результате отражения падающего света эле- ментами МП. Рассмотрим два типа освещения, для которых известны достаточ- но простые формулы, описывающие распределение интенсивности света небо- склона: диффузное освещение (сплошная облачность); солнечное освещение в безоблачный день.

При диффузном освещении МП, интенсивность падающего света монотон- но зависит от зенитного угла и не зависит от азимута визирования. Поэтому изолинии средней яркости морской поверхности представляют собой концен- трические окружности с центром в точке $x = y = 0$. Очевидно, что в этом

случае

$$\varphi_c^{(m)} = \begin{cases} \arctan\left(y_c^{(m)}/x_c^{(m)}\right), & \text{при } x_c^{(m)} \neq 0, \\ \pi/2, & \text{при } x_c^{(m)} = 0, y_c^{(m)} \neq 0. \end{cases} \quad (4.45)$$

При $x_c^{(m)} = y_c^{(m)} = 0$ ориентация $\varphi_C^{(m)}$ не определена ввиду неопределённости градиента средней яркости в этой точке.

Рассмотрим форму изолиний средней яркости в области солнечной дорожки в безоблачный день. Изображение МП в этой области содержит большое количество бликов, возникающих в точках прямого отражения от морской поверхности солнечного света. Яркость в бликах на несколько порядков превышает яркость тех элементов морской поверхности, где отражается рассеянный свет неба. Поэтому можно допустить, что средняя яркость морской поверхности в точке x_c, y_c пропорциональна плотности распределения уклонов $w(\xi_x, \xi_y)$ при ξ_x, ξ_y , удовлетворяющих условию попадания в приёмник отражённого света, идущего непосредственно от Солнца. В терминах единичных векторов, показанных на рис. 4.1 это условие имеет вид $\mathbf{r}_s + \mathbf{r}_\odot = 2(\mathbf{r}_\odot, \nu)$. Используя известные формулы геометрии, получим следующее выражение для изолиний средней яркости:

$$\left(\sin \theta_\odot - \frac{X}{\sqrt{H^2 + x^2 + y^2}}\right)^2 + \left(\frac{y^2}{(H^2 + x^2 + y^2)}\right) = 4 \cos^2 \theta_\odot s^2, \quad (4.46)$$

где θ_\odot — зенитный угол Солнца, $s^2 = \xi_x^2 + \xi_y^2$ описывает семейство изолиний в предположении, что ось Ox направлена по азимуту Солнца. Используя (4.46), можно рассчитать ориентацию градиента средней яркости φ_C . Ориентация φ_C не определена в центре солнечной дорожки, при $x = H \tan \theta_\odot, y = 0$.

Ниже приведено описание разработанного метода восстановления спектров уклонов морской поверхности, основанного на использовании нелинейной модели формирования изображений морской поверхности, описанной в разделе 4.3.1. Сначала описывается численный метод построения восстанавливающих операторов при заданных условиях формирования сигнала, а затем рассматривается адаптация восстанавливающих операторов к характеристикам спектра

волнения.

4.3.3. Построение восстанавливающих операторов при заданных условиях формирования сигнала

При построении операторов, восстанавливающих спектры уклонов МП, необходимо учесть все известные физические механизмы нелинейных искажений. Аналитические решения этой задачи до настоящего времени были получены только при существенных ограничениях [185, 292]. Получение более общего аналитического решения не представляется возможным, поскольку связь полей уклонов и яркости МП является существенно нелинейной. Поэтому целесообразно прибегнуть к прямому численному моделированию изображений МП и расчёту возникающих искажений спектров волнения [36, 111, 116].

Для получения восстанавливающих операторов численным методом выполняется следующая последовательность вычислительных операций:

- синтез двумерных случайных полей уклонов МП $\xi_\alpha(x, y)$, $\alpha = x, y$ при заданном спектре возвышений $G(k)$;
- расчёт поля яркости $B(x, y)$ для заданных условий освещения и визирования с учётом различных физических процессов;
- расчёт сигнала модельного изображения $b_m(x, y)$ по полю яркости $B(x, y)$ с учётом заданных характеристик регистрирующей аппаратуры и слоя атмосферы между поверхностью и приёмником.

Методика получения таких модельных изображений МП рассматривается ниже. Оператор \mathbf{R} определяется путём сопоставления спектра модельного оптического изображения $S_m(k)$ со спектром уклонов

$$\Phi_m(k) = (\cos \varphi_c k_x + \sin \varphi_c k_y)^2 G(k),$$

соответствующим направлению φ_c , определяемому заданными условиями освещения и визирования. Будем строить восстанавливающий оператор в виде пространственно-частотного фильтра [28, 38, 111, 112]

$$R(\mathbf{k}) = \Phi(\mathbf{k})/S(\mathbf{k}). \quad (4.47)$$

При таком определении восстанавливающего оператора восстановление спектра уклонов МП сводится к умножению спектра фрагмента изображения на фильтр $R(\mathbf{k})$. Эта операция в частотной области эквивалентна свёртке сигнала $b(x, y)$ с некоторой весовой функцией в пространственной области.

При численном моделировании изображений МП должны задаваться параметры, определяющие условия формирования этих изображений, и следовательно, в той или иной мере влияющие на вид восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k})$. При обработке реальных изображений МП эти параметры берутся непосредственно из условий получения оптического изображения. Возможны два способа получения восстанавливающего оператора с характеристиками, соответствующими реальным условиям при обработке экспериментальной информации. Первый способ предполагает непосредственное моделирование и построение восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ по описанной методике. Поскольку получение модельных оптических изображений МП является довольно трудоёмкой процедурой, такой способ получения $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ целесообразен лишь при обработке единичных изображений МП. При анализе больших объёмов информации предпочтительнее другой подход к определению восстанавливающего оператора. Он предполагает выполнение предварительного численного моделирования изображений морской поверхности при различных параметрах формирования изображения, объединённых в многомерный вектор \mathbf{W}_R . К этим параметрам в первую очередь относятся геометрические параметры, определяющие положение Солнца на небосклоне (зенитный угол и азимут) и направление визирования участка морской поверхности [28, 38, 111, 112]. При каждом конкретном \mathbf{W}_R восстанавливающий фильтр $R(\mathbf{k})$ аппроксимируется аналитической формулой

$R(\mathbf{k}) = R(\mathbf{k}, \mathbf{a})$, связанной с некоторым набором параметров аппроксимации, подбираемым эмпирически и обозначенным многомерным вектором \mathbf{a} . Компоненты вектора \mathbf{a} описывают зависимость нелинейных искажений от волнового числа k и волнового азимута ϕ . В результате предварительного численного моделирования при различных наборах параметров, входящих в W_R , строится зависимость $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$. В процессе обработки экспериментальной информации для каждого изображения (или его фрагмента) определяется \mathbf{W}_R , затем рассчитывается $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$ и строится восстанавливающий оператор $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ в виде аналитической функции. Поскольку число параметров, участвующих в формировании изображений морской поверхности, довольно велико, актуальна задача сокращения размерности вектора \mathbf{W}_R . Эта задача также решается на этапе предварительного моделирования путём исследования влияния изменения j -й компоненты $(\mathbf{W}_R)_j$ на характеристики восстанавливающего фильтра $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$.

Это влияние оценивается параметрами

$$t_j = (\partial T / \partial (W_R)_j)(W_R)_j, \quad \chi_j = (\partial \mathbf{a} / \partial (w_R)_j)(W_R)_j,$$

где T — интегральный коэффициент нелинейных искажений,

$$T = C^{-2} \frac{\iint S_M(\mathbf{k}) d\mathbf{k}}{\iint G(\mathbf{k}) d\mathbf{k}}. \quad (4.48)$$

Параметр, входящий в \mathbf{W}_R с индексом j можно исключить из рассмотрения, если $t_j \ll 1$, $\chi_j \ll 1$.

Аналитическую аппроксимацию восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ в полярных координатах (k, φ) можно представить, например, в виде степенной функции [28, 38, 112]

$$R(k, \varphi) = a_\alpha(\varphi) k^{a_p(\varphi)} \quad (4.49)$$

с множителем a_α и показателем a_p , зависящими от азимута φ . Такое представление отражает тот факт, что нелинейные искажения спектров уклонов МП имеют более выраженную зависимость от φ , чем от длины волны. С другой стороны, такое представление $R(k, \varphi)$ позволяет изучать искажения показателей

степенных спектров уклонов морской поверхности для различных направлений распространения волн.

4.3.4. Адаптация восстанавливающих операторов к характеристикам спектра волнения

Для восстановления спектра возвышений морской поверхности нелинейным многопозиционным методом, описанным выше, необходимы восстанавливающие операторы $\mathbf{R}^{(m)}$. Эти восстанавливающие операторы, зависят от ряда условий получения изображений, в том числе от характеристик самого спектра возвышений МП, который подлежит определению. Возникающая ситуация требует разработки специальных методов построения восстанавливающего оператора с последовательным уточнением условий, задаваемых при численном моделировании изображений морской поверхности. Таким образом, необходимо решить задачу адаптации восстанавливающего оператора к условиям получения изображений.

Представим многомерный вектор параметров $\mathbf{W}_R^{(m)}$ в виде

$$\mathbf{W}_R^{(m)} = \left\{ \mathbf{W}_{R0}^{(m)}, \mathbf{W}_{RG}^{(m)} \right\},$$

где $\mathbf{W}_{RG}^{(m)}$ — совокупность параметров модельного спектра $G(\mathbf{k})$, задаваемого при определении восстанавливающего оператора $R(\mathbf{k})$, $\mathbf{W}_{RO}^{(m)}$ — остальные компоненты вектора \mathbf{W}_R . Восстановление спектра возвышений МП будем проводить последовательными итерациями. На первой итерации параметры в $\mathbf{W}_{RG}^{(m)}$ задаются равными некоторым усреднённым значениям $\mathbf{W}_{RG(1)}^{(m)}$, например, соответствующим аппроксимациям равновесного спектра возвышений МП. По этим параметрам определяются восстанавливающие операторы $R_{(1)}^{(m)}$ в первом приближении, и определяется первая оценка спектра возвышений морской поверхности $\Psi_{(1)}(\mathbf{k})$. Эта оценка используется для уточнения параметров модельного спектра и определения вектора $\mathbf{W}_{RG(2)}$. На второй итерации рассчитываются операторы $\mathbf{R}_{(2)}^{(m)}$ и восстанавливается спектр $\Psi_{(2)}(\mathbf{k})$. Таким образом итерацион-

ный процесс может быть продолжен дальше, на третью итерацию и т. д. Как правило, для устранения нелинейных искажений с практически приемлемой точностью бывает достаточно двух итераций восстановления [19, 58].

При уточнении параметров модельного спектра $\mathbf{W}_{RG(2)}$ по оценке спектра возвышений МП $\Psi_{(1)}$, полученной на первой итерации, важен выбор спектральной области, в которой нелинейные искажения спектра уклонов МП минимальны. Как известно, спектр возвышений МП при $\tilde{k} = k/k_m \gg 1$ близок к изотропной форме. Это позволяет использовать для оценки параметров спектра возвышений одномерные разрезы $F(k, \varphi) = \Psi(k \cos \varphi, k \sin \varphi)$, используя соотношение (1.14). При этом волновой азимут φ должен соответствовать направлению наименьших нелинейных искажений спектров волнения. Поскольку эти искажения минимальны при $\varphi = \varphi_c^{(m)}$, для определения параметров модельного спектра возвышений морской поверхности целесообразно использовать разрезы спектра $F(k, \varphi)$ при $\varphi \approx \varphi_o$, где φ_o — среднее значение ориентации сигнала в анализируемых фрагментах изображения. В качестве компонент вектора \mathbf{W}_{RG} можно использовать, например, параметры степенной аппроксимации разрезов спектра возвышений МП.

Таким образом, восстановление спектра возвышений МП с адаптацией восстанавливающего оператора к условиям волнообразования включает следующие операции:

1. определение \mathbf{W}_{RO} и задание $\mathbf{W}_{RG(1)}$;
2. расчёт $\mathbf{R}_{(1)}$ по \mathbf{W}_{RO} , $\mathbf{W}_{RG(1)}$;
3. оценка спектра возвышений МП $\Psi_{(1)}$ (1-я итерация);
4. расчёт φ_o и построение разрезов $F(k, \varphi)$;
5. уточнение параметров спектра, задание $\mathbf{W}_{RG(2)}$;
6. расчёт $R_{(2)}$ по \mathbf{W}_{RO} , $\mathbf{W}_{RG(2)}$;

7. восстановление спектра возвышений морской поверхности $\Psi_{(2)}$ (2-я итерация).

Блок-схема, иллюстрирующая структуру разработанного нелинейного многопозиционного метода восстановления спектров уклонов и возвышений МП с применением численного моделирования оптических изображений, показана на рис. 4.2.

4.3.5. Разработка комплекса алгоритмов восстановления спектров волнения по изображениям

Общая структура комплекса алгоритмов

Описанные ниже алгоритмы реализуют разработанные методы восстановления спектра возвышений МП, численного моделирования изображений морской поверхности при нелинейной модуляции сигнала уклонами морской поверхности, построения моделей возвышений фона и аномалий морской поверхности. Комплекс алгоритмов состоит из нескольких блоков, предназначенных для решения каждой конкретной задачи из числа рассмотренных в настоящей работе. Блок-схема, демонстрирующая логические связи между алгоритмами, показана на рис. 4.3. Структура каждого из этих блоков рассмотрена ниже.

Алгоритмы восстановления спектров волнения

Комплекс алгоритмов, реализующий нелинейный многопозиционный метод восстановления спектра возвышений морской поверхности по оптическим изображениям, имеет структуру, показанную на схеме рис. 4.4. Изображения или их фрагменты $b^{(m)}(x, y)$, $m = 1, \dots, M$ вводятся с внешнего устройства в блоке 4.2. В том же блоке вводятся параметры условий формирования оптического изображения (векторы $\mathbf{W}_R^{(m)}$), необходимые для определения восстанавливающего оператора $\mathbf{R}^{(m)}$. Спектры фрагментов оптического изображения

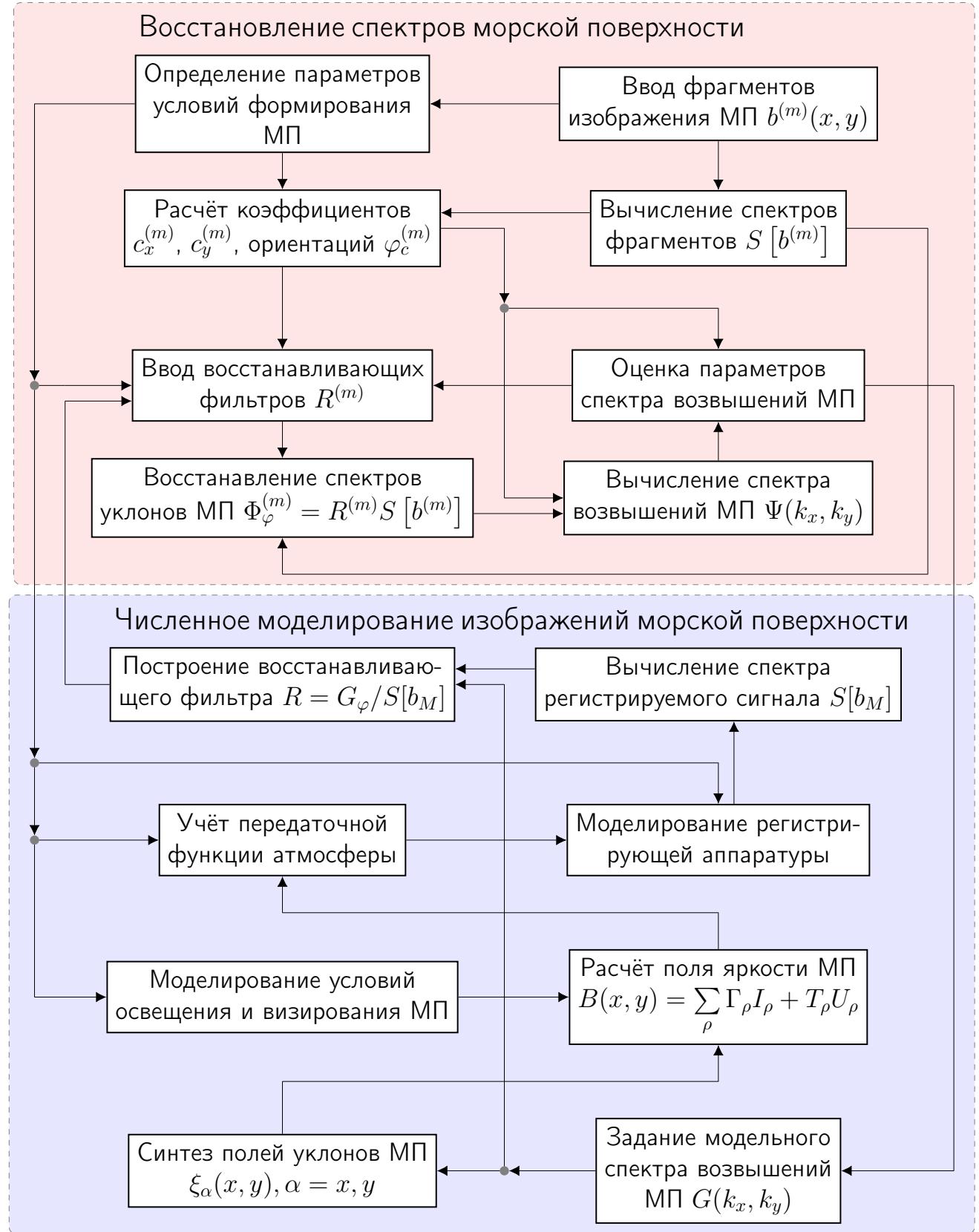
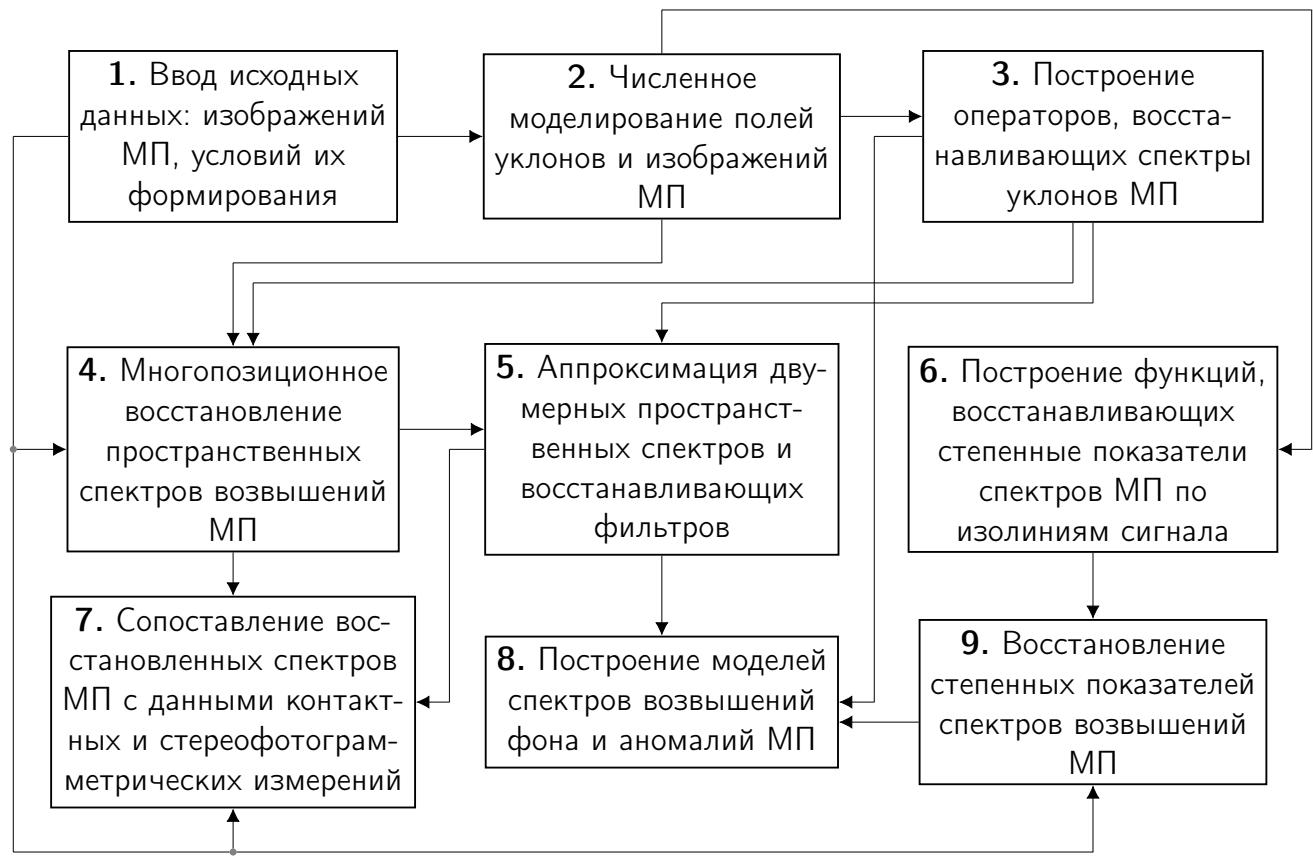


Рис. 4.2. Схема многопозиционного метода восстановления спектра возвышений МП и метода построения восстанавливающих операторов



$S^{(m)}(\mathbf{k})$ формируются в блоке 4.1 с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье [78]. Ориентации градиента сигнала $\varphi_C^{(m)}$ вычисляются в блоке 4.8 с использованием любого из известных методов (блоки 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8). Нормировка спектров фрагментов и расчёт вектора \mathbf{C} выполняются в блоке 4.9. Восстанавливающие операторы $\mathbf{R}^{(m)}(\mathbf{k}, \mathbf{a}(\mathbf{W}_R)^{(m)})$ для заданных условий формирования оптического изображения $\mathbf{W}_R^{(m)}$ формируются в блоке 4.12. В блоках 4.11, 4.12 восстанавливаются спектры уклонов $\Phi^{(m)}(\mathbf{k})$ и спектры возвышений морской поверхности $\Psi(\mathbf{k})$.

На рис. 4.5 показана блок-схема алгоритмов пофрагментного восстановления спектра возвышений морской поверхности. В блоке 4.13 вводятся серии оптических изображений морской поверхности $b^{(m,j)}$ и параметры условий их получения $\mathbf{W}_R^{(m,j)}$. Спектры изображений формируются в блоке 4.15, а спектры уклонов восстанавливаются в блоке 4.16 с использованием восстанавливающих

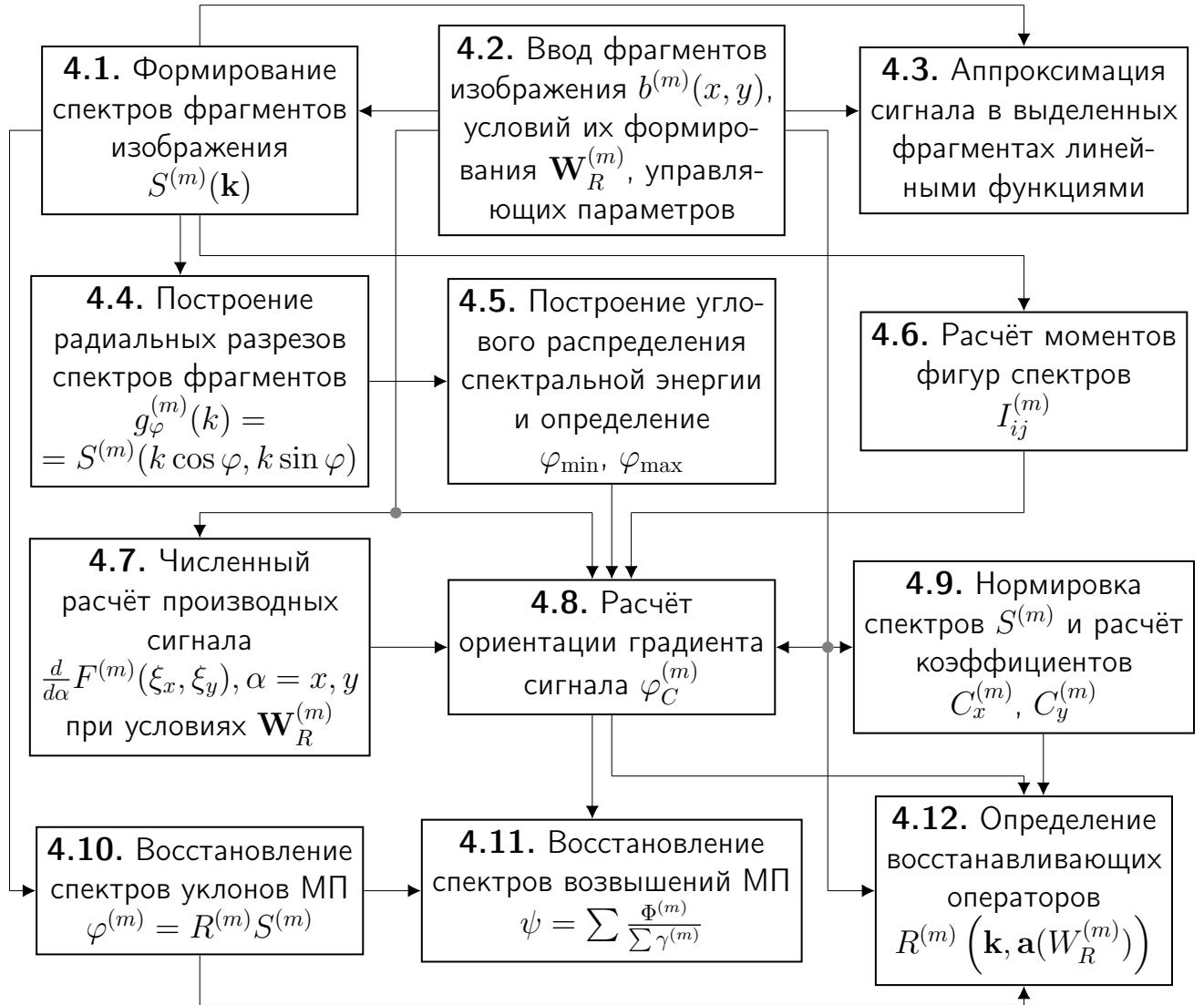


Рис. 4.4. Схема алгоритмов многопозиционного восстановления спектра возвышений МП

операторов $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a}(\mathbf{W}_R^{(m,j)}))$, формируемых в блоке 4.14. Усреднённый спектр возвышений МП j -й серии $\Psi^{(j)}(\mathbf{k})$ рассчитывается в блоке 4.18. Опорные спектры уклонов для j -й серии вычисляются в блоке 4.19 с использованием ориентации градиента сигнала, вводимых из блока 4.17, и усреднённого спектра возвышений МП предыдущей, $(j-1)$ -й серии. Пофрагментная оценка спектров возвышений МП по формуле (4.39) делается в блоке 4.20.

Алгоритмы построения восстанавливающих операторов

Для восстановления спектров возвышений МП необходимо определить вид восстанавливающего оператора $\mathbf{R}^{(m)}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ в зависимости от условий формиро-



Рис. 4.5. Блок-схема алгоритмов пофрагментного восстановления спектра возвышений морской поверхности (МП)

вания изображений $\mathbf{W}_R^{(m)}$.

На рис. 4.6 показана схема алгоритмов построения оператора $R(\mathbf{k}, \mathbf{a}(\mathbf{W}_R))$. В блоке 3.1 вводится модельное изображение $b_M(x, y)$ участка МП, имеющего спектр уклонов $G_\varphi(\mathbf{k})$, и вектор параметров \mathbf{W}_R , использованных при численном моделировании изображений. Восстанавливающий пространственно-частотный фильтр рассчитывается по формуле (4.47) в блоке 3.4 с использованием спектра модельного изображения $S_M(\mathbf{k})$ и вектора \mathbf{C} , рассчитанного в блоках 3.2, 3.3. На вход показанного на рисунке 4.6 комплекса алгоритмов поступает набор условий получения изображений в виде вектора условий \mathbf{W}_R , содержащего как параметры условий освещения и визирования морской поверхности, так и основные условия волнообразования. Результатом работы комплекса алгоритмов является набор параметров пространственно-частотного фильтра, позволяющий использовать его для восстановления пространственных спектров морско-



Рис. 4.6. Схема алгоритмов построения восстанавливающих операторов

го волнения по спектрам оптических изображений, полученных при условиях, полученных при наборе условий, входящих в \mathbf{W}_R .

Для параметризации восстанавливающего оператора использовалась степенная функция волнового числа с параметрами, зависящими от волнового азимута, в виде [38, 112]:

$$R(\mathbf{k}, \mathbf{a}) = a_0 (\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{-(a_1 + a_2 \cos(\varphi - \varphi_c))}. \quad (4.50)$$

Вектор параметров аппроксимации в данном случае состоит из четырёх компонент, а набор условий условий формирования поля яркости МП включает зенитный угол Солнца и пространственное разрешение изображения МП. Вектор параметров аппроксимации, зависящих от условий формирования поля яркости МП, имеющих различный физический смысл:

- a_1 — компенсирует нелинейные искажения показателя степенной функции спектра волнения для направления ϕ_C ;

- a_2 — определяет угловую зависимость показателя степенной функции спектра волнения;
- a_3 — определяет угловую зависимость спектральной энергии;
- a_0 — нормировочный коэффициент, пропорциональный коэффициенту $|\mathbf{C}|^{-2}$, используемому при линейной модуляции поля яркости уклонами поверхности.

Значения параметров аппроксимации a_1, a_2, a_3, a_4 , полученные методом численного моделирования, приведены в табл. 4.1 для трёх значений зенитного угла Солнца.

Таблица 4.1. Параметры аппроксимации восстанавливающего оператора, полученные методом численного моделирования при различных зенитных углах Солнца

Зенитный угол Солнца, град	Параметры аппроксимации			
	a_1	a_2	a_3	a_4
30	-0.58	0.36	0.77	1
45	-0.43	0.29	0.33	1
60	-0.37	0.26	0.17	1

Дальнейшее развитие параметризации восстанавливающего оператора возможно путём дополнения вектора **a** параметрами, учитывающими влияние длинных волн при развитом волнении на формирование поля яркости МП [28, 40, 176]. Методика построения модифицированного восстанавливающего оператора и его параметризация описаны ниже в разделе 4.4.1.

Таким образом, разработан метод дистанционного измерения пространственных спектров водной поверхности по оптическим изображениям с учётом нелинейной модуляции поля яркости, формируемого в естественных условиях освещения.

4.3.6. Пример применения алгоритмов восстановления спектров морской поверхности по космическим изображениям

Настоящий раздел посвящён примеру тестирования алгоритмов, реализующих разработанные методы восстановления характеристик границы раздела атмосфера-гидросфера. Описаны примеры применения описанных численных методов и алгоритмов для исследований в областях интенсивных антропогенных воздействий в Балтийском бассейне.

В соответствии с изложенной методикой, восстанавливающий оператор **R** строится как пространственно-частотный фильтр, получаемый при сопоставлении спектра уклонов морской поверхности, синтезированной численным методом, и спектра оптического изображения, полученного методом численного моделирования.

При построении восстанавливающего оператора заданы следующие основные параметры численного моделирования:

- морское волнение описывается пространственным спектром JONSWAP при скоростях ветра $4 \dots 10$ м/с [76, 236];
- пространственное разрешение на уровне морской поверхности составляло 1 м;
- условия освещения — солнечное освещение при безоблачном небе при зенитных углах Солнца от 30 до 60 градусов.

На рис. 4.7 показан пример модельного изображения МП, полученного при указанных условиях. Для формирования распределения яркости небосклона использовалась модифицированная функция Покровского [322]. Яркость небосклона, задаваемая этой функцией при зенитном угле Солнца 45° , показана на рис. 4.8, б. На рис. 4.8, б показана эффективная яркость небосклона, рассчитанная с учётом шероховатости морской поверхности при размере пикселя



Рис. 4.7. Пример синтезированного изображения морской поверхности, используемого при построении восстанавливающего оператора методом численного моделирования

$1 * 1 \text{ м}^2$ путём вычисления свёртки модифицированной функции Покровского [321, 322] с гауссовой функцией распределения уклонов морской поверхности в пределах одного пикселя [112, 176]. На диаграммах приведено распределение яркости небосклона в полярных координатах. Центр круга соответствует направлению в зенит, расстояние от центра круга характеризует изменение зенитного угла Солнца от 0° до 90° .

На рис. 4.9 показан пример построения восстанавливающего оператора методом численного моделирования.

Для восстанавливающего оператора использовалась степенная функция волнового числа с параметрами, зависящими от волнового азимута в виде (4.50).

Для тестирования разработанных методов и алгоритмов восстановления характеристик границы поверхностного волнения и приповерхностного слоя водной среды по космическим изображениям использовались экспериментальные данные, полученные в акваториях Балтийского моря, подвергающихся ин-

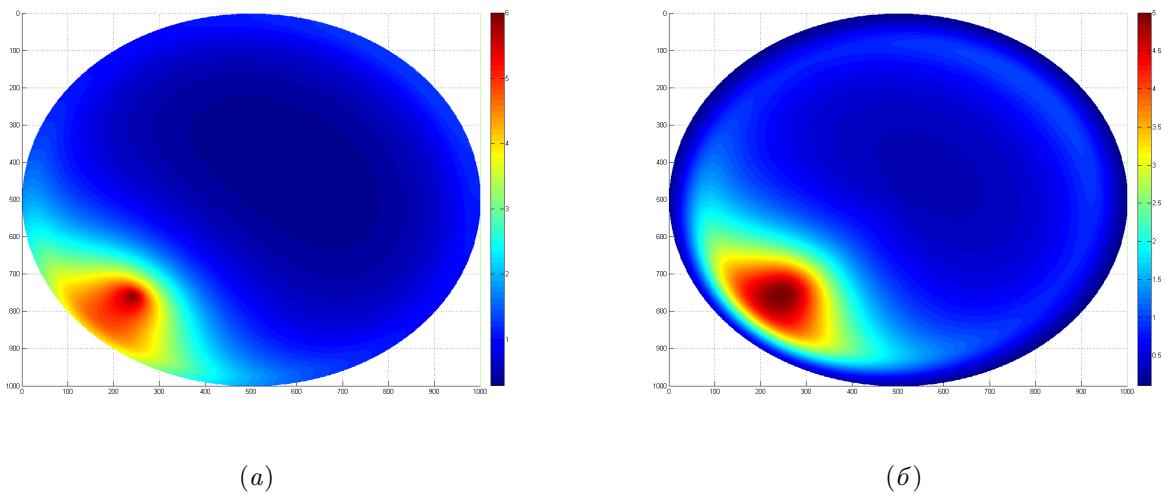


Рис. 4.8. Распределения яркости небосклона (в условных цветах) использованное при численном моделировании: (а) модифицированная функция Покровского ; (б) эффективная яркость небосклона, полученная путём свёртки с функцией распределения уклонов МП

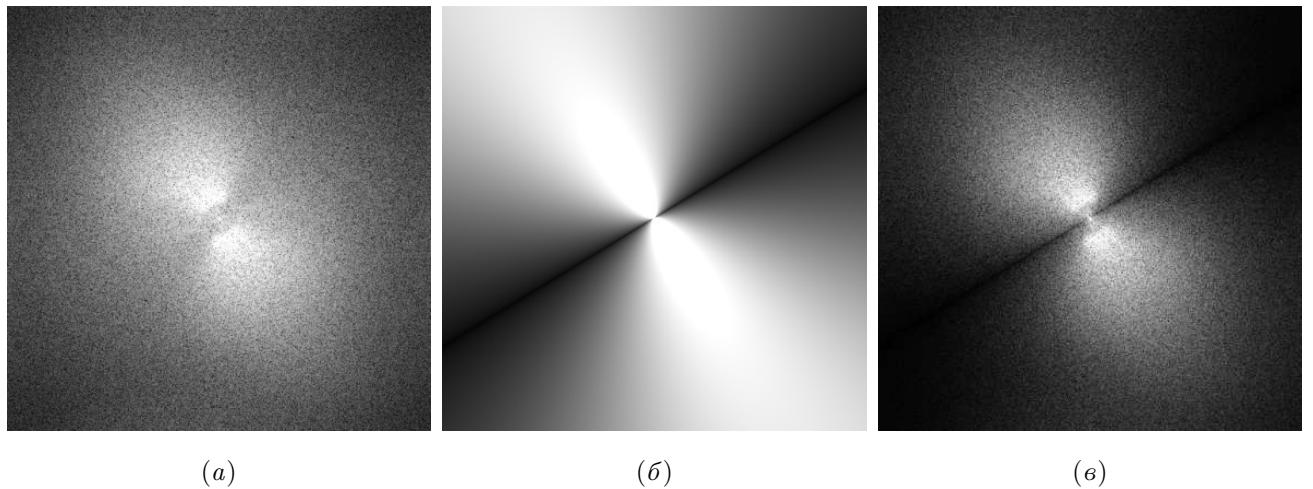


Рис. 4.9. Пример построения восстанавливающего оператора: (а) спектр фрагмента оптического изображения; (б) пространственно-частотный фильтр; (в) восстановленный спектр уклонов морской поверхности

тенсивным антропогенным воздействиям.

В качестве основной тестовой акватории была выбрана акватория морского торгового порта Усть-Луга на северо-западе России, в Ленинградской области в Лужской губе Финского залива Балтийского моря.

Пример тестового участка выбранной акватории показан на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Тестовый участок акватория морского торгового порта в Лужской губе Финского залива Балтийского моря

4.4. Восстановление двумерных спектров морского волнения по спектрам космических изображений в широком диапазоне частот

В настоящем разделе описывается метод восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических оптических изображений в широком диапазоне пространственных частот. Для исследования физических процессов на границе океан-атмосфера важное значение имеет восстановление спектрального максимума в низкочастотной области. Не менее важно восстановление спектра в интервале равновесия — спектральном интервале, в котором достигается энергетическое равновесия волн с ветром, если ветер дует устойчиво в течение длительного времени над большой акваторией [76, 141].

Приведём результаты экспериментальных исследований, выполненных с

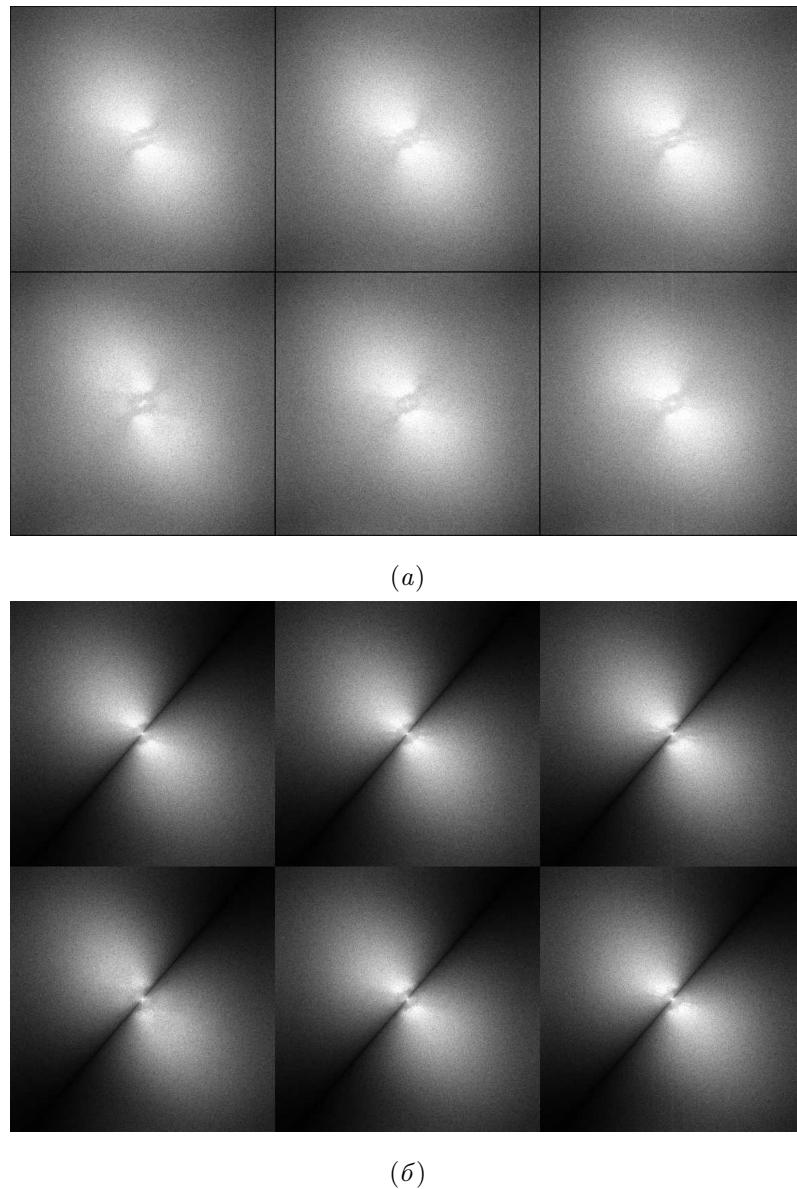


Рис. 4.11. Пример восстановления спектров волнения на тестовом участке акватории (см. рис.4.10): (а) пространственные спектры фрагментов космического изображения; (б) спектры уклонов МП, соответствующие выделенным на рис.4.10 фрагментам

применением разработанного метода. Для калибровки измерений разработанным методом используются контактные данные, получаемые при синхронных измерениях с помощью решётки струнных волнографов. В соответствии с разработанным методом, для восстановления двумерных пространственных спектров уклонов морской поверхности $\Phi(\mathbf{k})$ по спектрам оптических изображений $S(\mathbf{k})$, может использоваться пространственно-частотный фильтр, задаваемый параметрическим выражением (4.50).

Представление восстанавливающего оператора в виде (4.50) использовано для восстановления спектров поверхностного волнения по спектрам аэрокосмических изображений, а его адекватность экспериментально проверена в интервале равновесия с применением контактных данных, полученных волнографами, а также путём стереофотосъёмки с исследовательской платформы [7, 29, 36, 38, 178, 252].

Однако оператор, заданный в форме (4.50), не вполне приспособлен для восстановления спектров волнения в области низких пространственных частот и в районе спектрального максимума. Это связано с тем, что пространственно-частотный фильтр в этой форме предназначен для применения в области степенного спадания спектра волнения. Для устранения этого недостатка целесообразно развитие метода построения модифицированного восстанавливающего оператора и его апробация в различных условиях.

4.4.1. Метод построения модифицированного восстанавливающего оператора

Модифицированный восстанавливающий оператор \mathbf{R}_{mod} можно представить в виде суперпозиции двух пространственно-частотных фильтров

$$\mathbf{R}_{mod}(\mathbf{k}) = R_{low}(\mathbf{k})R_{high}(\mathbf{k}), \quad (4.51)$$

где R_{high} — восстанавливающие пространственно-частотные фильтры в области высоких и низких частот соответственно.

В качестве $R_{high}(\mathbf{k})$ будем использовать пространственно-частотный фильтр, параметризованный в виде (4.50).

Низкочастотную составляющую восстанавливающего фильтра $R_{low}(\mathbf{k})$ будем строить в виде эмпирической формулы [28]

$$R_{low}(k) = \exp(-\beta k^{-\alpha}), \quad (4.52)$$

где α, β — свободные настраиваемые параметры, которые в общем случае зависят от гидрометеорологических условий.

Для получения значений A, α, β используются данные о спектрах морского волнения, получаемые при контактных измерениях с помощью решётки струнных волнографов. При этом учитывается дисперсионное соотношение для гравитационных волн [76, 141]

$$\omega^2 = gk. \quad (4.53)$$

Пространственный спектр уклонов поверхностного волнения в высокочастотной ($k > k_0$) области получается путём применения восстанавливающего оператора в виде (4.50) к двумерному спектру аэрокосмического изображения [38].

Обозначим пространственный спектр уклонов морских волн в области низких частот, $\Phi_{low}(k)$, а соответствующий спектр изображения — $S_{low}(k)$. Записав выражение для $\Phi_{low}(k)$ в полярных координатах (k, ϕ) , где $\phi = \arctan(k_y/k_x)$ с учётом (4.52), получим [28]

$$\Phi_{low}(k, \varphi, k_o, \alpha, \beta) = S_{low}(k, \varphi, k_o)A \exp(\beta k^\alpha), \quad k \leq k_o, \quad (4.54)$$

где k_o — модуль вектора волновых чисел, условно разделяющий области действия операторов R_{low} и R_{high} .

Тогда спектр возвышений морской поверхности $\Psi(k)$ в области низких частот определяется по формуле

$$\Psi_{low}(k, \varphi, k_o, \alpha, \beta) = \frac{S_{low}(k, \varphi, k_o)A \exp(\beta k^\alpha)}{(k_x \cos \varphi_c + k_y \sin \varphi_c)^2}, \quad k \leq k_o. \quad (4.55)$$

Поскольку волнографом регистрируются одномерные частотные спектры $\psi^{\text{конт}}(\omega)$, то для калибровки двумерных спектров, получаемых по аэрокосмическим изображениям, необходимо сначала перейти к одномерному пространственному спектру

$$\chi(k) = \int \Psi(k, \varphi)k \, d\varphi. \quad (4.56)$$

Затем, воспользовавшись дисперсионным соотношением 4.53, и условием

равенства энергии в элементарном объёме $\psi(\omega)d\omega = \chi(k)dk$, перейти от одномерного пространственного спектра к частотному спектру

$$\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega) = \chi_{low}^{\text{дист}}(k) \frac{2\omega}{g}. \quad (4.57)$$

В качестве меры различия спектров, полученных дистанционным и контактным методом, используется функция

$$\delta(\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega), \psi_{low}^{\text{конт}}(\omega)) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega_i) - \psi_{low}^{\text{конт}}(\omega_i)}{\psi_{low}^{\text{конт}}(\omega_i)} \right)^2}, \quad (4.58)$$

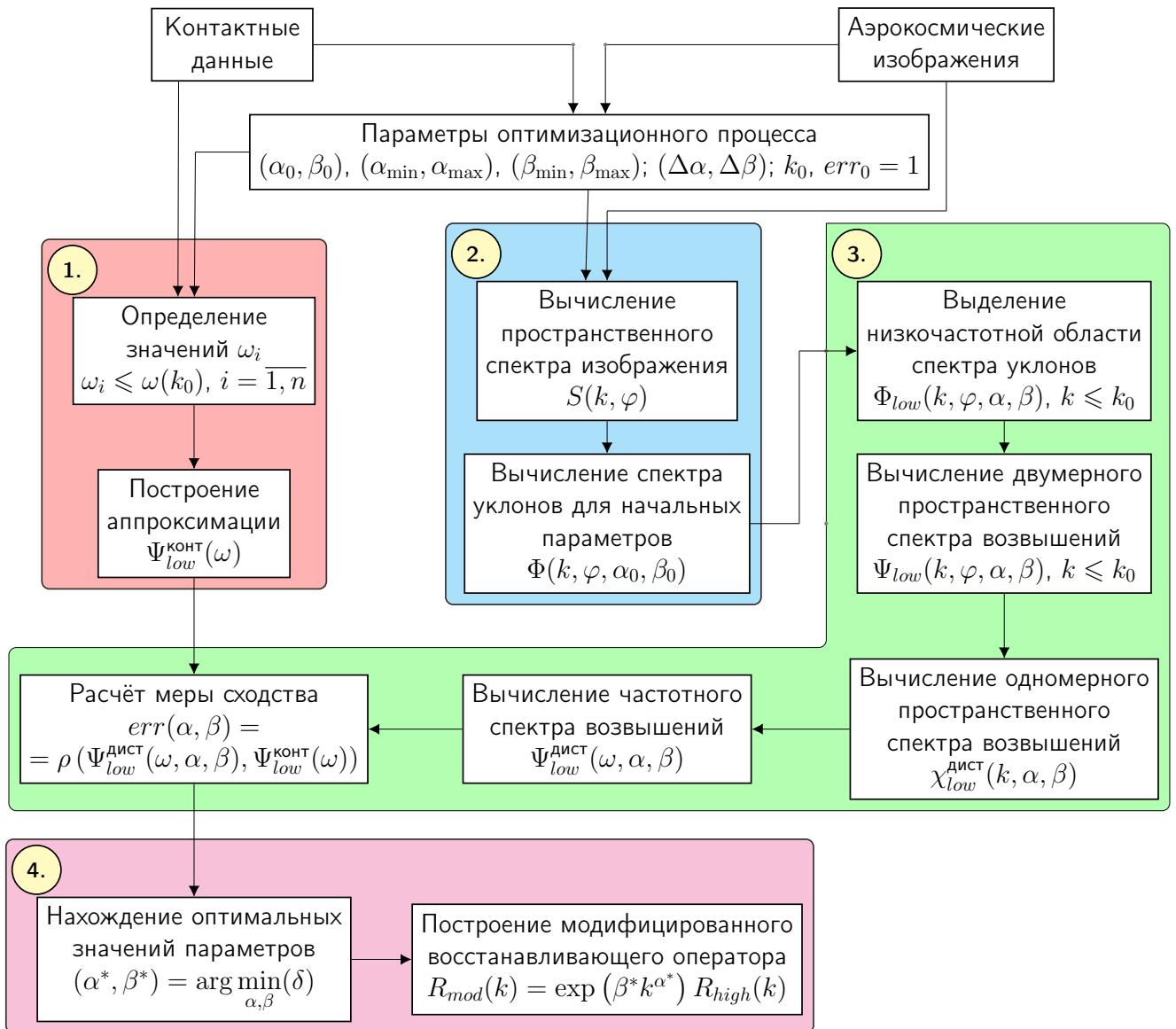
где ω_i , $i = \overline{1, n}$ — значения частоты по калибровочным данным; $\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega)$ и $\psi_{low}^{\text{конт}}(\omega)$ — частотные спектры, полученные на основе спутниковых и контактных данных.

Оптимальные значения параметров (α^*, β^*) находятся путём минимизации функции (4.58)

$$(\alpha^*, \beta^*) = \arg \min_{\alpha, \beta} \delta(\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega), \psi_{low}^{\text{конт}}(\omega)). \quad (4.59)$$

Опишем процедуру построения модифицированного восстанавливающего оператора (пространственно-частотного фильтра) $R_{mod}(\mathbf{k})$. В области высоких частот восстанавливающий оператор полностью определяется формулой (4.50), а в области низких частот он определяется формулой (4.51). При этом оптимальные значения параметров α^* , β^* могут быть вычислены в результате оптимизационного процесса, который может быть представлен в виде последовательности этапов. Блок-схема метода формирования модифицированного восстанавливающего оператора для получения спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений приведена на рис. 4.12. Для выполнения процедуры необходимы контактные данные, получаемые от решётки струнных волнографов, аэрокосмические оптические изображения, а также набор параметров оптимизационного процесса:

- начальные значения параметров (α_0, β_0) ;



- интервалы сходимости этих параметров $\alpha \in (\alpha_{min}, \alpha_{max})$, $\beta \in (\beta_{min}, \beta_{max})$;
- шаги дискретизации по параметрам $(\Delta\alpha, \Delta\beta)$;
- радиус граничной области низких частот k_0 ;
- начальное значение ошибки $err_0 = 1$.

На первом этапе процедуры реализации метода выполняются следующие операции (см. рис. 4.12):

1. по аэрокосмическому изображению определяются значения $\omega_i, i = \overline{1, n}$ для области низких частот;
2. производится аппроксимация данных, полученных при контактных измерениях частотного спектра волнения $\psi_{low}^{\text{конт}}(\omega)$ и вычисляются значения аппроксимирующей кривой в точках $\omega_i, i = \overline{1, n}$.

Эти значения используются на третьем этапе процедуры построения восстанавливающего оператора.

На вход второго этапа поступают: фрагменты аэрокосмических изображений МП и начальные значения параметров (α_0, β_0) . На этом этапе выполняются следующие операции:

1. вычисляется двумерный пространственный спектр аэрокосмического изображения $S(k, \varphi)$;
2. вычисляется начальная оценка спектра уклонов в области низких частот $\Phi(k, \varphi, \alpha_0, \beta_0)$ для начальных параметров (α_0, β_0) .

Эти характеристики используются на третьем этапе процедуры построения восстанавливающего оператора. Здесь выполняется перебор значений свободных параметров с заданными шагами в заданных диапазонах их изменения. При этом выполняются следующие операции:

1. На каждом шаге по формуле (4.54) вычисляется пространственный спектр уклонов для области низких частот $\Phi_{low}(k, \phi, \alpha, \beta)$.
2. По формуле (4.55) вычисляется двумерный пространственный спектр возвышений для области низких частот $\Psi_{low}(k, \phi, k_o \alpha, \beta)$.
3. По формуле (4.56) вычисляется одномерный пространственный спектр возвышений $\chi_{low}^{\text{дист}}(k, \alpha, \beta)$.

4. По формуле (4.57) вычисляется интегральный частотный спектр для области низких частот $\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega)$.
5. По формуле (4.58) рассчитывается мера различия спектров, построенных по результатам контактных измерений и по дистанционным данным $err = dist(\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega), \psi_{low}^{\text{конт}}(\omega))$.

В завершение третьего этапа проверяется условие остановки итерационного процесса $\alpha = \alpha_{max}$, $\beta = \beta_{max}$, соответствующее минимальному значению меры (4.58) различия спектров, полученных дистанционным и контактным методами. На четвёртом этапе процедуры построения восстанавливающего оператора определяются значения параметров (α^*, β^*) , которые минимизируют меру различия (4.58) между $\psi_{low}^{\text{дист}}(\omega_i)$ и $\psi_{low}^{\text{конт}}(\omega_i)$. Таким образом, модифицированный восстанавливающий оператор в форме пространственно-частотного фильтра может быть вычислен с учётом (4.50), (4.51), (4.52):

$$R(k) = a_0 (\exp(a_4 k^{a_5})) ((\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{a_1+a_2} \cos(\varphi - \varphi_c)), \quad (4.60)$$

где a — вектор параметров аппроксимации, зависящих от условий формирования поля яркости морской поверхности. Результаты экспериментального применения модифицированного восстанавливающего оператора подробно рассмотрены в Главе 5.

4.4.2. Восстановление углового распределения энергии волнения по одиночным спутниковым изображениям

Как показано в разделе 4.3.2, чтобы полностью восстановить пространственный спектр поля возвышений морских волн необходима информация о двух или более спектрах уклонов, соответствующих различным направлениям. Многопозиционный метод, включает одновременную обработку двух или более изображений, имеющих отличающиеся условия формирования поля яркости и,

как следствие, отличающиеся градиенты освещенности поверхности. При обработке одиночного спутникового изображения многопозиционный метод не может быть применен, поскольку высота съемки значительно превышает размер исследуемого участка поверхности и геометрические условия практически не изменяются в пределах такого изображения. В таких условиях двумерный спектр возвышений не удается полностью восстановить в пределах узкого углового сектора, где наблюдается дефицит информации о волнении [111, 171, 174, 176]. Поэтому для решения задачи применительно к дистанционному зондированию из космоса необходимо развитие методов, позволяющих обходить имеющиеся ограничения и определять угловое распределения энергии волн даже по одиночным спутниковым изображениям.

Блок-схема, иллюстрирующая предлагаемый метод дистанционного измерения углового распределения энергии по двумерным пространственным спектрам ветровых волн, восстанавливаемых по спектрам спутниковых изображений, приведена на рис. 4.13. Вычислительные операции предлагаемого метода условно разделены на блоки [27]: (1) подготовка данных, (2) расчет спектральной плотности уклонов и возвышений волн, (3) восстановление углового распределения энергии волн и оценка двумерного спектра возвышений. Операции подготовки данных (блок 1) включают выбор областей интереса на спутниковом изображении и расчет их пространственных спектров, а также формирование набора параметров восстанавливающего оператора с использованием метаданных спутникового изображения.

По подготовленным данным в блоке 2 выполняется восстановление спектров волнения с помощью восстанавливающего оператора, учитывающего нелинейную модуляцию поля яркости уклонами поверхности. Результатом операций блока 2 являются двумерные спектры уклонов и спектры возвышений при всех значениях волнового вектора, не попадающих в угловой сектор дефицита информации. В блоке 3 выполняется восстановление углового распределения энергии и двумерного спектра возвышений с использованием предлагаемого

развития метода, описание которого приведено ниже. Главным направлением развития метода является обеспечении возможности восстановления углового распределения энергии волн в двумерном спектре по одиночным спутниковым изображениям. Для этого используется подход, который применялся ранее при обработке частотно-направленных спектров волнения, определяемых по данным волнографов [171, 189, 201, 269].

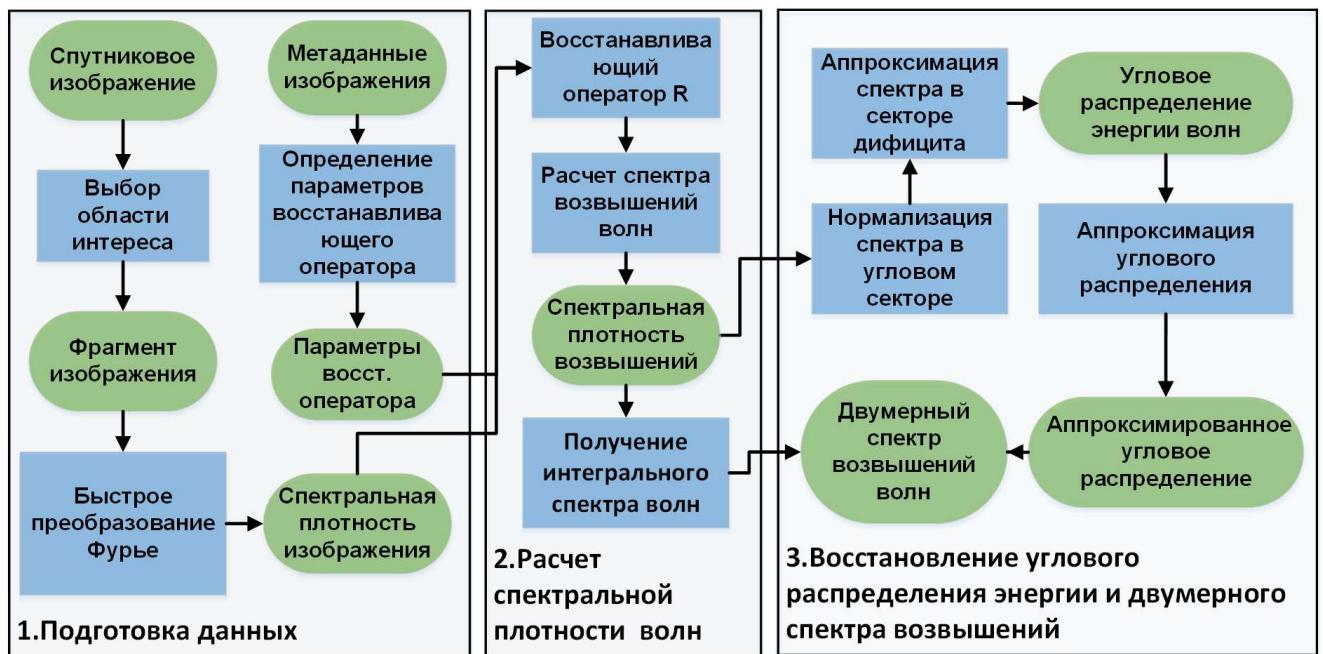


Рис. 4.13. Блок-схема метода дистанционного измерения углового распределения

Двумерный спектр волнения будем рассматривать в полярных координатах (k, φ) , где k — волновое число (модуль волнового вектора \mathbf{k}), φ — волновой азимут, характеризующий направление распространения волновой гармоники с волновым вектором \mathbf{k} .

В таком представлении двумерный спектр волнения можно рассматривать как произведение

$$\Psi(k, \varphi) = \chi(k)D(k, \varphi), \quad (4.61)$$

где $\chi(k)$ — интегральный одномерный спектр, $D(k, \varphi)$ — безразмерная функция углового распределения энергии морских волн.

Угловое распределение энергии морских волн $D(k, \varphi)$ определяется по двумерному спектру возвышений $\Psi(k, \varphi)$ с использованием соотношения:

$$D(k, \varphi) = \Psi(k, \varphi) \int_{-\pi}^{\pi} \Psi(k, \varphi) d\varphi. \quad (4.62)$$

После применения восстанавливающего оператора и перехода к спектру возвышений морских волн добавляются три дополнительных шага. Сначала выполняется линейная интерполяция спектра в области дефицита информации о спектре волнения. Данная область представляет собой два симметричных относительно центра сектора, с угловой мерой, порядка 20–40 градусов. Ее центральные направления ортогональны среднему градиенту поля яркости. Аппроксимация выполняется в тангенциальном направлении с использованием ближайших к зоне дефицита значений восстановленного спектра. Далее производится нормализация по формуле (4.62).

На финальном этапе обработки весь спектр аппроксимируется усеченным рядом Фурье, в котором отбрасываются все члены выше вторых гармоник:

$$D(k, \varphi) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2} + a_1 \cos(\varphi) + b_1 \sin(\varphi) + a_2 \cos(2\varphi) + b_2 \sin(2\varphi) \right). \quad (4.63)$$

Разложение (4.63) используется также и при обработке подспутниковых волнографических данных [171]. При сопоставлении результатов обработки подспутниковых волнографических данных и спектров, восстановленных по спутниковым изображениям, необходимо принимать во внимание, что первые гармоники в спектрах этих изображений отсутствуют ввиду инвариантности отображения на оптических изображениях волн, направленных в противоположенных направлениях, то есть $a_1 = b_1 = 0$. В то же время для волнографических данных параметры a_1, b_1 отличаются от нуля.

Таким образом, разработан метод построения операторов, восстанавливающих двумерные спектры уклонов и возвышения морской поверхности, основанных на численном моделировании физических процессов и явлений, участвующих в формировании поля яркости морской поверхности.

4.5. Высокопроизводительная регистрация

пространственных спектров морского волнения при оперативном космическом мониторинге обширных акваторий

Необходимость разработки методов высокопроизводительной регистрации пространственных спектров морского волнения связана с широким применением пространственно-частотной спектрометрии для исследования различных процессов и явлений, происходящих в морях и океанах [8, 9, 17, 18, 25, 31, 33, 48, 49, 180], а также для мониторинга загрязнений морских акваторий и выявления нефтегазопроявлений на них [9, 17, 33, 45, 82, 169, 170]. Эффективность дистанционных методов существенно повышается при сочетании с непосредственными подспутниковыми измерениями различных параметров водной среды [24, 26, 43, 45, 47, 169, 170, 178, 252], а также с использованием методов математического и физического моделирования [24, 30, 32, 169, 170]. Получение информации о таких спектрах важно для исследования различных физических процессов, происходящих на поверхности и в приповерхностном слое морей и океанов, а также для оперативного мониторинга загрязнений водной среды, в том числе вызванных антропогенными воздействиями и нефтегазопроявлениями [8, 9, 82, 169, 170, 180].

В настоящем разделе описано исследовательское программное обеспечение, которое реализует разработанные методы и предназначено для получения двумерных спектров поверхностного волнения на больших площадях. Для оперативного дистанционного мониторинга обширных акваторий необходима разработка высокопроизводительных методов и алгоритмов обработки больших объёмов данных с распараллеливанием вычислений [57, 89, 90, 191, 311].

Будем использовать подход к определению восстановливающего оператора, основанный на выполнении предварительного численного моделирования

изображений МП при различных комбинациях параметров, объединённых в многомерный вектор наборе условий W_R [19, 112, 175, 176]. При каждом конкретном W_R восстанавливающий оператор (пространственно-частотный фильтр) $R(k)$ аппроксимируется параметрическими выражениями (4.50) либо (4.60), представляющими аналитическую аппроксимацию восстанавливающего оператора $R(k)$ в полярных координатах (k, φ) . Эти аналитические выражения связаны с набором параметров, обозначенным многомерным вектором \mathbf{a} . В результате предварительного моделирования строится зависимость $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$. В процессе обработки экспериментальной информации для каждого изображения (или его фрагмента) определяется \mathbf{W}_R , а затем рассчитывается вектор $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$ и строится восстанавливающий в виде аналитической функции оператор $R(\mathbf{k}, \mathbf{a})$.

4.5.1. Оптимизация скорости обработки спутниковых данных

В настоящем разделе описан разработанный алгоритм параллельной обработки спутниковых изображений, рассмотрены особенности его программной реализации и представления результатов вычислений для дальнейшего анализа.

Алгоритм параллельной обработки При исследовании пространственно-неоднородного волнения по вариациям восстановленных пространственных спектров участков поверхности, космические изображения необходимо разделить на фрагменты. Размер фрагментов определяется характерным масштабом изучаемых явлений на поверхности. Обычным подходом является разбиение изображения на равные квадратные фрагменты с возможностью их частичного перекрытия. Разделение больших изображений на фрагменты с перекрытием и последующая их обработка с вычислением пространственных спектров могут быть реализованы с использованием существующих программных средств обработки данных дистанционного зондирования, таких как ENVI/IDL [203], ERDAS Imagine [204]. Однако такая обработка имеет некоторые существенные

недостатки, особенно при мониторинге обширных акваторий. В частности, стандартные компьютеры всё ещё имеют недостаточно высокое быстродействие для обработки больших потоков спутниковых данных. Кроме того из-за наличия последовательных операций в стандартных алгоритмах невозможно полное распараллеливание вычислений. Для устранения указанных недостатков разработан метод, описанный в [59, 302]. Он основан на применении графических процессоров (GPU - англ. Graphics Processing Unit) для распараллеливание вычислений при обработке изображений. Разделение больших космических изображений на фрагменты (тайлы) позволяет производить обработку этих тайлов параллельно. Предлагаемый алгоритм параллельной обработки тайлов заключается в выполнении следующей последовательности действий:

1. считать изображение и его сопроводительную информацию;
2. считать тайл изображения заданного размера из заданного места на исходном космическом изображении;
3. определить параметры условий формирования поля яркости в этом тайле, влияющие на параметры нелинейного восстановливающего оператора и скопировать тайл в память GPU;
4. применить преобразование Фурье к каждому фрагменту изображения и вычислить двумерный пространственный спектр фрагмента изображения, который для краткости будем называть спектром тайла изображения;
5. получить восстановливающий оператор в виде пространственно-частотного фильтра $R(\mathbf{k}, \mathbf{a})$, зависящего от условий формирования изображения по формуле (4.60);
6. применить восстановливающий фильтр $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ к спектру тайла изображения морской поверхности и получить спектр уклонов морской поверхности: $\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})S(\mathbf{k})$;

7. рассчитать характеристики спектра уклонов морской поверхности, в том числе параметр p степенной аппроксимации $\Phi(k) \sim k^{-p}$;
8. сохранить полученные значения характеристик спектров в векторный файл (например, в формате шейп-файла SHP).

При этом шаги 2–7 описанного алгоритма производятся параллельно для всех имеющихся тайлов с использованием всех доступных средств.

Особенности программной реализации алгоритма Для реализации описанного алгоритма разработан исследовательский программный модуль, позволяющий оптимизировать время обработки больших объёмов спутниковых изображений высокого пространственного разрешения за счёт параллельной обработки фрагментов изображений с использованием максимального количества вычислительных ресурсов. Модуль написан на языке C/C++ и позволяет работать со спутниковыми изображениями в стандартных форматах TIFF, GeoTIFF. Программный модуль поддерживает многоядерные процессоры и содержит в себе оптимизированные функции для обработки мультимедийных данных. Параллельность вычисления реализуется средствами OpenMP [311].

Блок-схема алгоритма параллельной обработки космических изображений приведена на рисунке 4.14. При разработке программного модуля использованы библиотеки обработки изображений:

- OpenCV — библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом, реализованная на C/C++ [310];
- Intel Integrated Performance Primitives — библиотека, которая содержит наиболее эффективную реализацию быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT) для процессоров Intel, на которых и тестировался данный код [244];

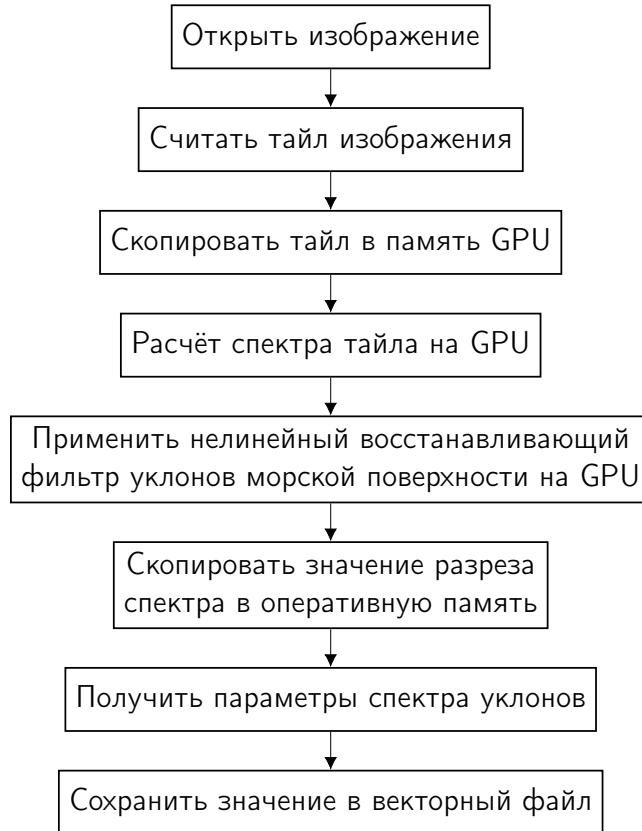


Рис. 4.14. Блок схема алгоритма параллельной обработки космических изображений МП и вычисления пространственных спектров волнения

- GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) — библиотека для чтения и записи растровых и векторных гео-пространственных форматов данных, которая отвечает за работу с форматом GeoTIFF и позволяет хранить изображения очень большого размера, считывать, записывать фрагменты изображения, работать с геопривязкой [219].

Код разработанного программного модуля имеет две реализации, позволяющие использовать программу на компьютерах различной конфигурации:

- стандартную реализацию, работающую на центральном процессоре общего назначения;
- реализацию высокопроизводительного модуля вычисления спектров, основанную на использовании программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений CUDA [191].

Представление результатов вычислений При автоматизированной обработке изображений большого размера важно выбрать оптимальное представление данных для дальнейшего анализа. Необходимо автоматическое представление результатов обработки изображений в формате, допускающем быстрый просмотр результатов с учётом их многообразия [59, 302]. Практика обработки больших потоков спутниковых изображений морского волнения показала удобство представления результатам параллельной обработки потоков фрагментов спутниковых изображений морского волнения в виде презентации. Возможность автоматического создания такой презентации автоматического создания презентации реализована в созданной исследовательской программе. Разработанный скрипт на языке программирования Visual Basic [79], автоматически формирует последовательность слайдов презентации, соответствующую обработанной последовательности фрагментов изображения, обеспечивая возможность построения презентаций большого объёма. Результаты обработки представляются в известном формате PPTX, допускающем просмотр результатов стандартными офисными программами, например PowerPoint [320]. С точки зрения изучения развития поверхностного волнения на обширных акваториях представляет интерес формирование выходных данных презентации следующего состава [59]: исходное изображение тайла; спектр изображения; спектр уклонов морской поверхности, восстановленный с применением разработанного оператора; спектр уклонов морской поверхности, прошедший медианную фильтрацию изображения для лучшего визуального представления; одномерный разрез спектра уклонов в заданном направлении, либо интегральный одномерный спектр уклонов в заданном диапазоне углов; представление пространственного распределения информационных продуктов для каждого фрагмента в пределах исследуемой акватории.

Пример фрагмента презентации приведён на рис. 4.15. Обрабатываемое изображение целиком имеет размер 108294×28236 пикселов и разрядность 16 бит. В автоматическом режиме сформирована страница презентации с резуль-

татами обработки тайлов размером 2048×2048 . На рисунке 4.15 (д) показаны результаты пространственно-спектральной обработки одного тайла: слева — восстановленный спектр уклонов, справа — тот же спектр, с которым проведена медианная фильтрация с ядром 11 пикселов для лучшей визуализации.

На рисунке 4.15 (е) приведён график интегрального восстановленного спектра уклонов в выделенном угловом секторе.

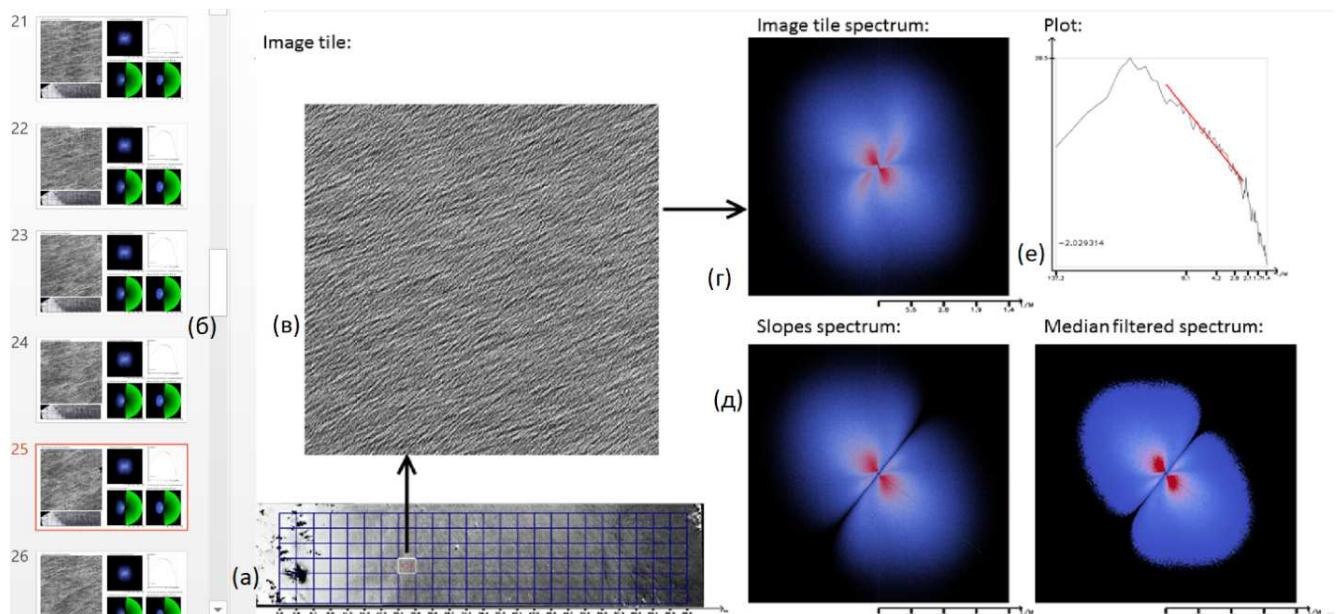


Рис. 4.15. Пример обработки космического изображения в автоматическом режиме — страница презентации с результатами обработки одного тайла размером 2048×2048 : (а) панорама исходного большого спутникового изображения высокого разрешения; (б) лента последовательности слайдов в формате PowerPoint, сформированная исследовательской программой; (в) выделенный и обработанный фрагмент изображения (тайл); пространственный спектр выделенного фрагмента; (д), (е) результаты пространственно-спектральной обработки одного тайла (объяснение в тексте)

4.5.2. Результаты экспериментальной оценки эффективности алгоритмов параллельной обработки космических данных

Для оценки эффективности предложенного алгоритма распараллеливания при проведении обработки измерялось время выполнения операций и вычислялись значения характеристик *ускорение* и *эффективность*.

Таблица 4.2. Значения ускорения и эффективности для ЦПУ версии исследовательской программы

Количество потоков	Эффективность, (%)	Ускорение
1	100	1
2	100	1.99
4	95.5	3.82
8	62.5	5

Ускорение — отношение времени выполнения вычислений на одном потоке T_1 , к времени выполнения тех же вычислений на p потоках T_p :

$$S = \frac{T_1}{T_p} . \quad (4.64)$$

Эффективность — отношение

$$E = \frac{S}{p} , \quad (4.65)$$

где S — ускорение, p — количество потоков.

Для того чтобы оценить ускорение и эффективность созданной исследовательской программы, проводились тестовые вычисления с использованием настольного компьютера стандартной конфигурации, имеющий 4-ядерный центральный процессор Intel Core i5-3470 с частотой 4 GHz. Для тестирования CUDA-версии программы использовался графический процессор NVidia GeForce RTX 2060 с рабочей частотой 1700 GHz и объёмом памяти 6 GB GDDR6, содержащий 920 ядер CUDA.

Полученные результаты по ускорению и эффективности приведены в таблице 4.2 [59]. Оценки ускорения и эффективности на центральном процессоре выполнялись с использованием от 1 до 4 ядер. Оценки получены при размере тайла 2048×2048 пикселов. При уменьшении и при увеличении размера тайла наблюдается увеличение времени обработки. При тестировании CUDA-версии программы оценки ускорения и эффективности по приведённым формулам не проводились в силу специфики технологии CUDA [59]. При этом для оценки эф-

фекта от применения данной технологии сравнивалось время вычислений при обработке тестового изображений ЦПУ-версией программы при максимальном количестве потоков и CUDA-версией программы. Такое сравнение показало, что CUDA-версия программы справляется с обработкой спутниковых изображений в среднем в 2.6 раза быстрее, чем ЦПУ-версия, работающая с максимальным ускорением. Таким образом, CUDA-версия программы позволяет обрабатывать изображений приблизительно в 12 раз быстрее, чем это делает программа без распараллеливания вычислительных потоков [59].

4.5.3. Результаты тестирования алгоритма на модельных изображениях

Тестирование проводилось на модельных изображениях, синтезированных методом, описанным в [36, 38, 111, 112]. Поскольку спектры морского волнения аппроксимируются степенным законом, измерение степенных показателей p по фрагментам изображений является одним из основных функционалов разработанной исследовательской программы. Задача тестирования ставилась следующим образом:

- синтезировать тестовое изображение морской поверхности с заданным значением степенного показателя p_s ;
- обработать синтезированное тестовое изображение МП с помощью разработанной исследовательской программы и получить экспериментальную оценку спектра волнения p_e ;
- оценить расхождение между заданным p_s и измеренным значением p_e .

Использовались модельные изображения, полученные при различных значениях степенных показателей p пространственных спектров возвышений МП, соответствующих различным стадиям развития ветрового волнения [76, 130]. Для

создания тестового набора изображений задавались следующие значения степенных показателей p : 3.3; 3.6; 4; 4.5; 5. Для более широкого охвата условий волнообразования использовались различные значения скорости ветра: 5; 7; 10; 15; 20 м/с, которым соответствуют различные значения дисперсии уклонов волнения.

Примеры синтезированных изображений приведены на рисунке 4.16. При обработке этих изображений с использованием предложенного алгоритма получились восстановленные пространственные спектры возвышений МП, допускающие степенную аппроксимацию с параметрами p_e , отличающимися от значений p_s , заданных при синтезе модельных изображений, не более чем на 1%. Это свидетельствует о том, что предложенный алгоритм с хорошей точностью восстанавливает характеристики пространственных спектров МП.

4.5.4. Результаты экспериментального применения разработанного алгоритма и их анализ

Приведём примеры исследования изменчивости пространственных спектров уклонов и возвышений МП, полученных, с использованием разработанного метода и его программной реализации. В ходе исследований получены следующие характеристики пространственных спектров волнения [59]:

- параметры степенной аппроксимации одномерных разрезов двумерных спектров уклонов МП для заданных направлений;
- параметры степенной аппроксимации одномерных интегральных спектров уклонов МП в заданном диапазоне волновых азимутов [28, 29];
- форма двумерных фигур, формируемых при пороговой обработке двумерных спектров изображений морской поверхности, характеризующая распределение волновой энергии между различными группами поверхностных волн [11, 12].

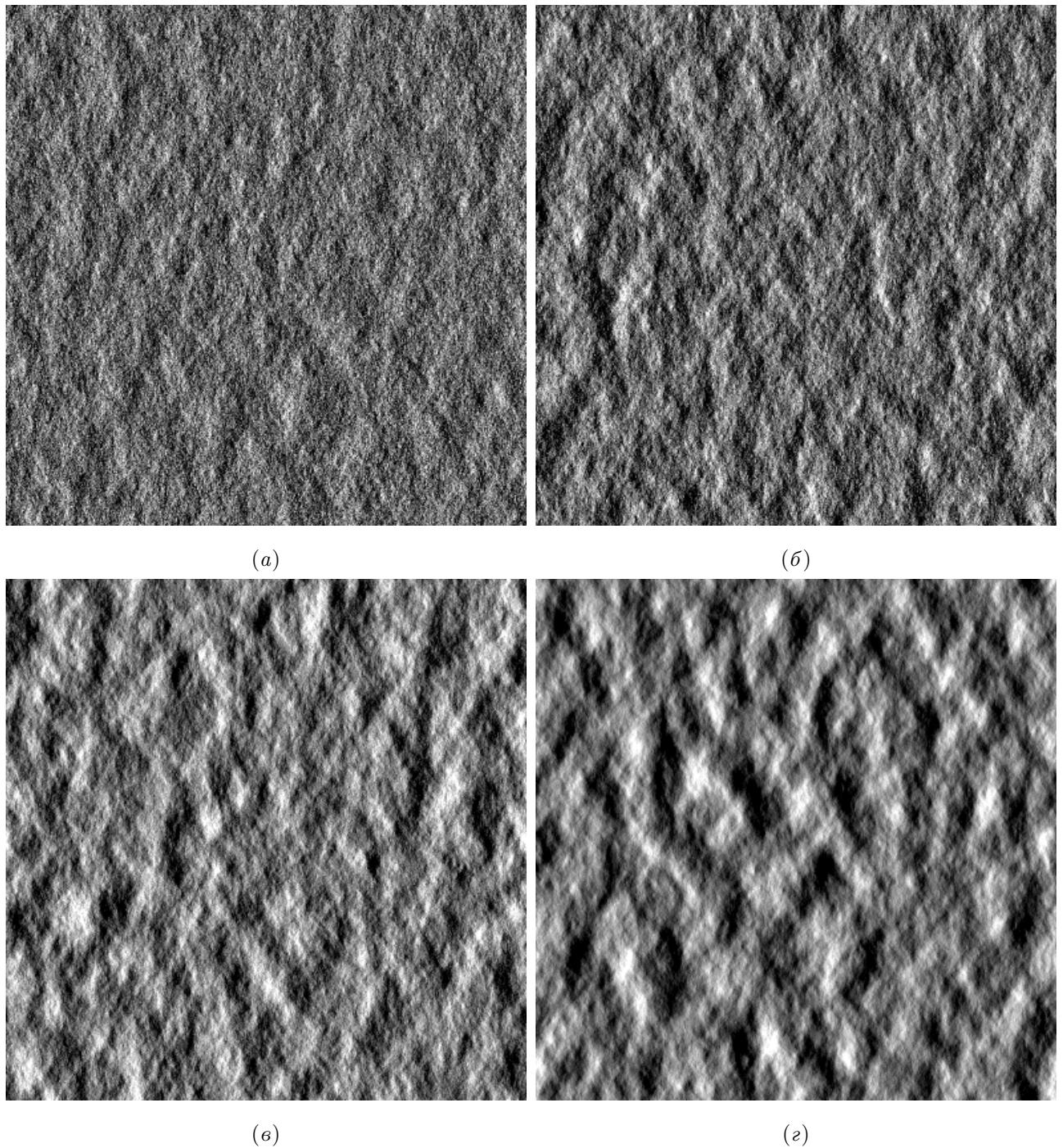


Рис. 4.16. Модельные изображения морской поверхности с различными значениями степенного показателя пространственного спектра возвышений p : (а) $p = 3.6$, (б) $p = 4.0$, (в) $p = 4.5$, (г) $p = 5.0$. При синтезе изображений задавалась скорость приповерхностного ветра 15 м/с.

Для исследования изменчивости спектров уклонов и возвышений МП использовались изображения, полученные со спутника Ресурс-П в различных акваториях:

- в акватории Чёрного моря у берегов Крыма и Краснодарского края [18,

28, 29, 32, 45];

- в акватории Тихого океана у берегов острова Оаху (Гавайские острова) [8, 24, 26, 33, 43, 47, 169, 170, 178].

Рассмотрим пример изменчивости спектров волнения, выявленных по восстановленным пространственным спектрам уклонов и возвышений морской поверхности на основании изображений, полученных 4 августа 2017 г в 14:09 по местному времени (11:09 GMT) с помощью оптической аппаратуры «Геотон» спутника «Ресурс-П» в акватории Чёрного моря вблизи города Севастополь.

Для исследования изменчивости спектров в различных диапазонах обработка проводилась при различных размерах обрабатываемых фрагментов изображения. Приведём пример с размером фрагмента 2048×2048 пикселов, соответствующим размеру исследуемых участков морской поверхности 1455×1455 м.

Области, выделенные различными знаками на рисунке 4.17, имеют отличающиеся значения степенного показателя p_χ интегрального спектра возвышений МП в диапазоне длин волн 4–10 м. Степенные показатели p_χ интегрального спектра возвышений МП были получены из степенных показателей p_s интегрального спектра уклонов с помощью оценочной формулы

$$p_\chi = p_s + 2 ,$$

вытекающей из соотношения, связывающего спектры уклонов и возвышений морской поверхности множителем, пропорциональным квадрату модуля волнового вектора [111]. Чтобы облегчить интерпретацию показателей спектров, целесообразно учесть известное соотношение, связывающее показатели пространственных p_χ и частотных p_ω спектров возвышений [29]

$$p_\chi = \frac{p_\omega + 1}{2} .$$

Таким образом, равновесному спектру Филлипса [141] соответствует $p_\omega = 5$ и $p_\chi = 3$, а известной аппроксимации Тоба [338] соответственно $p_\omega = 4$ и $p_\chi = 2.5$.

Показатели изменяются в интервале от $p_\chi = 2$ до $p_\chi = 3.5$, который включает обе цитируемые аппроксимации. В качестве примера применения разработан-

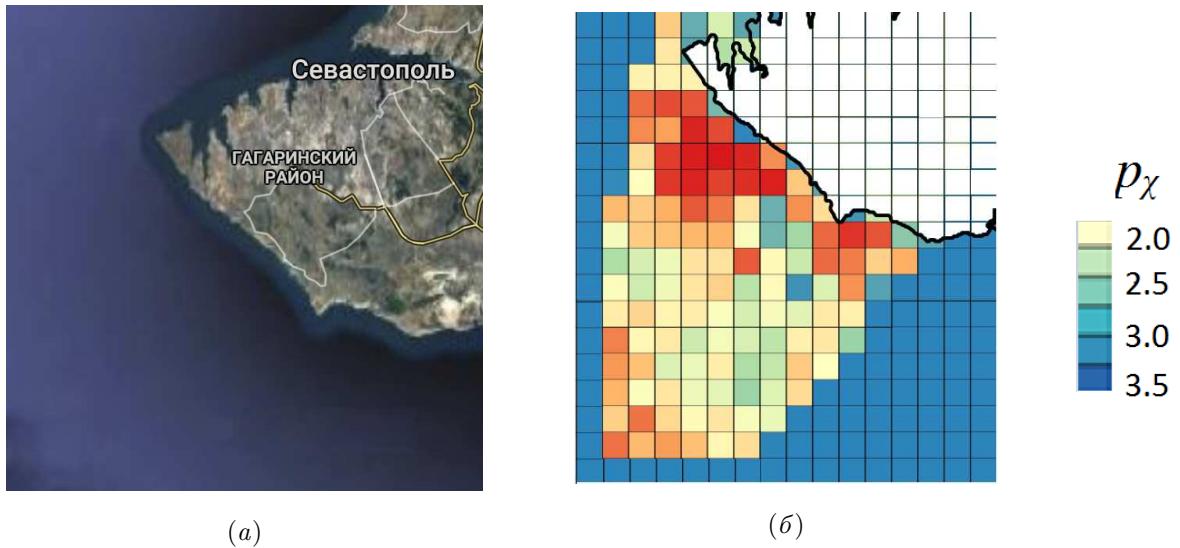


Рис. 4.17. Пример оперативного анализа изменчивости морского волнения разработанным исследовательским программным модулем у побережья Крыма вблизи города Севастополь: (а) фрагмент карты Google Earth; (б) пространственное распределение значений параметра степенной аппроксимации разреза спектра уклонов (размер фрагмента изображения 2048×2048 пикселов).

ных алгоритмов и исследовательского программного модуля для обширных океанских акваторий приведём некоторые результаты, демонстрирующие возможности исследования изменчивости характеристик пространственных спектров океанского волнения при наличии различных волновых систем, ветрового волнения и волн зыби. Такие исследования проводились в тихоокеанской акватории вблизи Гавайских островов в 2019 году с использованием данных, полученных со спутника «Ресурс-П».

На рисунке 4.18 приведён пример панорамы восстановленных степенных показателей интегральных пространственных спектров уклонов океанских волн в бухте Мамала в диапазоне расстояний $4 - 40$ км от берега. Там же приведены примеры спектров фрагментов изображений, полученных в этой акватории 8 июня и 28 июля 2019 года, и восстановленных по этим фрагментам спектр уклонов различных волновых систем — волн зыби со слабым ветровым волнением

и смешанной системы волн, состоящей из развивающегося ветрового волнения и волн зыби.

Таким образом, в результате численных экспериментов установлено, что программное обеспечение выполняет восстановление спектров уклонов и возвышений морской поверхности с применением разработанных высокопроизводительных методов с погрешностью не более 1%. Проведённые вычислительные эксперименты продемонстрировали значительное увеличение производительности регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений за счёт распараллеливания вычислений — в 5 раз при использовании только центрального процессора стандартного настольного компьютера и более чем в 12 раз при использовании графического процессора с технологией CUDA. Приведены примеры применения разработанной исследовательской программы при исследовании обширных акваторий.

Таким образом, разработаны метод и алгоритм высокопроизводительной регистрации пространственных спектров морского волнения для автоматизации оперативного космического мониторинга обширных акваторий.

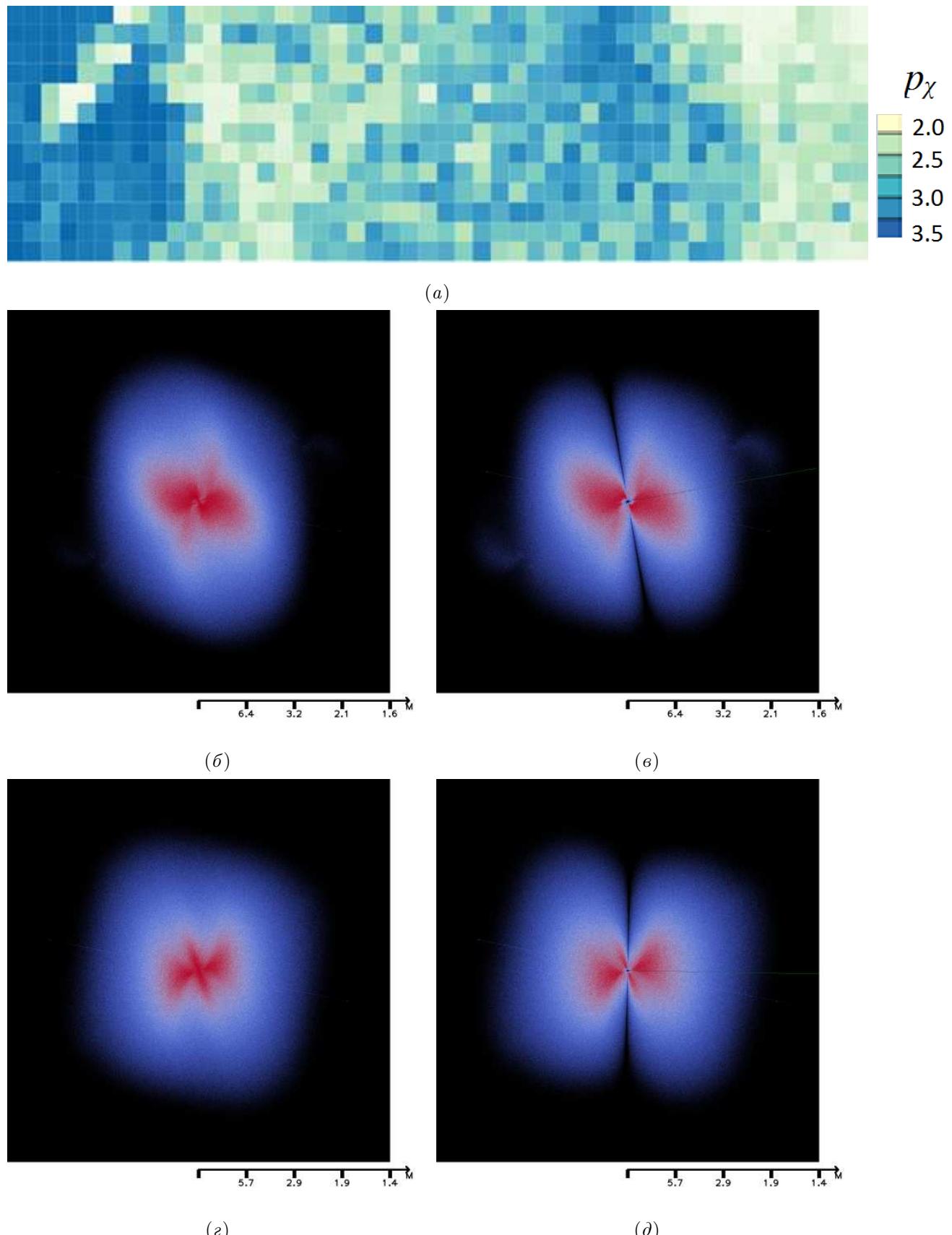


Рис. 4.18. Пример оперативного анализа изменчивости волнения в тихоокеанской акватории вблизи острова Оаху: (а) визуализация восстановленных степенных показателей (наклонов) интегральных пространственных спектров уклонов океанских волн; (б) спектр фрагмента изображения волн зыби со слабым ветровым волнением (08.06.2019); восстановленный спектр уклонов по фрагменту (б); (г) спектр фрагмента изображения смешанной системы волн (28.07.2019); (д) восстановленный спектр уклонов по фрагменту (г).

Выводы к Главе 4

В главе получены следующие основные результаты:

- Разработан метод восстановления пространственных спектров уклонов и возвышений поверхности волнения по аэрокосмическим оптическим изображениям, основанный на применении восстанавливающих операторов, учитывающий нелинейную модуляцию поля яркости уклонами морской поверхности. Построение восстанавливающих операторов включает в себя ряд вычислительных операций, в том числе численный синтез полей уклонов морской поверхности с заданным пространственным спектром, и моделирование поля яркости с учётом условий освещения, для выполнения которых требуется информация об условиях формирования изображений. В качестве исходных данных при исследовании характеристик границы раздела атмосфера-гидросфера с помощью разработанного метода могут использоваться многоспектральные и панхроматические данные, получаемые с оптических систем высокого и сверхвысокого разрешения, устанавливаемых, например, на воздушных носителях, а также на отечественных и зарубежных спутниках.
- Для восстановления пространственных спектров уклонов и возвышений поверхности волнения по аэрокосмическим оптическим изображениям может использоваться подход, основанный на формировании и параметризации пространственно-частотных фильтров, восстанавливающих спектры поверхности волнения по спектрам изображений. Оптимальные параметры такого восстанавливающего оператора определяются итерационным путём при сопоставлении спектров аэрокосмических изображений со спектрами характеристиками морского волнения, измеренными с высокой точностью струнными волнографами в контролируемых условиях.
- Разработан высокопроизводительный алгоритм и исследовательское про-

граммное обеспечение для регистрации спектров морской поверхности по космическим изображениям, которые могут применяться для решения задач оперативной океанографии в интересах охраны окружающей среды и рационального природопользования акваторий морей и океанов в том числе с использованием систем космического мониторинга. Разработанное исследовательское программное обеспечение предназначено для работы с применением многоядерных процессоров. Проведено тестирование разработанных алгоритмов и получены оценки их производительности на экспериментальных данных.

- Продемонстрирована целесообразность применения используемого подхода и разработанных алгоритмов для увеличения вычислительной производительности при решении задач регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений. Проведённые вычислительные эксперименты показали значительное увеличение производительности регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений за счёт распараллеливания вычислений — в 5 раз при использовании только центрального процессора стандартного настольного компьютера и более чем в 12 раз при использовании графического процессора с технологией CUDA.
- Результаты могут быть использованы при создании программного обеспечения многопроцессорных аппаратно-программных комплексов, создаваемых для оперативного мониторинга процессов и явлений, происходящих в различных акваториях мирового океана по данным, поступающим с космических и авиационных носителей, и предназначенных для обработки данных дистанционного зондирования океанских акваторий в масштабе времени, близком к реальному.
- Представленные методы реализованы программно и внедрены при созда-

нии программного обеспечения экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации, а также при создании макета аппаратно-программного комплекса мониторинга пространственной структуры волнения в широком диапазоне частот по оптическим и радиолокационным космическим изображениям для выявления антропогенных воздействий на морские акватории.

Более подробное описание результатов экспериментальных исследований с применением разработанных методов, алгоритмов и исследовательского программного обеспечения приведены в Главе 5.

Глава 5

Валидация методов дистанционного измерений спектров морского волнения и результаты экспериментальных исследований

Настоящая глава посвящена изложению результатов валидации метода дистанционного измерений спектров морского волнения, описанного в Главе 4. Валидация метода заключается в экспериментальной проверке адекватности дистанционных измерений с использованием результатов измерений, выполняемых на месте. Для этого используются контактные данные, получаемые при синхронных измерениях с помощью решётки струнных волнографов, с результатами измерений, выполненных с помощью дрейфующих волновых буёв, а также со спектрами, полученными путём обработки стереоизображений, снятых со стационарной платформы.

В настоящей главе приводятся также результаты исследования спектров морского волнения восстановленных по спектрам оптических космических изображений с применением восстанавливающих операторов, работающих в широком диапазоне длин волн.

Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [7, 19, 27–29, 58, 171, 176].

5.1. Подход к валидации методов восстановления спектров

При экспериментальной проверке достоверности методов регистрации спектров волнения по спектрам аэрокосмических изображений, будем проводить ко-

личественное сопоставление результатов дистанционных измерений с данными, получаемыми путём непосредственных измерений в комплексных экспериментах.

Комплексные эксперименты проводятся в контролируемых условиях и включают аэрокосмическую съемку тестовых участков морской поверхности и синхронные измерения на месте с помощью контактной аппаратуры, в том числе стереосъемку морской поверхности с малой высоты.

Пространственные спектры возвышений морской поверхности, восстановленные по спутниковым изображениям при фиксированных условиях, сопоставляются со спектрами возвышений, полученными в измерениях на месте по специальным методикам, учитывающим различный характер дистанционных и контактных измерений [7, 28, 29, 176].

Рассмотрим особенности измерения характеристик морской поверхности в комплексных экспериментах. Взволнованная морская поверхность представляет собой случайное поле возвышений (волновых апплликат) (4.1). Фиксируя в (4.1) момент времени $t = t_0$, получим двумерную случайную функцию пространственных координат (4.2). Характеристики поля возвышений морской поверхности в фиксированный момент времени $z = \xi(x, y)$ регистрируются дистанционными методами. Эти методы должны пройти процедуру валидации, проверки адекватности. Фиксируя в (4.1) пространственные координаты $x = x_0, y = y_0$, получим одномерную случайную функцию времени

$$z = \xi(x, y, t)|_{x=x_0, y=y_0} = h(t). \quad (5.1)$$

Характеристики поля возвышений морской поверхности в фиксированных точках $z = h(t)$ непосредственно измеряются контактными волнографами. Калибровку характеристик морской поверхности, регистрируемых дистанционными методами, можно осуществить, используя методику сопоставления пространственных и временных характеристик морского волнения, основанную на соответствующих гидродинамических моделях [7, 28, 29], имея полученные при

одинаковых условиях результаты дистанционных измерений характеристики двумерных полей возвышений $z = \xi(x, y)$ и непосредственных измерений локальных временных рядов высот $z = h(t)$. В качестве источников информации для сопоставления результатов дистанционных и непосредственных контактных измерений характеристик морской поверхности будем использовать следующие виды измерений:

- Измерения, в которых формируются временные последовательности возвышений морской поверхности с помощью стационарных контактных датчиков.
- Измерения с помощью волновых буёв, дрейфующих в зоне аэрокосмической съёмки.
- Стереофотограмметрические измерения, выполняемые с близких расстояний и позволяющие непосредственно измерить двумерные реализации поля возвышений морской поверхности с высоким пространственным разрешением.

Для прямого определения характеристик морского волнения контактными методами, как правило, применяются решётки датчиков (волнографов), измеряющих параметры морской поверхности (уклон, возвышение, ускорение) в одной или нескольких точках, разнесённых друг от друга на некоторое расстояние. Для оценки пространственно-временных спектров по данным решёток волнографов широко используются ряд косвенных итерационных методов расчёта, в которых постулируются те или иные гипотезы о статистических свойствах волнения [260, 363].

Стереофотограмметрическая обработка синхронно зарегистрированных оптических изображений морской поверхности с двух различных точек зрения (стереопар) позволяет непосредственно измерять реализации двумерных полей высот морской поверхности $z = \xi(x, y)$, а по ним вычислять пространствен-

ные спектры возвышений [7, 260]. Обработка стереопар квалифицированным оператором на стереокомпараторе позволяет измерять реализации поля возвышений вручную, точка за точкой. При этом может быть достигнута точность, позволяющая оценивать спектр волнения вплоть до коротковолновой области с длинами волн порядка нескольких сантиметров [7]. Однако, ввиду большой трудоемкости обработки первичных данных, такой метод не может быть применен для обработки больших объемов данных. Автоматизированная обработка стереопар не позволяет достичь такой высокой точности в области коротких волн. При автоматизированной обработке можно измерять спектры метровых и дециметровых волн [260]. Для сопоставления частотных и частотно-направленных спектров волнения, регистрируемых волнографами, с двумерными и одномерными пространственными спектрами возвышений морской поверхности, регистрируемыми по дистанционным данным, требуется разработка специального методического подхода, учитывающего особенности гравитационных и гравитационно-капиллярных волн.

С учётом рассмотренных особенностей предлагается подход к сопоставлению спутниковых и контактных измерений. Он заключается в последовательном выполнении следующих вычислительных процедур:

1. Проведение экспериментов в контролируемых условиях, включающих съёмку тестовых участков морской поверхности и синхронные измерения с помощью контактной аппаратуры и/или стереофотограмметрической съёмки морской поверхности с малой высоты.
2. Восстановление спектров морской поверхности по аэрокосмическим изображениям при фиксированных условиях получения этих изображений.
3. Формирование спектров волнения по подспутниковым контактным измерениям и/или данным стереофотограмметрической обработки изображений.

4. Сопоставление спектров волнения, полученных дистанционно, с данными контактных и/или стереофотограмметрических измерений.

Рассмотрим связь между пространственными спектрами морской поверхности, восстанавливаемыми по оптическим изображениям, и частотными и частотно-направленными спектрами волнения, измеряемыми с помощью контактных датчиков, и характеризующими колебания уровня моря с течением времени в фиксированной точке.

Частотный спектр возвышений морской поверхности $S_\xi(\omega)$ характеризует распределение волновых колебаний в заданной точке по циклическим частотам $\omega = 2\pi/\tau$, где τ — период волнового колебания. Двумерный пространственный спектр волнения $\Psi(\mathbf{k})$ описывает распределение энергии в фиксированный момент времени по волновым векторам \mathbf{k} . Соответственно, одномерный пространственный спектр волнения $\chi(k)$ характеризует распределение энергии в фиксированный момент времени по волновым числам $k = |\mathbf{k}|$. Волновое число связано с длиной поверхностной волны Λ : $k = 2\pi/\Lambda$.

Пространственные и частотные спектры волнения являются функциями разных аргументов. Они имеют разный физический смысл и требуют применения различающихся методов измерений. Поэтому для сопоставления спектров, измеренных различными методами, используется дисперсионное соотношение $\omega(k)$, описывающее зависимость между временными и пространственными частотами волн, зависящее от физических механизмов, которые формируют поверхностные волны рассматриваемого диапазона. В рамках линейной гидродинамической модели, компоненты спектра волнения можно рассматривать как элементарные плоские волны, для которых справедливо дисперсионное соотношение теории потенциальных волн малой амплитуды $\omega(k)$, связывающее циклическую частоту волны ω с волновым числом k . На глубокой воде (при $kh \gg 1$, где h — глубина), дисперсионное соотношение, учитывающее вклад гравитации

онных и капиллярных сил в формирование волн, имеет вид [109]:

$$\omega(k) = \sqrt{gk + \frac{T}{\rho}k^3}, \quad (5.2)$$

где g — ускорение свободного падения, T — коэффициент поверхностного натяжения, ρ — плотность воды.

Для гравитационных волн (при $\Lambda > 10^{-1}$ м) соотношение (5.2) принимает вид:

$$\omega(k) = \sqrt{gk}. \quad (5.3)$$

Дисперсионное соотношение $\omega(k)$ позволяет установить связь между пространственным спектром $\chi(k)$, характеризующим суммарную энергию волн с волновым числом k , распространяющихся во всевозможных направлениях, и частотным спектром $S_\omega(\omega)$, характеризующим суммарную энергию волн с циклической частотой ω , распространяющихся во всевозможных направлениях.

$$\chi(k) = S_\omega(\omega(k)) d\omega(k)/dk. \quad (5.4)$$

С другой стороны, одномерный пространственный спектр $\chi(k)$ может быть получен из двумерного спектра возвышений морской поверхности $\Psi(\mathbf{k})$ путём интегрирования по углам в соответствии с 1.14:

$$\chi(k) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Psi(k \cos \varphi, k \sin \varphi) k d\varphi. \quad (5.5)$$

Двумерный спектр возвышений морской поверхности $\Psi(\mathbf{k})$ связан соотношением 4.5 с двумерным спектром уклонов морской поверхности $\Phi_\varphi(k)$ для направления φ_c , определяемого азимутом Солнца [36, 38].

При этом двумерный спектр уклонов $\Phi_\varphi(\mathbf{k})$ получается в результате применения восстанавливающего оператора \mathbf{R} , определённого в соответствии с (4.26), к двумерному спектру изображения $S(\mathbf{k})$.

Таким образом, спектр $\chi(k)$ можно использовать в качестве базовой функции и пересчитывать спектры, получаемые различными методами измерений, в этот спектр с помощью преобразований (5.4) и (5.5).

С другой стороны, в качестве базовой функции для сопоставления результатов измерений, выполненных разными методами, можно использовать и частотный спектр $S(\omega)$, который получается из пространственного спектра $\chi(k)$ с использованием дисперсионного соотношения.

В некоторых ситуациях, например, при обработке данных стереофотосъёмки, может быть получена одномерная реализация поля возвышений морской поверхности $h_\varphi(x')$ с высоким пространственным разрешением, представляющая собой разрез двумерного поля возвышений $\xi(x, y)$ в направлении, заданном азимутом φ :

$$h_\varphi(x') = \xi(x' \cos \varphi, y' \sin \varphi).$$

В линейной гидродинамической теории волнения компоненты энергетического спектра возвышений $\Psi(\mathbf{k})$ пропорциональны квадратам амплитуд (мощностям) гармоник с волновым числом $|\mathbf{k}|$, распространяющихся в направлении $\varphi = \arctg(k_y/k_x)$.

В соответствии с этой теорией, компоненты спектра одномерного поля $h_\varphi(x')$ представляют суммарные мощности всех гармоник с волновыми векторами \mathbf{k} , имеющими проекцию k_φ на направление разреза. Это означает, что спектр $\Psi_\varphi(k_\varphi)$ является проекцией двумерного спектра $\Psi(\mathbf{k})$ для заданного направления. Аналитическую связь между спектрами $\chi(k)$ и $\Psi_\varphi(k_\varphi)$ в общем виде получить затруднительно, поэтому ограничимся рассмотрением степенных спектров вида

$$\chi(k) = a_\chi k^{-p_\chi}. \quad (5.6)$$

В высокочастотной области спектра, при $k \gg k_m$, где волновое число k_m соответствует спектральному максимуму волнения, угловое распределение энергии в спектре возвышения морской поверхности близко к изотропному [76]. Поэтому двумерный спектр $\Psi(\mathbf{k})$, соответствующий (5.6), можно считать изотропным. $\Psi(\mathbf{k}) = a_\Psi k^{-p_\Psi}$. Это предположение упрощает совместный анализ двумерных пространственных и одномерных частотных спектров волнения. Из выражения

(5.2) получим следующее выражение для параметров спектра $\chi(k)$:

$$a_\chi = 2\pi a_\Psi, \quad p_\chi = p_\Psi - 1.$$

Для определения параметров степенной аппроксимации частотного спектра

$$S_\omega(\omega) = a_\omega \omega^{-p_\omega},$$

с учётом соответствующих параметров пространственного спектра $\chi(k)$ применим дисперсионное соотношение $\omega(k)$. Для гравитационных волн $\omega^2 = gk$ и из формулы (5.4) вытекает следующая связь между параметрами спектров:

$$a_\chi = \frac{1}{2} a_\omega g^{(1-p_\omega)/2}, \quad p_\chi = \frac{p_\omega + 1}{2}.$$

В гравитационно-капиллярном диапазоне поверхностных волн дисперсионное соотношение имеет более сложный вид (5.2) и определение аналитической связи между параметрами степенной аппроксимации спектров $\chi(k)$ и $S_\omega(\omega)$ требует громоздких выкладок. Поэтому в этом случае целесообразно применение численного метода пересчёта.

Таким образом, пространственные и частотные спектры возвышений морской поверхности измеренные разными методами, можно сопоставлять с использованием описанных преобразований.

Интегральной характеристикой взволнованной морской поверхности в заданном интервале волновых чисел (k_1, k_2) является полная спектральная энергия, равная дисперсии волновых аппликат, которая может быть определена интегрированием спектра $\chi(k)$. Поэтому в качестве энергетической характеристики в интервале (k_1, k_2) удобно использовать среднеквадратичное отклонение поля возвышений морской поверхности в этом интервале

$$\sigma_\xi = \sqrt{\int_{k_1}^{k_2} \chi(k) dk}. \quad (5.7)$$

Описанный подход позволяет:

- провести сопоставление спектральных характеристик морского волнения, измеренных дистанционно, с данными контактных и/или стереофотограмметрических измерений;
- оценить качество восстановления спектров волнения по аэрокосмическим изображениям.

5.2. Условия проведения экспериментов

Для проверки адекватности разработанных методов дистанционного измерения спектров волнения использовались результаты, полученные в различных типах экспериментов.

- Комплексные эксперименты с подспутниковыми измерениями в контролируемых условиях в прибрежной зоне. Выполнялась космическая съёмка высокого пространственного разрешения и синхронные подспутниковые измерения спектров волнения в районе расположения стационарной исследовательской платформы.
- Комплексные эксперименты с измерениями в коротковолновой части спектра волнения. Проводились синхронные исследования в коротковолновой области спектров волнения ($\Lambda = 0.04 - 1.0$ м) с помощью струнных волнографов, объектной фотосъёмки и стереосъёмки с палубы исследовательской платформы.
- Комплексные эксперименты с подспутниковыми измерениями в обширных океанских акваториях. Выполнялась космическая съёмка высокого пространственного разрешения и синхронные подспутниковые измерения спектров волнения и с помощью дрейфующих волновых буёв в обширной океанской акватории при наличии нескольких систем волн, формируемых в сложных условиях волнообразования.

Экспериментальные работы первого и второго типа выполнялись в районе расположения Черноморской исследовательской платформы Морского гидрофизического института РАН (поселок Кацивели, Крым), установленной на расстоянии около 600 м от берега (см. рис. 5.1). На изображении приведены батиметрические данные — карта глубин в исследуемой акватории. Для изме-

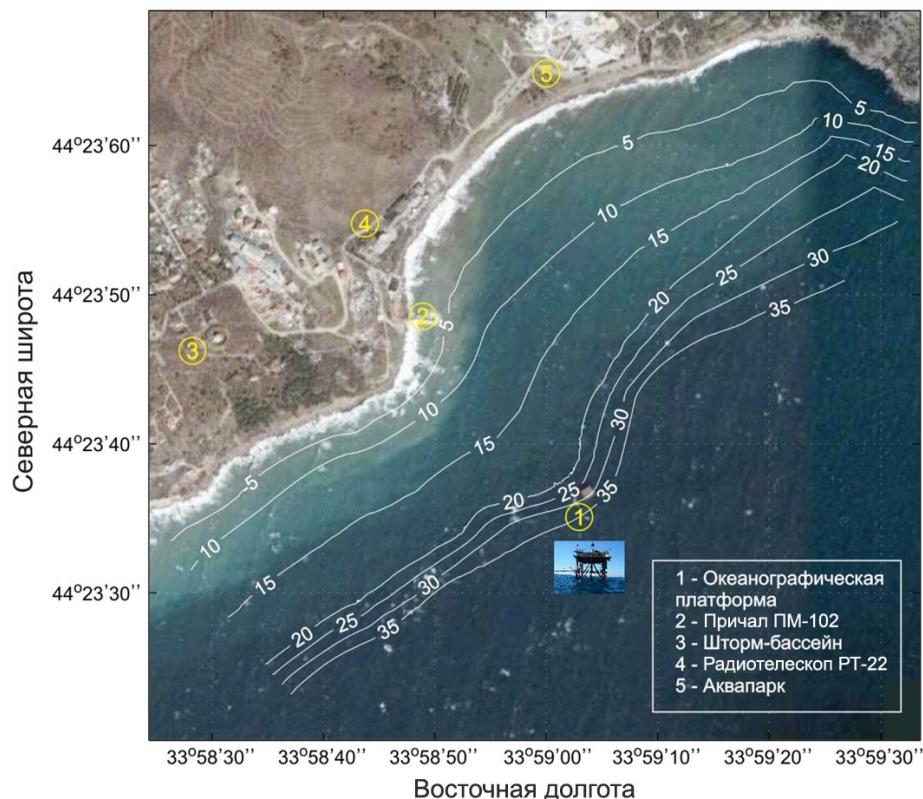


Рис. 5.1. Исследуемая акватория в районе исследовательской платформы в п. Кацивели. Показано расположение платформы относительно берега с обозначением близлежащих объектов и нанесена карта глубин

рений пространственно-временных спектров волнения использовались контактные данные, получаемые с помощью волноизмерительного комплекса на основе решётки струнных волнографов, которые представляют собой набор из шести резистивных волнографов, измеряющих возвышения морской поверхности в точках, расположенных в центре и вершинах пятиугольника. Расстояние от центральной струны до каждой из внешних струн составляет 25 см. Основные технические характеристики этого комплекса:

- максимальная высота измеряемых волн — до 4 м;

- разрешающая способность — не хуже 3 мм;
- количество измерительных каналов — 6;
- частота опроса каналов — 10, 20, 50, 100 Гц.

На рис. 5.2 показана решётка струнных волнографов, установленных на южном борту платформы (а) и принципиальная схема установки (б). На рис. 5.2 (в) приведён разрез исследовательской платформы (со стороны восточной палубы) и показано расположение рабочих палуб с указанием их высот. В ходе экспери-

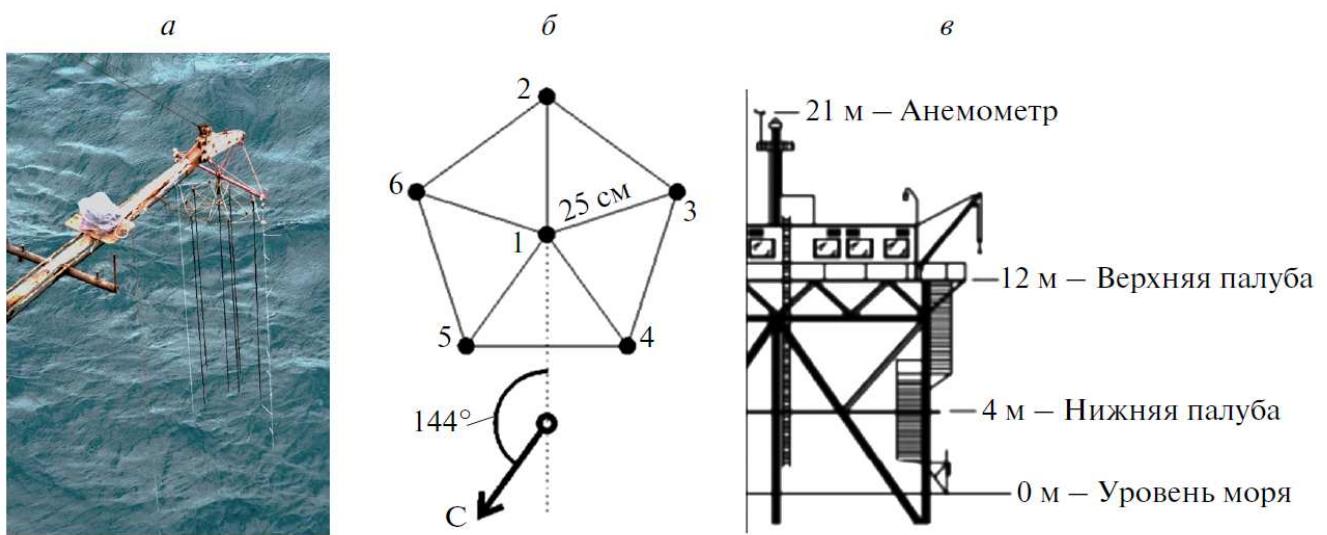


Рис. 5.2. Струнные волнографы на исследовательской платформе в Кацивели: (а) решётка струнных волнографов на южном борту платформы; (б) принципиальная схема установки; (в) расположение рабочих палуб платформы с указанием их высот

ментов первого типа выполнялась специальная космическая съёмка в районе расположения исследовательской платформы с помощью оптико-электронной аппаратуры, высокого пространственного разрешения (0.5 м), установленной на борта космического аппарата GeoEye:

- 24 сентября 2015 г. в 11 часов 52 мин, когда в районе платформы наблюдалось развитое волнение при скорости ветра 10–11 м/с;
- 16 сентября 2015 г. в 12 часов ветровое волнение было слабым при скорости ветра 0–2 м/с, но присутствовали волны зыби.

Полученное космическое изображение обрабатывалось для получения пространственных спектров волнения с помощью специального программного обеспечения, описанного в главе 4.

Акватории, выбранные для адаптации операторов, восстанавливающих спектры поверхностного волнения по спектрам космических изображений при более сложных условиях волнообразования, показаны на рис. 5.4. По данным, полученным в прибрежной акватории в районе поселка Кацивели, показанной на рисунке 5.4, *a*, в условиях ограниченного ветрового разгона морских волн были получены параметры восстанавливающего оператора, как описано в Главе 4. Эти параметры использовались в качестве первой итерации при использовании методики, описанной в разделе 4.3.4. Уточнение параметров восстанавливающего оператора для более сложных условий волнообразования выполнялось с использованием результатов экспериментов, проведенных в тихоокеанских акваториях в районе Гавайских островов. На рис. 5.4, *б* показана также акватория бухты Мамала у острова Оаху (Гавайи), где в течение ряда лет проводились комплексные наземно-космические эксперименты по исследованию антропогенных воздействий на прибрежные акватории. В настоящей работе использовались результаты космической съёмки исследуемого района, которая была выполнена 13–14 сентября 2003 г. с борта спутника QuickBird. Аппаратура спутника имеет пространственное разрешение ≈ 0.6 м и полосу захвата ≈ 16.5 км. В ходе комплексных экспериментов, проведенных в акватории бухты Мамала, была получена серия космических изображений высокого пространственного разрешения и широкий набор данных подспутниковых измерений [43, 44, 169, 221, 251, 252]. Синхронно с космическими съёмками в акватории бухты Мамала проводились подспутниковые измерения метеорологических и гидрофизических параметров морской среды, в том числе скоростей ветра, частотных и частотно-направленных спектров поверхностного волнения. Подспутниковые исследования выполнялись с борта восьми малых судов, с береговых станций и морских метеорологических платформ NOAA. Для измерения возвышений морской поверхности

сти использовались два волномерных буя Directional Waveriders MK II фирмы Datawell. Эти буи имеют сферическую форму, диаметр 0.9 м. Для измерения высот и направления волны, а также вертикального движения, используется акселерометр.

Перед началом измерений буи опускались в воду с борта судна и дрейфовали до момента подъёма на борт. В процессе измерений регистрировались составляющие ускорений буёв по координатам x , y , z в течение определенного промежутка времени (обычно 30 минут). При помощи бортового процессора производилась специальная обработка, и данные по радиоканалу передавались на наземную станцию. Координаты местоположения буёв определялись с помощью GPS.

Двумерные частотно-направленные спектры поверхностного волнения и одномерные частотные, полученные при проведении комплексных экспериментов с помощью волновых буёв, анализировались в диапазоне углов $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ в интервале частот $0.157 \leq \omega \leq 3.644 \text{ c}^{-1}$.

Волновая ситуация в анализируемый период времени может быть охарактеризована следующим образом. Во время эксперимента 14 сентября 2003 г в исследуемой акватории постоянно действовала система волн зыби со средней длиной волны $\lambda_1 \approx 318$ м и система ветровых волн с длиной энергонесущей волны (длине волны, соответствующей максимуму энергетического спектра волнения) $\lambda_2 \approx 35$ м. В волновом поле наблюдаются также короткие волны зыби с длинами $\lambda_3 \approx 80$ м. Обобщённый анализ ветрового режима, влияющего на волнообразование во время комплексного эксперимента, проводился как по данным оптической съёмки с космического аппарата QuickBird, так и по данным исследований с кораблей, наземных станций, по данным спутника QuikSCAT.

На рисунке 5.3 представлена схема ветрового режима в исследуемой акватории. Показаны расположение трассы съёмки относительно Гавайского архипелага, а также данные по ветровому режиму, полученные на наземных станциях в городе Гонолулу в день проведения эксперимента.

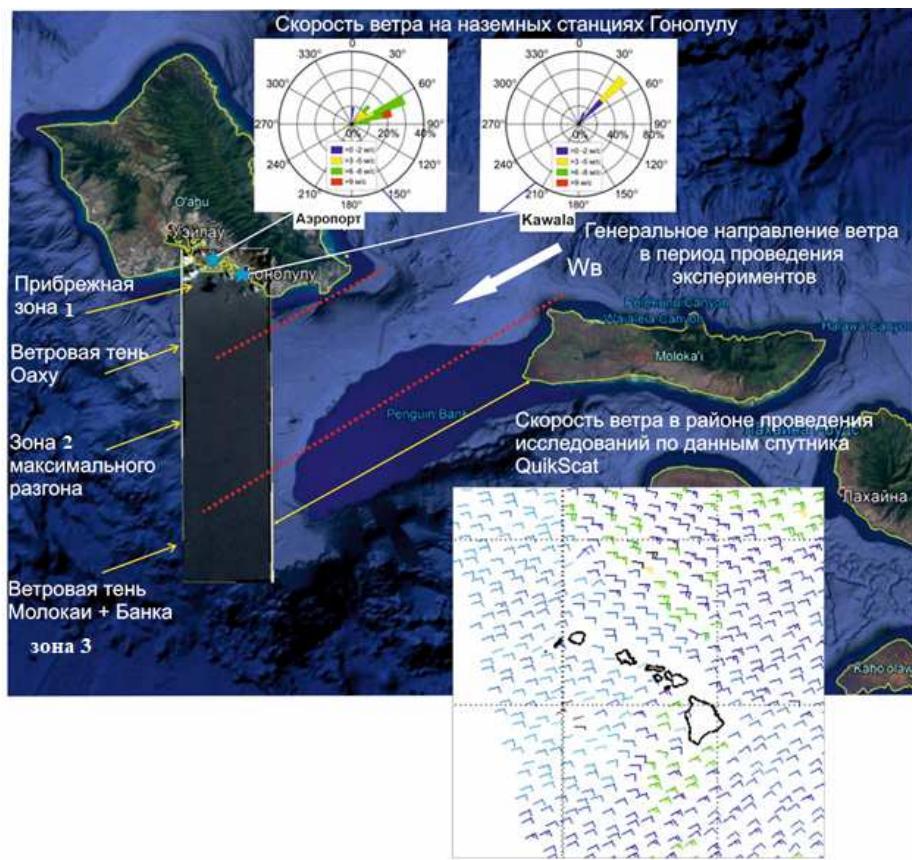


Рис. 5.3. Анализ ветрового режима в районе комплексного эксперимента в акватории бухты Мамала вблизи острова Оаху.

На наземных станциях за несколько минут до момента съёмки со спутника скорость и направление ветра составляли:

- на станции Kawala — скорость ветра ~ 3.6 м/с, а направление 45° ;
- на станции «Аэропорт» — скорость ветра ~ 2.7 м/с, а направление 50° .

Данные о характеристиках ветрового режима, полученные спутником QuikSCAT до съёмки QuickBird, показывают, что к югу от побережья острова Оаху преобладал ветер со скоростью $W_b \sim 5$ м/с и с направлением 80° – 90° . Генеральное направление ветра пред моментом съёмки со спутника QuickBird обозначено белой стрелкой.

При рассмотрении характеристик поля ветра, полученных по данным спутника QuickBird, установлено, что скорость ветра увеличивалась в сторону открытого океана и достигла на удалении от берега ~ 30 км значений 8 – 8.5 м/с.

При этом происходило изменение его направления от $\sim 90^\circ$ до $\sim 35^\circ$.

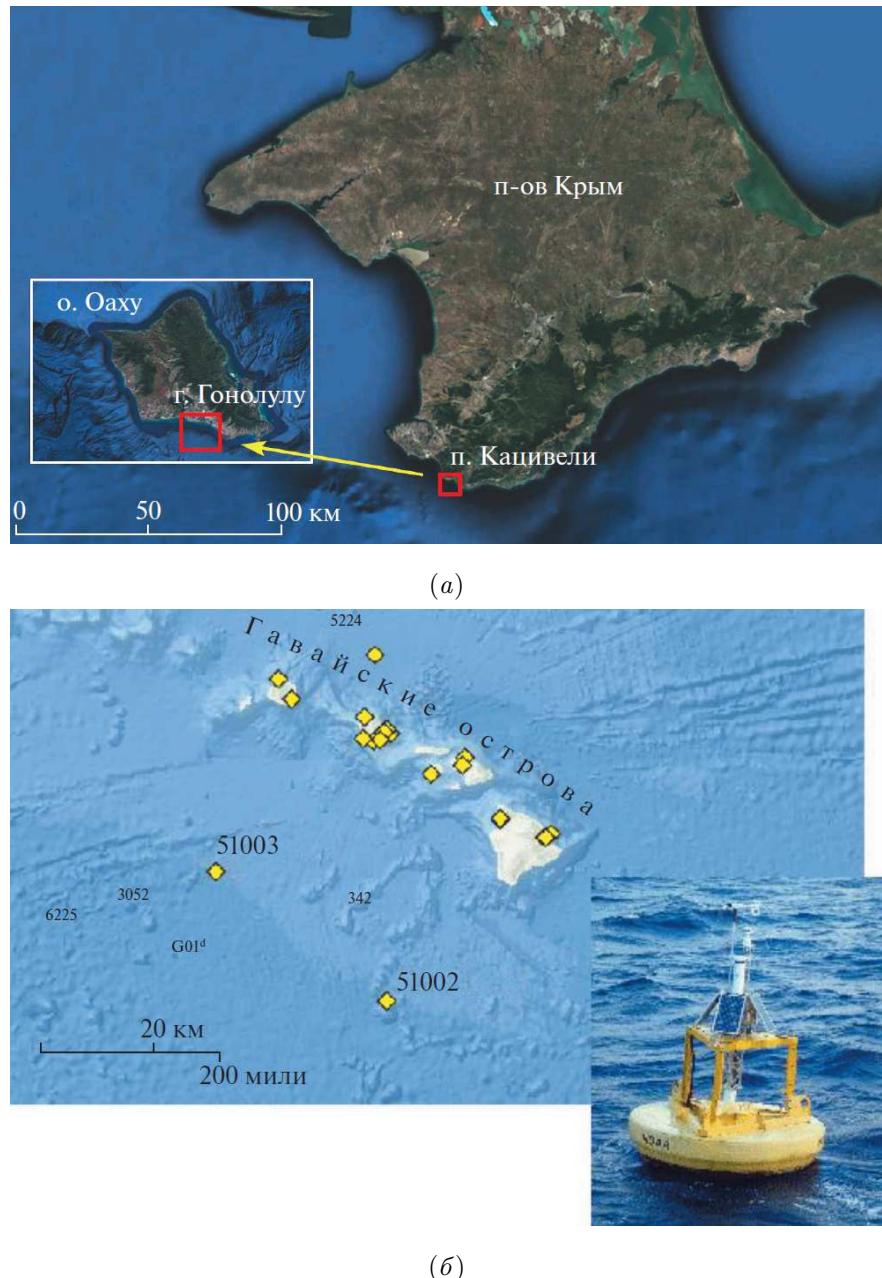


Рис. 5.4. Акватории, где проводились экспериментальные исследования: а — акватории у полуострова Крым и вблизи острова Оаху (Гавайи), где получены первая и вторая итерации параметров восстанавливающего оператора; б — акватория у Гавайских островов, с указанием расположения буйёв и внешний вид этих буйёв

Аналогичные исследования были проведены 8 июня и 28 июля 2019 года с использованием панхроматических оптических космических изображений, полученных с борта спутника «Ресурс-П» с пространственным разрешением 1 м. На рис. 5.4, б показана также акватория Тихого океана на удалении около 400

км от Гавайских островов, с указанием расположения буёв NOAA (жёлтые ромбы), в которой в октябре и ноябре 2019 г. проводилась оптическая съёмка с борта космического аппарата «Ресурс-П», а также внешний вид буёв 51003 и 51002. Во время проведения комплексного эксперимента в исследуемой акватории Тихого океана наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны, так и волны зыби, зародившиеся в близлежащих акваториях. Скорость ветра, измеренная с буя NOAA 51003 (усредненная за 8 мин) в 23:50 GMT составила 7 м/с, а направление ветра составляло 57°. За трехчасовой период (с 20:50 до 23:50 GMT), предшествующий съёмке со спутника «Ресурс-П», колебания скорости ветра составили 6.1–7.2 м/с, а направление ветра изменялось в пределах 56°–80°.

На рисунке 5.21, б представлено поле ветра, построенное по результатам пространственного спектрального анализа космического изображения, полученного со спутника QuickBird. Ближайшие к берегу участки акватории, над которыми измерялась скорость ветра, по данным со спутника QuickBird, расположены в 3–6 км от наземных станций. На этих участках скорость ветра, оцененная по спектрам фрагментов космического изображения QuickBird, составила 4 м/с, а направление ветра — 85°.

5.3. Результаты экспериментов с использованием стационарной исследовательской платформы

5.3.1. Результаты обработки космических изображений

Космическое изображение, полученное со спутника GeoEye с пространственным разрешением 0.5 м, показано на рис. 5.5 (а). На рис. 5.5 (б, д, г) приведены фрагменты космического изображения, используемые для обработки, границы которых показаны на рис. 5.5 (а). Размеры фрагментов: 2048 × 2048 пикселя ($1.024 \times 1.024 \text{ км}^2$) (рис. 5.5 (б)); 1024 × 1024 пикселов ($0.512 \times$

0.512 км^2) (рис. 5.5 (д); 512×512 пикселов ($0.256 \times 0.256 \text{ км}^2$) (рис. 5.5 (з)). На рис. 5.5 (в, е, и) приведены двумерные пространственные спектры этих фрагментов.

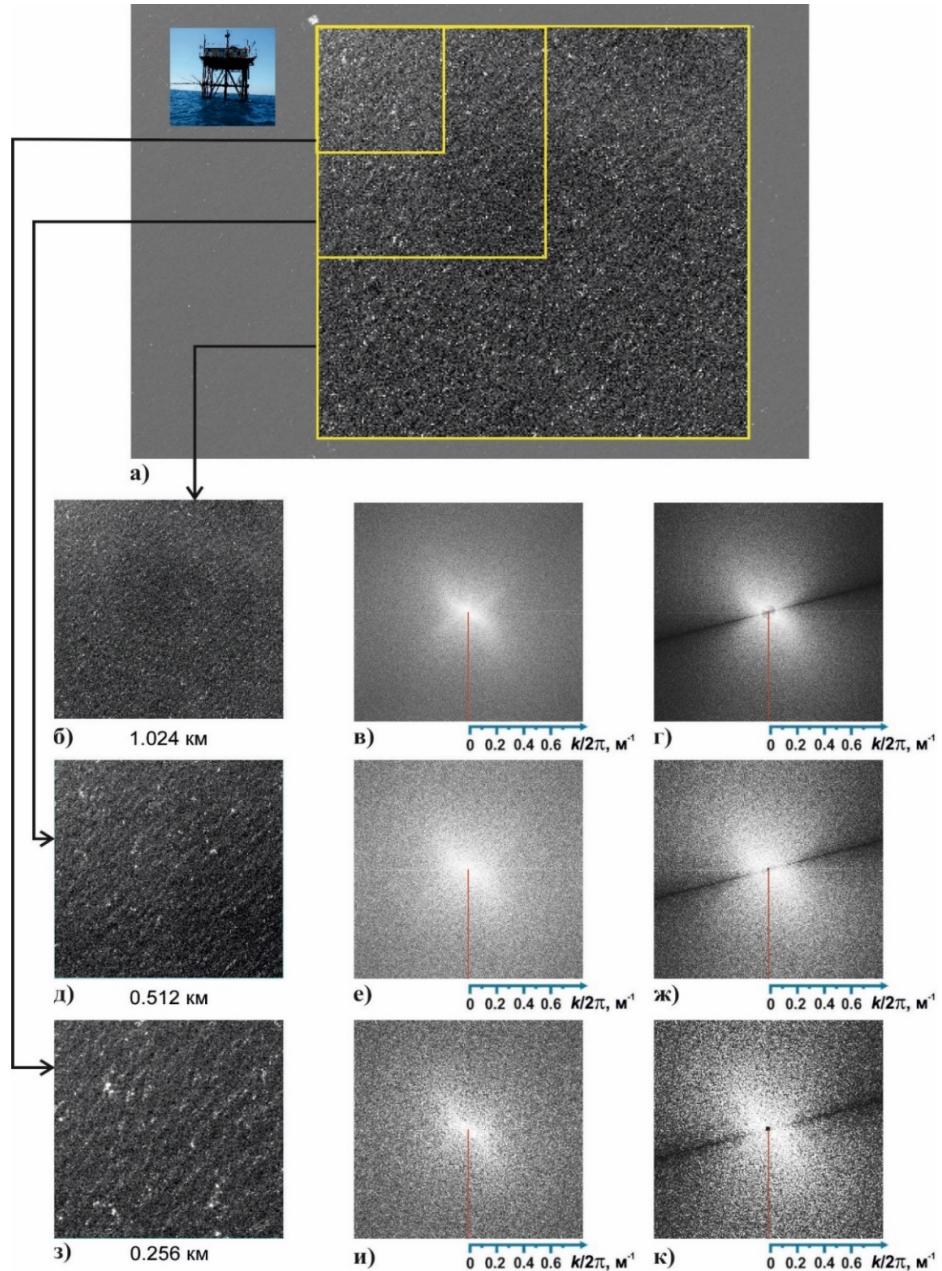


Рис. 5.5. Результаты обработки спутникового изображения, полученного в районе исследовательской платформы: а) исходное изображение; б), д), з) выделенные фрагменты различных размеров ; в), е), и) пространственные спектры фрагментов; г), ж), к) восстановленные спектры уклонов морского волнения

В соответствии с методом, описанным в Главе 4, для получения пространственных спектров уклонов и возвышений морской поверхности использован

восстанавливающий оператор \mathbf{R} , построенный путём численного моделирования с учётом нелинейной модуляции поля яркости уклонами поверхности. Оператор представлен в виде пространственно-частотного фильтра 4.50, построенного как отношение спектра уклонов морской поверхности $\Phi(\mathbf{k})$, синтезированной численным методом [111], к спектру модельного оптического изображения $S(\mathbf{k})$, полученного при заданных условиях формирования регистрируемого поля яркости. При моделировании использовались параметры, соответствующие условиям получения спутникового изображения в проведённом эксперименте (скорость ветра 10 м/с, зенитный угол и азимут Солнца 46° и 165° соответственно, пространственное разрешение 0.5 м). На рис. 5.5 (в, е, и) приведены пространственные спектры фрагментов космического изображения, а на рис. 5.5 (г, ж, к) — пространственные спектры уклонов морских волн, восстановленные с использованием построенного оператора.

5.3.2. Спектры волнения по данным решётки струнных волнографов

Частотные спектры волнения были получены путём обработки данных решётки струнных волнографов методом Вэлша [354]. Обработка заключалась в осреднении спектров, построенных по наполовину перекрывающимся отрезкам реализаций по получасовым отрезкам записей, так что 95-процентный доверительный интервал для спектрального уровня составил 16% [260, 363]. На рис. 5.6 показан частотный спектр волнения $S(f)$, характерный для первой половины дня 24 сентября 2015 г. Нормировка спектра проводилась с помощью измерения дисперсии возвышений. Нормированный спектр должен обеспечить совпадение с этой дисперсией при интегрировании по частотам. На спектре выделяются две волновые системы – зыбь с частотой пика около 0.2 Гц и развивающиеся ветровые волны с частотой пика, превышающей 0.3 Гц. Разделение волн на две системы проведено согласно подходу, описанному в работе [233]. Подход основан на теории равновесного спектрального интервала Филлипса [141].

Чтобы пояснить подход, на графике рис. 5.6 прерывистые линии соотв-

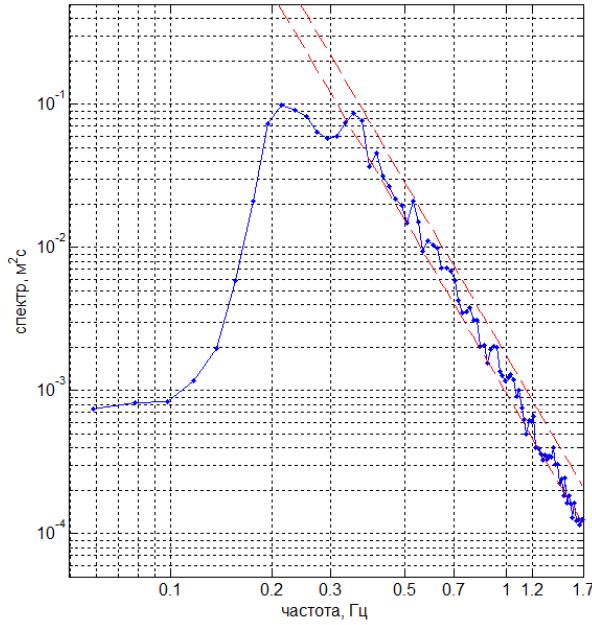


Рис. 5.6. Частотный спектр волн для интервала времени 9:30-10:00 24 сентября 2015 г.

ствуют известной аппроксимации спектра Тоба для этого интервала [338].

$$S(\omega) = \alpha g u_* \omega^{-4}, \quad (5.8)$$

где $\omega = 2\pi f$; u_* — динамическая скорость (или скорость трения) — параметр, служащий мерой передачи импульса от ветра волнам [141, 338]; α — эмпирический коэффициент, значения которого заданы 0.06 и 0.11 для двух линий.

Согласно [318], частотный спектр волновой системы, связанной с локальным ветром, в области справа от её спектрального пика должен лежать в пределах полосы, образованной этими линиями. Именно такая картина видна на рис. 5.6. Отметим, что для применения описанного подхода уровень спектра Тоба [338] достаточно знать лишь приближенно. Поэтому величина динамической скорости u_* оценивалась по измеренной скорости ветра U согласно аэродинамической формуле [338]

$$u_* = \sqrt{C_D} U,$$

где коэффициент сопротивления был принят равным $C_D = 1.5 \cdot 10^{-3}$.

Пунктирные линии показывают пределы, в которых должен лежать спектр развивающихся ветровых волн.

Рис. 5.7 иллюстрирует временную эволюцию частотных спектров для получасовых интервалов осреднения за три часа, предшествующих пролёту спутника (11 часов 52 мин LT). Сравнение рис. 5.6 и рис. 5.7 свидетельствует о развитии ветровых волн — росте их энергии и понижении частоты спектрального пика. При этом система волн зыби оставалась доминирующей.

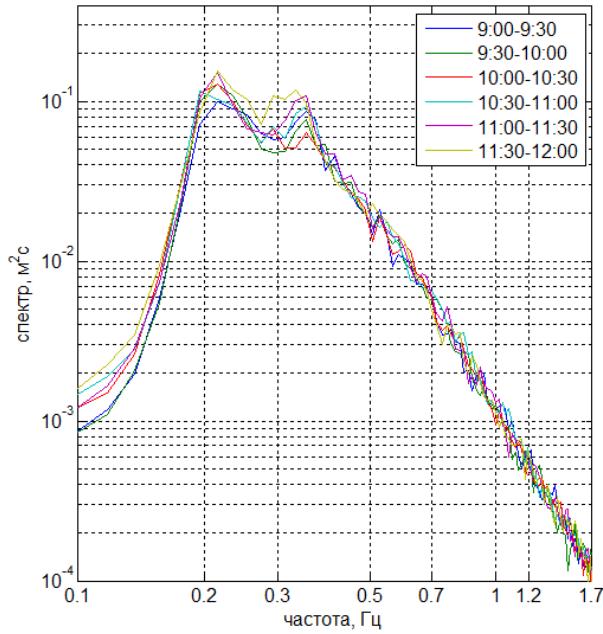


Рис. 5.7. Частотные спектры волн с 9:00 до 12:00 24 сентября 2015 г.

5.3.3. Сопоставление спектров морского волнения, полученных по спутниковым изображениям и данным струнных волнографов

При сопоставлении спектров морского волнения, полученных по спутниковым и контактным данным, прежде всего должен быть проведён пересчёт получаемых спектров в единую базовую систему спектральных координат, следя подхому, описанному выше. В данном случае в качестве базовой независимой спектральной переменной удобно взять частоту ω , поскольку контактные данные получены в виде зависимости возвышений морской поверхности от времени. При этом со спутниковым выполняются следующие вычислительные операции [28, 29]:

- расчёт пространственного спектра выделенного фрагмента изображения $S(k)$;
- восстановление спектра уклонов $\Phi_\varphi(k)$ с использованием восстанавливающего оператора \mathbf{R} , построенного для комплекса условий получения космического изображения;
- расчёт пространственного спектра возвышений $\chi(k)$ по восстановленному спектру уклонов в заданном диапазоне волновых азимутов (± 60 угловых градусов относительно азимута Солнца) по формуле (5.5);
- пересчёт в частотный спектр с учётом дисперсионного соотношения гравитационных волн по формуле, обратной формуле (5.4):

$$\psi_{cn}(\omega) = \chi(k(\omega)) \frac{dk(\omega)}{d\omega}. \quad (5.9)$$

На рис. 5.8 представлены результаты совместного анализа спектров морского волнения, полученные по спутниковым и контактным данным. На рис. 5.8 (а) приведён двумерный пространственный спектр уклонов, восстановленных по пространственному спектру космического изображения, а на рис. 5.8 (б) – одномерный пространственный спектр возвышений, полученный по спутниковым данным. На рис. 5.8 (в) совмещены частотные спектры возвышений, полученные при обработке космического изображения с учётом дисперсионного соотношения и формулы (5.9), а также данные решётки струнных волнографов. Кроме этого приведена аппроксимация Тоба (5.8) для частотного спектра волнения [338]. Анализ рис. 5.8 (в) свидетельствует о хорошем совпадении спектров волнения, полученных по спутниковым и контактным данным, а также с аппроксимацией Тоба. Для оценки близости спектров вычислялась мера расхождения

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(1 - \frac{\psi_{\text{сп}}(\omega_n)}{\psi_{\text{кон}}(\omega_n)} \right)^2}, \quad (5.10)$$

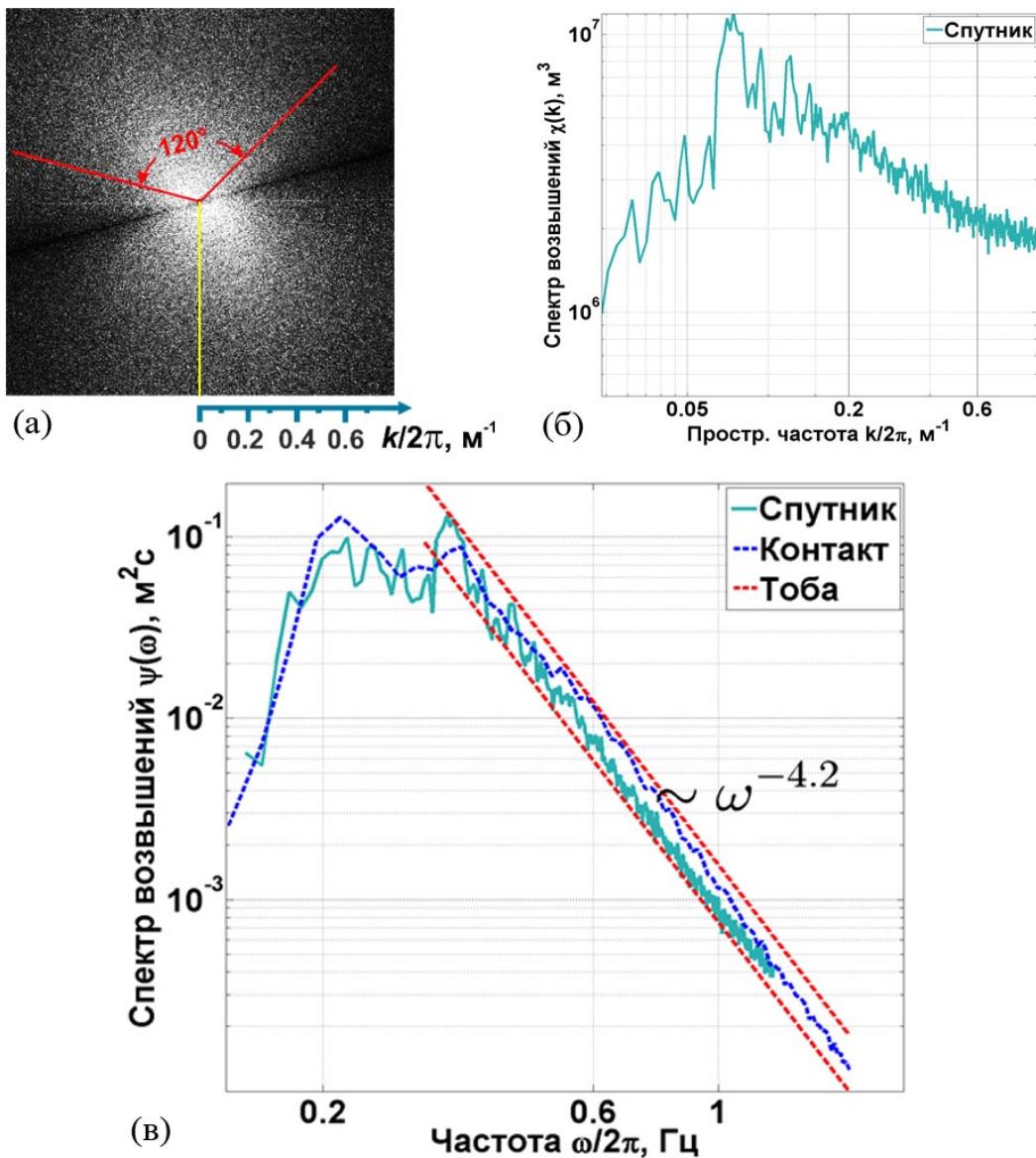


Рис. 5.8. Сопоставление спектров морского волнения, измеренных по спутниковым и контактным данным, а также с аппроксимацией Тоба: (а) двумерный спектр уклонов морской поверхности, восстановленный по спутниковому изображению; (б) одномерный пространственный спектр возвышений; (в) совмещение частотных спектров морской поверхности, измеренных по спутниковому изображению, с помощью решётки волнографов и по аппроксимации Тоба [338]

где $\psi_{\text{сп}}$, $\psi_{\text{кон}}$ — спектры, полученные, соответственно, по спутниковым и контактным данным.

Для эксперимента, проведённого 24 сентября 2015 г., мера расхождения составила $\Delta \approx 0.07$. Это свидетельствует об адекватности определения спектров волнения по космическим изображениям высокого пространственного разреше-

ния.

5.3.4. Модификация восстанавливающего оператора для исследований волнения в широком диапазоне пространственных частот

Важное значение имеют результаты экспериментальных исследований, проведенных для валидации метода восстановления спектров морского волнения для широкого набора условий волнообразования с использованием модифицированного восстанавливающего оператора, описанного в разделе 4.4.1.

Операторы, восстанавливающие спектры уклонов морской поверхности при заданных условиях формирования сигнала, учитывают известные физические механизмы нелинейных искажений спектров уклонов морской поверхности [38, 111, 112]. Для аналитической аппроксимации восстанавливающего оператора в форме пространственно-частотного фильтра $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ используется функция (4.60) [28, 29]. Представление вида (4.60) позволяет изучать изменчивость показателей степенных спектров уклонов морской поверхности для различных направлений распространения волн. Значения параметров в формуле (4.60) a_1, a_2, a_3 характеризуют область высоких пространственных частот, где наблюдается степенное спадание пространственного спектра волн. Они позволяют учитывать искажения показателей степенных аппроксимаций спектров уклонов морского волнения для различных направлений распространения волн. При этом: a_1 — компенсирует нелинейные искажения показателя степенной функции спектра волнения для направления, которое соответствует горизонтальной проекции градиента интенсивности света, падающего на морскую поверхность; a_2 — определяет угловую зависимость показателя степенной функции спектра волнения; a_3 — определяет угловую зависимость спектральной энергии. Для типичных условий спутниковой съёмки высокого разрешения при различных положениях Солнца значения этих параметров были получены впервые методом численного моделирования физических процессов формирования оптических изображений волн-

нения [38, 111, 112]. Параметры a_4 , a_5 , описывают восстанавливающий фильтр в области низких пространственных частот [29]. Спектры морского волнения в различных стадиях волнообразования имеют степенной закон спадания [76]. Этот закон сохраняется в широком диапазоне пространственных частот [130]. Поэтому при обработке аэрокосмических изображений принципиальное значение имеет знание параметра a_1 . Этот параметр позволяет восстановить точное значение показателя степенного спадания спектров волнения вплоть до верхних границ диапазона пространственных частот, регистрируемых на космических изображениях для различных направлений распространения волн.

Принимая во внимание сохранение степенного закона спадания спектра, можно экстраполировать спектры в области более высоких частот в виде степенной функции с тем же показателем. Таким образом появляется возможность получать пространственные спектры морских волн за пределами диапазона пространственных частот, доступных на космических изображениях. Фактически это означает, что применение восстанавливающего оператора с достоверным значением параметра a_1 эквивалентно повышению пространственного разрешения космического изображения морской поверхности. Результаты экспериментальной проверки адекватности восстановления высокочастотного спектра описаны в разделе 5.4.

В процессе исследований использованы результаты подспутниковых измерений частотных спектров возвышений морской поверхности с помощью решётки струнных волнографов, полученные в ходе экспериментов, проведённых в акватории Чёрного моря в районе пос. Кацивели со стационарной исследовательской платформы. В ходе этих экспериментов были получены космические изображения исследуемой акватории с помощью оптической аппаратуры спутника GeoEye с пространственным разрешением 0.5 м. Эксперименты первого типа проводились при различных условиях: 16 сентября 2012 г. в условиях слабого ветрового волнения (скорость ветра W_v от 0 до 2 м/с) в присутствии волн зыби; 24 сентября 2015 г. в условиях развитого ветрового волнения

при скорости ветра $W_{\text{в}} = 10 - 11 \text{ м/с}$.

На рис. 5.9 (а) и рис. 5.10 (а) представлены примеры фрагментов спутниковых изображений исследуемой акватории с размерами 2048×2048 пикселов (1024×1024 метров). На рис. 5.9 (в, г) и рис. 5.10 (в, г) показаны полученные двумерные пространственные спектры $S(\mathbf{k})$ фрагментов этих изображений для двух диапазонов пространственных частот $\Delta\nu = 0 - 0.5m^{-1}$ и $\Delta\nu = 0 - 0.15m^{-1}$, где $\nu = k/2\pi$. На рис. 5.9 (б) и рис. 5.10 (б) приведены соответствующие частотные спектры возвышений морской поверхности, полученные решёткой струнных волнографов за тридцатиминутный период измерений, включающий момент получения спутникового изображения. Анализ рис. 5.9 (в, г) и рис. 5.10 (в, г) показывает, что в области низких пространственных частот (в центральной части рисунков) присутствуют пиксели, имеющие высокую интенсивность по сравнению с другими пикселями изображения пространственных спектров. Такая картина имеет расхождение с результатами контактных измерений (см. рис. 5.9 (б), рис. 5.10 (б)). На рис. 5.11 представлены результаты восстановления спектров уклонов и возвышений ветрового волнения для фрагмента космического изображения, приведённого на рис. 5.9 (а), с применением двух восстанавливающих операторов: оператора $R(\mathbf{k}) = R_{hi}(\mathbf{k})$, построенного по формуле (4.50) без адаптации к низким частотам и модифицированного восстанавливающего оператора $R_{mod}(\mathbf{k})$, построенного по формуле (4.60), действующего в широком диапазоне пространственных частот. На рис. 5.11 (а, б) показаны двумерные спектры уклонов, восстановленные по спектру фрагмента спутникового изображения, приведённого на рис. 5.11 (а) восстанавливающим оператором $\mathbf{R}_{hi}(\mathbf{k})$, для двух диапазонов пространственных частот. На рис. 5.11 (в) приведены результаты сопоставления восстановленного одномерного частотного спектра возвышений, полученного из двумерного пространственного спектра уклонов, приведённого на рис. 5.11 (а) в угловом секторе $\pm 70^0$ относительно направления ϕ_C , со спектром возвышений, измеренным решёткой струнных волнографов. Анализ рис. 5.11 (в) показывает, что при ис-

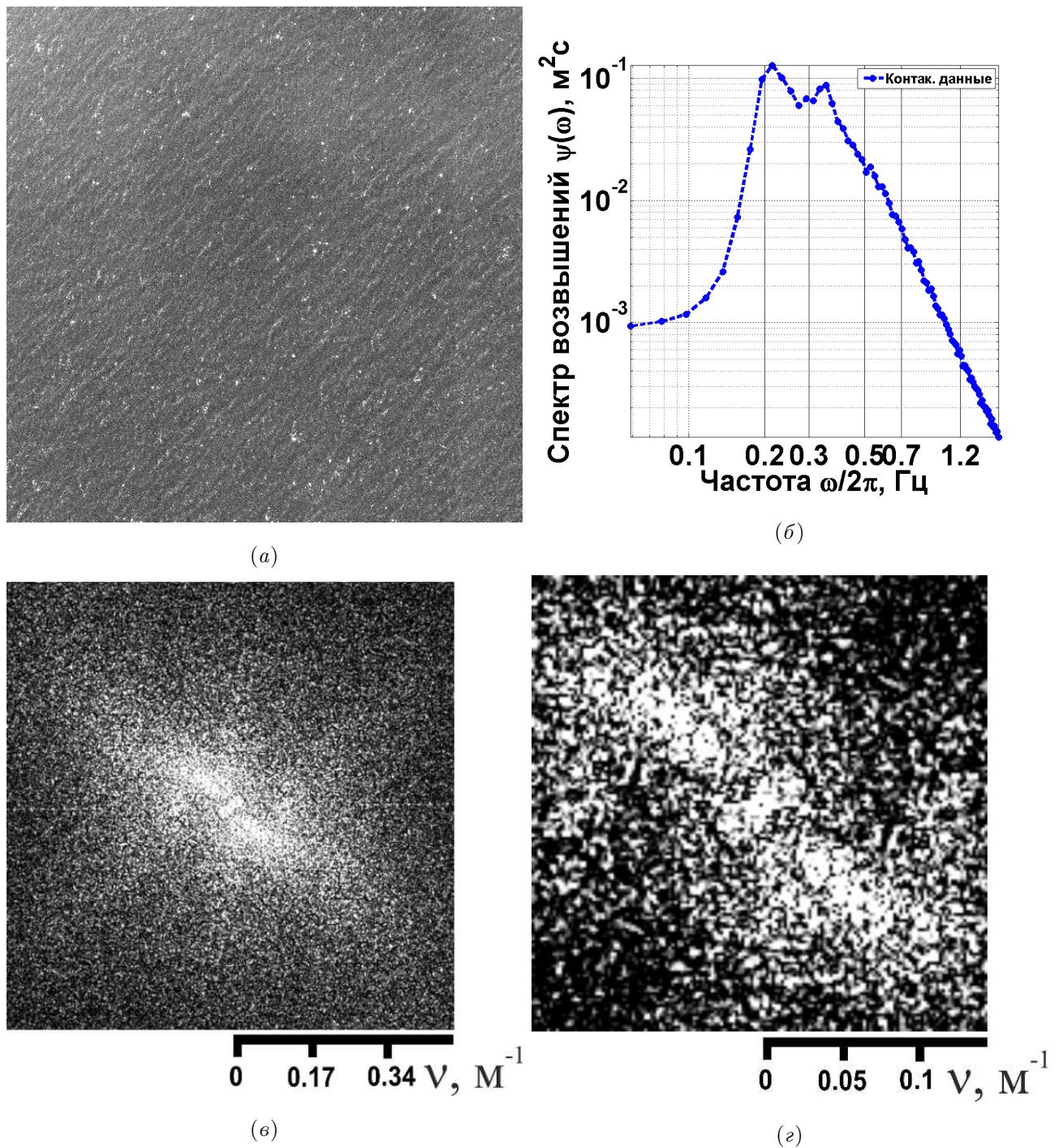


Рис. 5.9. Результаты комплексного эксперимента, проведенного в условиях развитого ветрового волнения при скорости ветра 10–11 м/с; (а) фрагмент космического изображения морской поверхности; (б) частотный спектр возвышений морской поверхности, полученный решёткой струнных волнографов; (в), (г) пространственные спектры фрагмента изображения для двух интервалов пространственных частот

пользовании восстанавливающего оператора $R_{hi}(k)$ наблюдаются сильные искажения в области низких пространственных частот, проявляющиеся в усилении

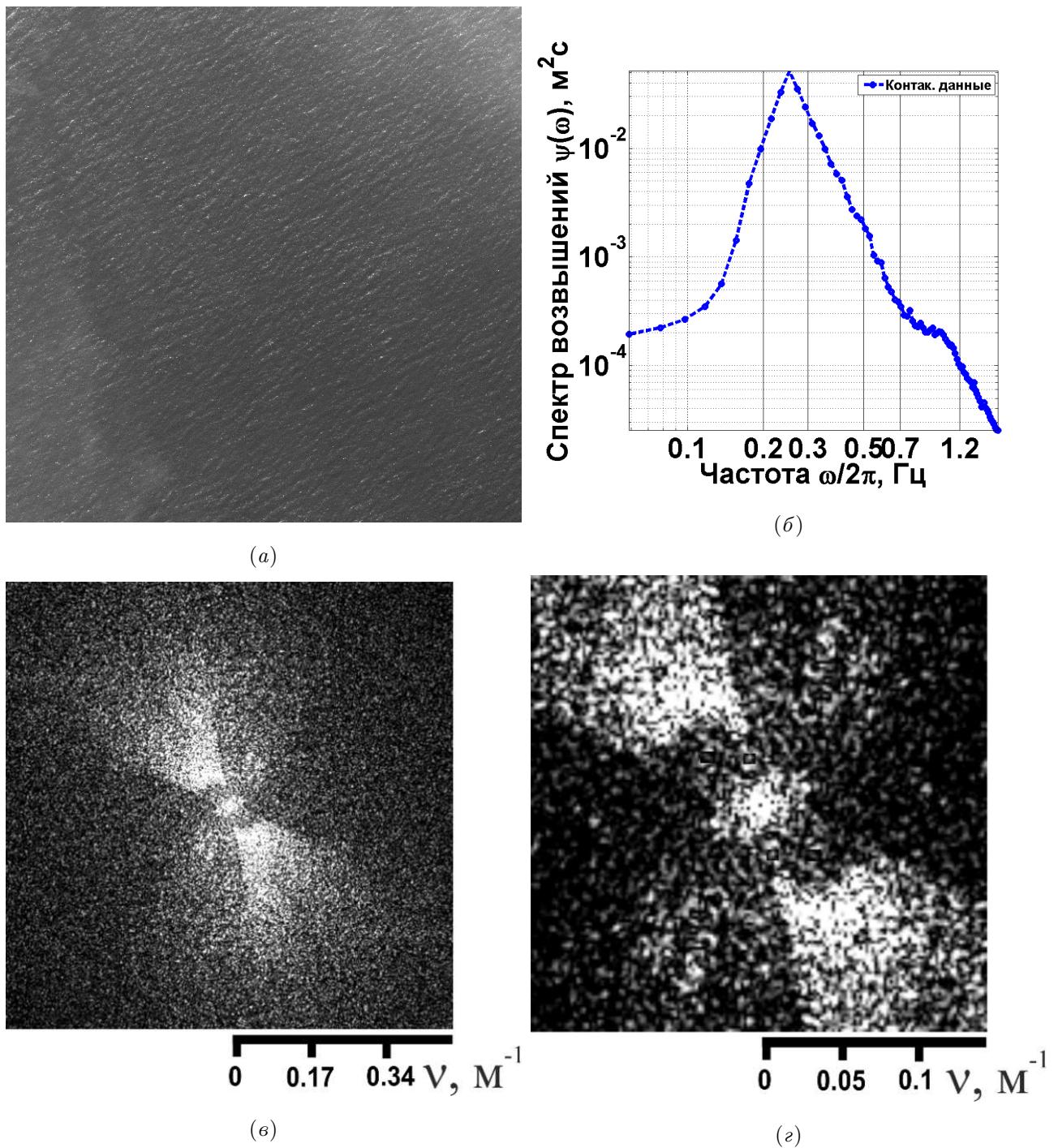


Рис. 5.10. Результаты комплексного эксперимента, проведенного при скорости ветра $0 - 2$ м/с в присутствии волн зыби; (а) фрагмент спутникового изображения морской поверхности; (б) частотный спектр возвышений морской поверхности, полученный решёткой струнных волнографов; (в), (г) пространственные спектры фрагмента спутникового изображения для двух интервалов пространственных частот

интенсивности спектра. На рис. 5.11 (г) приведён двумерный пространственный спектр уклонов, восстановленный по фрагменту рис. 5.9 (а) с использованием

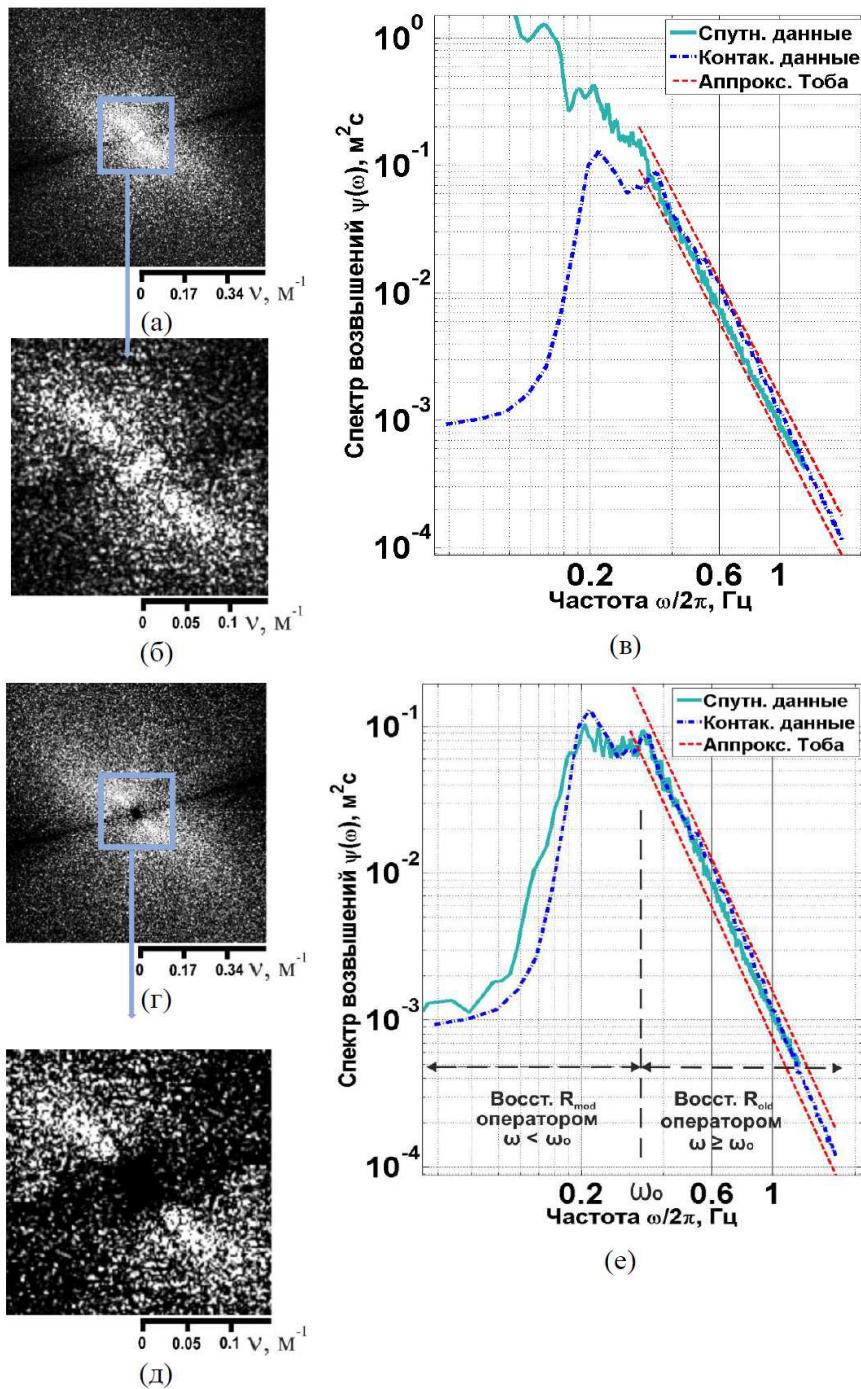


Рис. 5.11. Сопоставление спектров ветрового волнения, восстановленных по спектрам космического изображения с данными струнных волнографов: (а, б) двумерный спектр уклонов, в двух интервалах пространственных частот; (в) сопоставление одномерных частотных спектров возвышений, полученных различными методами; (г) двумерный пространственный спектр уклонов, восстановленный модифицированным восстанавливающим оператором; (д) двумерный пространственный спектр возвышений, полученный из центральной части двумерного спектра уклонов (г); (е) сопоставление одномерных частотных спектров возвышений, полученных различными методами. Пунктирные линии — аппроксимация Тоба [338]

модифицированного восстанавливающего оператора $R_{mod}(\mathbf{k})$ с оптимальными значениями параметров, которые составляют $\alpha^* = -0.8$, $\beta^* = -0.3$. Двумер-

ный спектр возвышений, полученный из центральной части спектра уклонов, приведённого на рис. 5.11 (г), показан на рис. 5.11 (д).

Сопоставление одномерного частотного спектра возвышений, полученного из двумерного спектра уклонов, приведённого на рис. 5.11 (г) в угловом секторе 70° относительно направления φ_C , с частотным спектром возвышений, измеренным решёткой струнных волнографов (см. рис. 5.11 (е)) показывает, что достигается их хорошее совпадение, а низкочастотные искажения, имеющиеся на рис. 5.11 (в), устраняются. Мера различия одномерных частотных спектров, рассчитанная по формуле (4.58) составляет 0.08, что свидетельствует о хорошем соответствии спектров измеренных дистанционным и контактным методами. На рис. 5.11 (в, е) приведена также аппроксимация Тоба (5.8) для интервала равновесия частотного спектра морского волнения [338].

На рис. 5.12 приведены результаты сопоставления спектра возвышений морской поверхности, восстановленного по спутниковому изображению, полученному 12 сентября 2012 г. в 12:06 местного времени с помощью оптической аппаратуры спутника GeoEye (см. рис. 5.9 (б)) с применением модифицированного оператора R_{mod} , со спектром возвышений, измеренным решёткой струнных волнографов, при слабом ветре в присутствии волн зыби. Для сопоставления использовались результаты контактных измерений, выполненных в этот день с 12:00 до 12:30. В момент получения спутникового изображения скорость ветра была близка к нулю, а в течение получаса, когда велась волнографическая запись, скорость ветра изменялась от 0 до 2 м/с.

Вид двумерных пространственных спектров уклонов для двух диапазонов пространственных частот, восстановленных оператором \mathbf{R}_{mod} , показан на рис. 5.12 (а, б). Одномерный частотный спектр возвышений $\psi^{\text{дист}}(\omega)$ в области низких частот, восстановленный с использованием модифицированного оператора R_{mod} , хорошо соответствует спектру, измеренному решёткой струнных волнографов (см. рис. 5.9 (в)). Мера различия этих спектров составляет 0.12.

Таким образом, анализ рис. 5.11 и рис. 5.12 показывает использование мо-

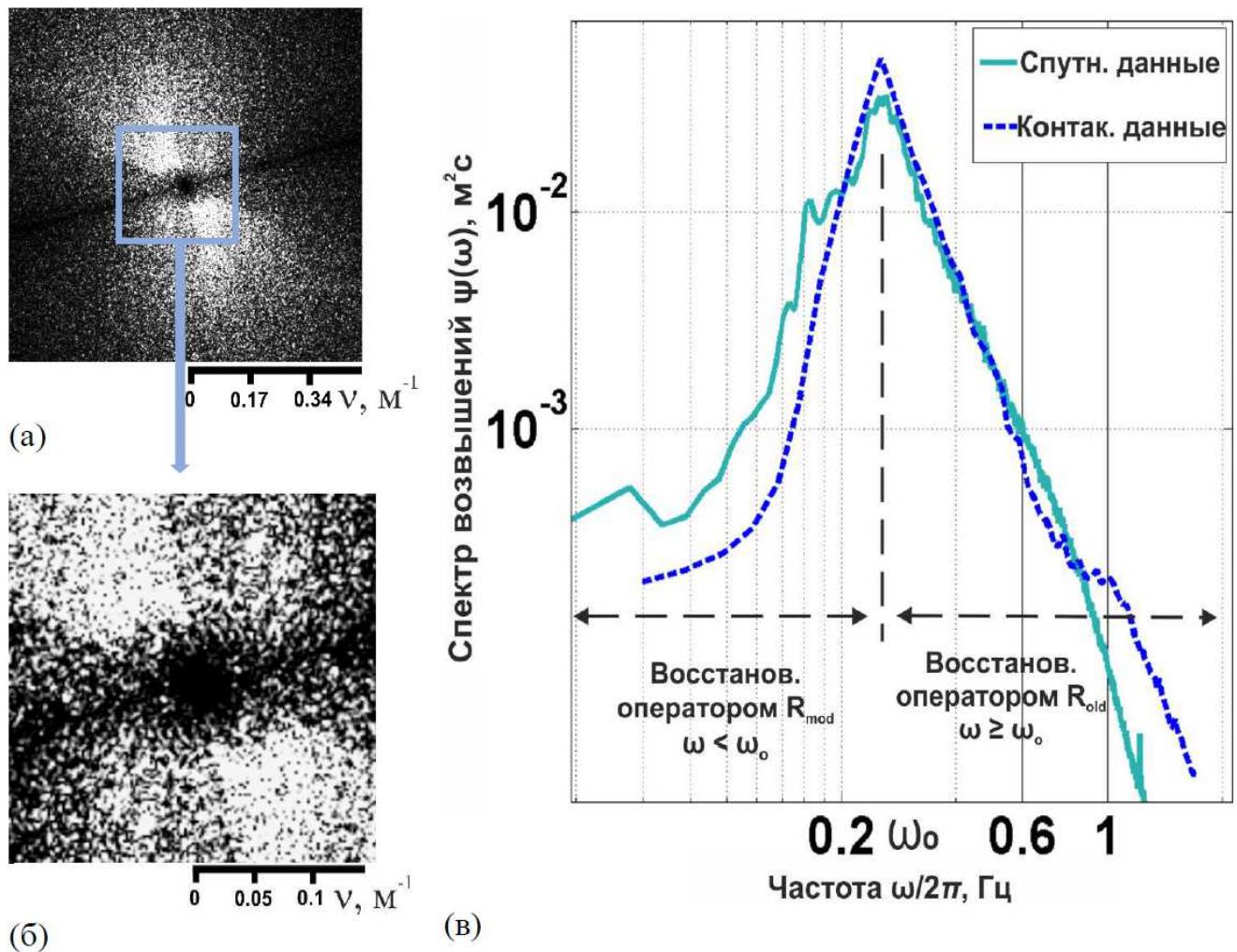


Рис. 5.12. Сопоставление спектров морского волнения в присутствии волн зыби, восстановленных по спутниковым изображениям модифицированным оператором R_{mod} , с данными струнных волнографов: (а, б) спектр уклонов, восстановленный по фрагменту спутникового изображения для двух диапазонов пространственных частот; (в) сопоставление одномерного частотного спектра возвышений, полученного из двумерного спектра уклонов, и измеренного решёткой струнных волнографов

дифицированного восстанавливающего оператора $R_{mod}(k)$ с оптимальными значениями параметров α^* , β^* , позволяет адекватно восстанавливать спектры волнения по спектрам спутниковых изображений.

5.3.5. Результаты восстановления углового распределения энергии волн

Для валидации метода восстановления углового распределения энергии волн по одиночному спутниковому изображению, описанному разделе 4.4.2 использовались результаты комплексного эксперимента, который проводился в сентябре 2021 г. в акватории Черного моря [171]. В ходе проведения этого эксперимента 20 сентября 2021 г. была выполнена съёмка исследуемой акватории с высоким пространственным разрешением (около 0.4 м) со спутника WorldView-3 . Подспутниковые измерения выполнялись с Черноморской исследовательской платформы Морского гидрофизического института РАН [27, 171].

На рис. 5.13, *a* представлен фрагмент используемого спутникового изображения с исследовательской платформой, где проводились комплексные эксперименты. Азимутальный угол Солнца при съемке составлял 157.5 градуса, а угол возвышения 44.5 градусов. Для восстановления спектров волнения использовались квадратные участки фрагмента спутникового изображения со сторонами 1024, 2048, 4096 и 8192 пикселов (см. рис. 5.13, *в*). На рис. 5.13, *г* показано сглаженное развёрнутое угловое распределение волн , полученное при обработке данных решётки струнных волнографов, установленных на платформе [27, 171].

Восстановление углового распределения энергии волн по фрагментам спутникового изображения, приведённым на рис. 5.13, *в* выполнялось с помощью разработанного метода, описанного в разделе 4.4.2. Результат восстановления показан на рис. 5.14, *а*. Для сравнения на рис. 5.14, *б* показано углового распределения энергии волн, полученное путём пересчёта из развёрнутого распределения с рис. 5.13, *г*. Визуальное сравнение углового распределения энергии волн, полученного при использовании разработанного метода восстановления по спутниковому изображению с угловым распределением, полученным по данным решётки струнных волнографов, демонстрирует их хорошее качественное соответствие. Ниже в настоящем разделе приведены результаты количественно-

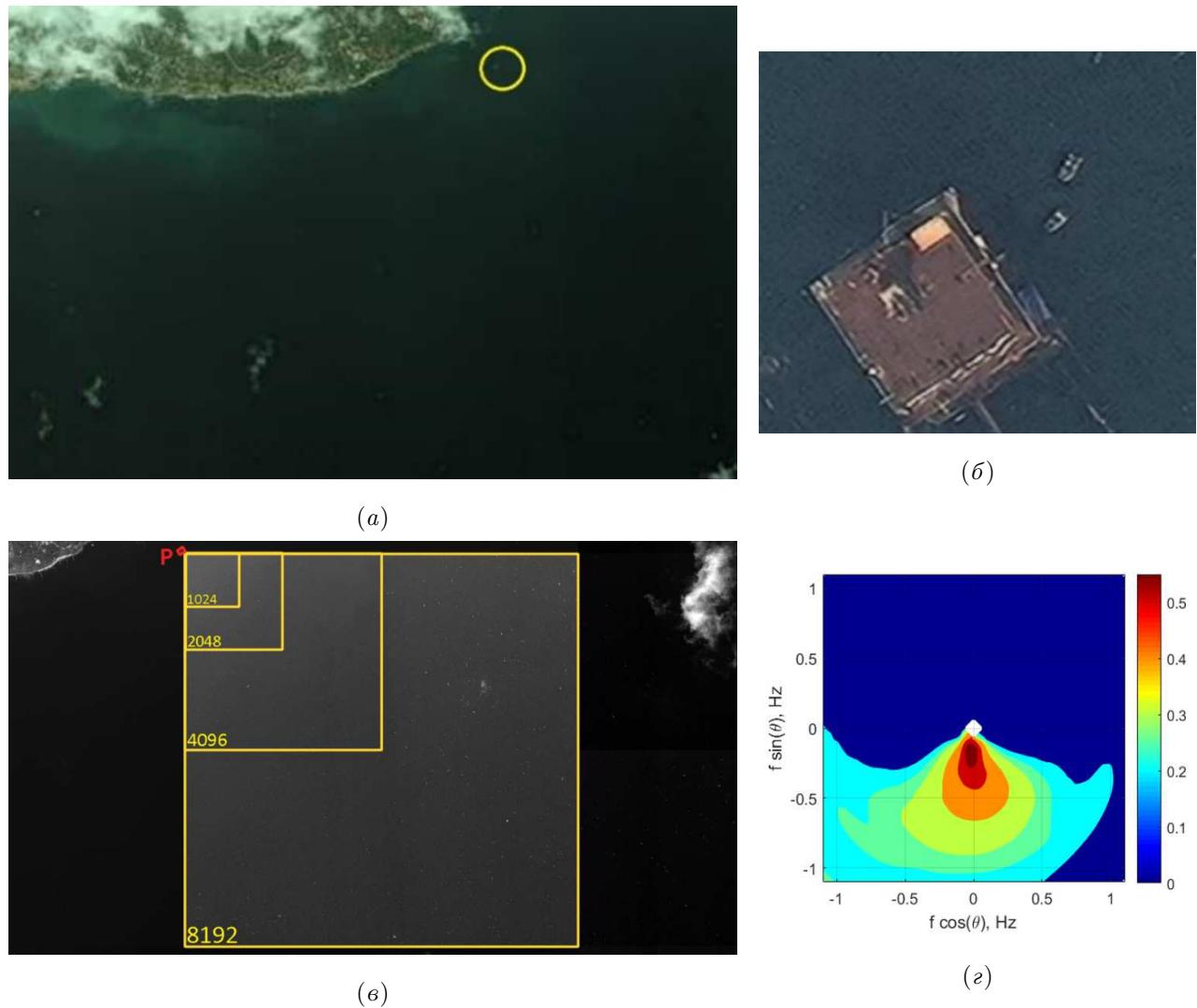


Рис. 5.13. Эксперимент 20.09.2021: (а) Фрагмент общего вида спутникового изображения Желтым выделено положение исследовательской платформы; (б) увеличенное изображение платформы; (б) частотный спектр возвышений морской поверхности, полученный решёткой струнных волнографов; (в) Фрагмент тестового изображения с выделением фрагментов (г) угловое распределение по данным решётки струнных волнографов

го сопоставления этих характеристик с использованием специальных мер сходства.

Для более детального анализа соответствия результатов дистанционных и контактных измерений двумерных угловых распределений энергии, приведенных на рис. 5.14, выполнено сопоставление одномерных разрезов этих распределений для морских волн различной длины. Длины волн, для которых строились разрезы, отмечены полуокружностями на рис. 5.14, а, рис. 5.14, б. Результаты

такого сопоставления приведены на рис. 5.15, где представлены одномерные разрезы угловых распределений для различных длин Λ от 2.6 м до 28.4 м. Разрезы, восстановленные по спектрам фрагментов спутникового изображения, показаны красными линиями, а разрезы, измеренные по данным струнных волнографов показаны синими линиями.

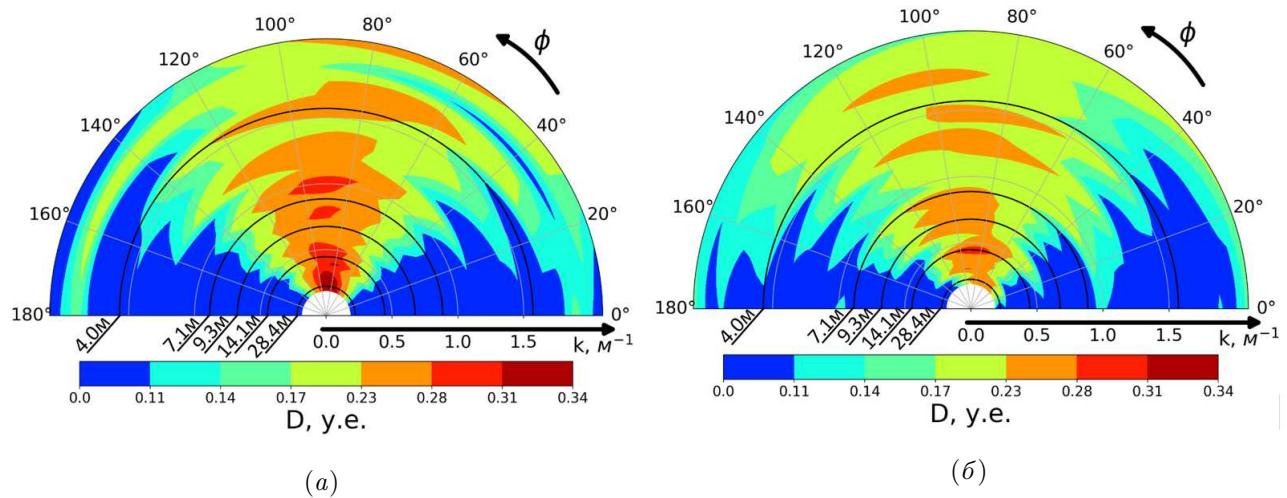


Рис. 5.14. Сопоставление результатов измерений двумерных спектров волнения по спутниковым и подспутниковым данным: (а) угловое распределение энергии морских волн, восстановленное по спектру фрагмента спутникового изображения; (б) свёрнутое угловое распределение энергии морских волн, построенное по данным подспутниковых измерений

Для численного сравнения угловых распределений, полученных при обработке контактных данных и восстановленных по фрагментам спутникового изображения, полученного вблизи морской платформы, использовалась величина среднего модуля относительной ошибки [171]

$$M(\Psi_c, \Psi_d) = E \left[\left| 1 - \frac{\Psi_d}{\Psi_c} \right| \right], \quad (5.11)$$

где Ψ_d , Ψ_c — сравниваемые спектры, полученные по результатам контактных и дистанционных измерений, $E[\cdot]$ — оператор математического ожидания. Для анализируемого диапазона длин волн (от 2.6 до 30 м) величина среднего модуля относительной ошибки составила $M = 0.3$. Эта величина близка к результатам работы [171], где было проведено сравнение одномерных интеграль-

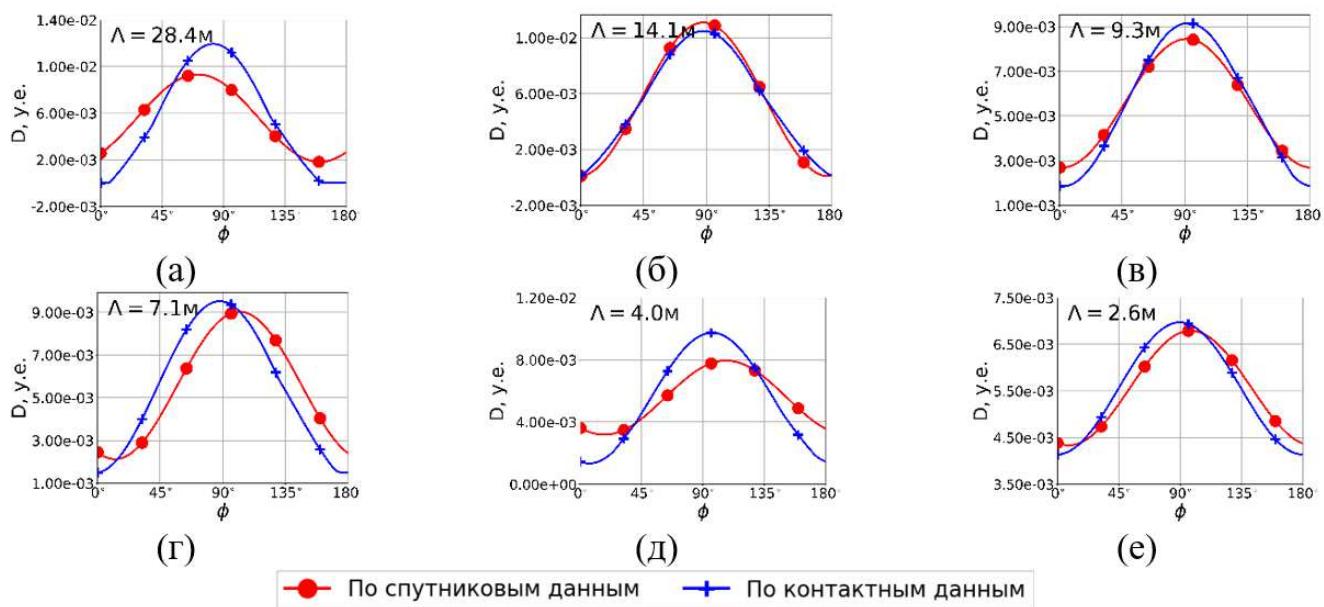


Рис. 5.15. Угловые распределения энергии морских волн различной длины, оцененные различными методами: распределения, восстановленные по спектрам фрагментов спутникового изображения (красные линии); распределения, оцененные по данным решетки струнных волнографов (синие линии) для длин волн: а) $\Lambda = 28.4$ м, б) $\Lambda = 14.1$ м, в) $\Lambda = 9.3$ м, г) $\Lambda = 7.1$ м, д) $\Lambda = 4.0$ м, е) $\Lambda = 2.6$ м

ных спектров для исследуемого диапазона длин волн и получены значения, изменяющиеся от 0.2 до 0.4 на различных расстояниях от платформы.

5.3.6. Результаты исследований спектров морского волнения в коротковолновой области $0.1 \dots 1$ м

Описание комплексных экспериментов

Для проверки адекватности методов восстановления спектров морского волнения в коротковолновой области $0.1 \dots 1$ м были проанализированы результаты комплексных натурных экспериментов третьего типа. Эти эксперименты проводились на исследовательской платформе, включали обычную и стереосъёмку, а также контактные измерения спектров волнения с помощью решётки волнографов. Стереосъёмка морской поверхности выполнялась с рабочей площадки, которая находилась на высоте 16 м над уровнем моря с базисом 10.2 м с помощью стереокамер с фокусным расстоянием 99 мм. По измеренным отсчё-

там поля возвышений рассчитывались спектры $\psi_\varphi(k_\varphi)$ с использованием процедур интерполяции и дискретного преобразования Фурье. Одновременно со стереосъёмкой на платформе выполнялись контактные измерения частотных спектров волнения с помощью спектроволнографа, обеспечивающего регистрацию в частотном диапазоне $0.1 - 15$ Гц с полосой пропускания перестраиваемого фильтра 0.1 Гц. В спектроволнографе был реализован метод последовательного анализа частотного спектра путём автоматической перестройки частоты пропускания узкополосного фильтра в заданном интервале [7].

Изображения морской поверхности, полученные при стереосъёмке, использовались также для восстановления спектров волнения нелинейным многопозиционным методом [36, 38]. При этом анализировались фрагменты двух изображений стереопары, на которых представлен участок поверхности, обработанный стереофотограмметрическим методом.

Условия проведения экспериментов: зенитный угол Солнца составлял 30° (изображения зарегистрированы при безоблачном небе), а скорость ветра $W_B \approx 5$ м/с. Во время экспериментов ветер дул со стороны берега, поэтому разгон ветрового волнения не превышал расстояния от платформы до берега, которое составляет ≈ 600 м.

В качестве основных характеристик дня сопоставления спектров волнения, полученных разными методами, были выбраны среднеквадратичное возвышение σ_ξ и степенной показатель p_x в двух интервалах длин волн Λ : от 0.1 до 1 м и от 0.04 до 0.4 м. Спектры волнения, измеренные различными методами, пересчитывались в спектр $\chi(k)$.

При наличии в изображении солнечных бликов, служащих причиной существенной нелинейности передаточной функции, связывающей уклоны и яркости элементов морской поверхности, возникают систематические погрешности восстановления спектров волнения. Такие погрешности устраняются при помощи восстанавливающих фильтров, адаптируемых к характеристикам волнения с использованием итерационной процедуры восстановления спектров волнения.

нения [36, 38]. Количественные оценки погрешностей даны в работах [7, 112], где показано, что даже при использовании изображений, содержащих солнечные блики, двух итераций восстановления, полученных с разных позиций, достаточно для снижения относительной погрешности измерения интегральной спектральной энергии до $\approx 3\%$ и погрешности определения показателя степенной аппроксимации спектра волнения до величины $\approx 0,03$.

Для коррекции спектров возвышений, полученных стереометодом, были учтены шумы оцифровки, возникающие вследствие погрешностей измерения возвышений поверхности при стереофотограмметрической обработке изображений. Предполагалось, что шумы являются аддитивными, поэтому их спектр вычитался из спектров, измеренных при обработке [7].

Вид коротковолновых пространственных спектров волнения $\chi(k)$, полученных по данным разных методов измерений, показан на рис. 5.16. Спектры построены путём усреднения по шести реализациям. Анализ рис. 5.16 свидетельствует о хорошем соответствии спектров волнения, полученных разными методами, в коротковолновом диапазоне длин волн ($\Lambda = 0.04 - 1.0$ м). Характер полученных спектров свидетельствует о возможности их степенной аппроксимации Тоба [338].

Анализ полученных результатов

Для более детального анализа данных комплексных экспериментов сопоставлялись такие характеристики спектров, как показатели степенной аппроксимации и дисперсии волновой энергии в различных диапазонах длин волн. Для диапазона длин волн $\Lambda = 1.0 - 5.0$ м использовались спектры волнения, которые определялись по космическому изображению, полученному с борта спутника GeoEye методом восстановления с учётом нелинейной модуляции поля яркости. Для коротких волн ($\Lambda = 0.04 - 1.0$ м) использовались экспериментальные данные, полученные в шести экспериментах третьего типа тремя методами в двух диапазонах: $\Lambda = 0.04 - 0.4$ м и $\Lambda = 0.1 - 1.0$ м. Для сопоставления с известными

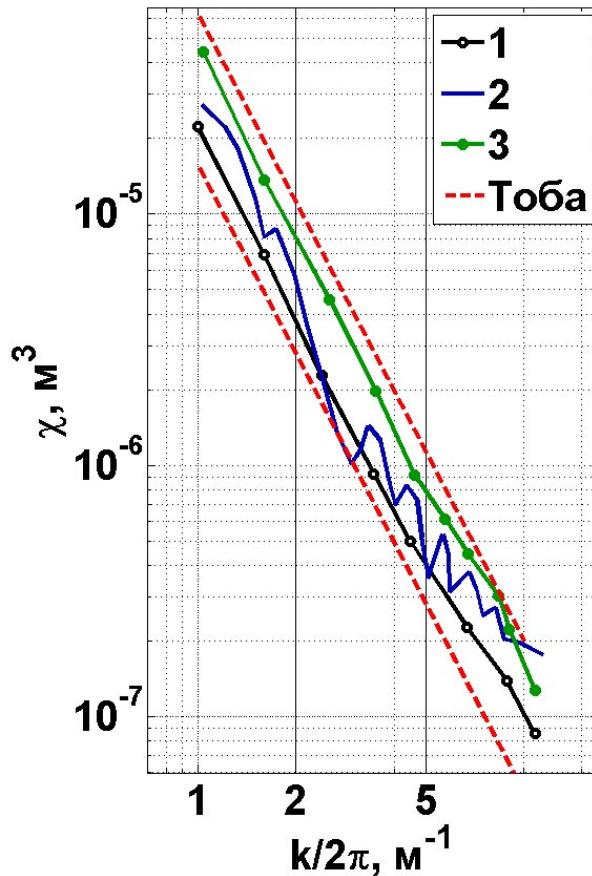


Рис. 5.16. Спектры возвышений морской поверхности, полученные разными методами: 1 — восстановление по изображениям нелинейным многопозиционным методом; 2 — контактные измерения струнным волнографом; 3 — стереофотограмметрические измерения; прерывистые линии — аппроксимация Тоба [338]

литературными данными были вычислены параметры σ_ξ , p_x по следующим аппроксимациям: Филлипса [141], Пирсона-Московица [316], Тоба [338], Лейкина и Розенберга [102]. Значения дисперсий и показателей степенных аппроксимаций спектров возвышений морской поверхности, полученных экспериментально различными методами, а также полученных из известных аппроксимаций, приведены в табл. 5.1.

Анализ данных табл. 5.1, показывает, что наблюдается совпадение статистических оценок характеристик морского волнения, измеренных различными методами, в пределах среднеквадратичных разбросов выборок этих параметров.

Наиболее важным является определение показателя p в степенной аппрок-

Таблица 5.1. Характеристики поля возвышений морской поверхности по данным комплексных экспериментов и известным аппроксимациям

Источник информации	Характеристики спектра				
	среднеквадратичное отклонение σ_ξ , мм		показатель p_x		
	$\Lambda=0.04-0.4$ м	$\Lambda=0.1-1.0$ м	$\Lambda=0.04-0.4$ м	$\Lambda=0.1-1.0$ м	$\Lambda=1.0-5.0$ м
Комплексный эксперимент					
Нелинейное восстановление по спектрам изображений	3.1±0.7	7.8±1.3	2.12±0.08	2.23±0.09	2.22±0.08
Стереосъёмка	5.4±1.5	11.3±2.7	2.10±0.10	2.20±0.17	нет данных
Решётка струнных волнографов	3.8±0.05	8.5±1.7	1.93±0.11	1.98±0.05	2.25±0.05
Известные аппроксимации					
Филлипс [141]	3.5	8.6	3.0	3.0	3.0
Пирсон, Московиц [316]	2.8	7.1	3.0	3.0	3.0
Тоба [338]	3.7	7.3	2.5	2.5	2.5
Лейкин, Розенберг [102]	3.3	7.0	2.6	2.6	2.6

симации. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что параметры спектров волнения, восстановленных по спектрам изображений, наилучшим образом соответствуют аппроксимации Тоба [338]. Полученные результаты исследований дистанционными методами позволили выявить следующие значения параметров для условий проведения экспериментов:

- $p = 2.22 \pm 0.08$ для интервала длин волн $\Lambda = 1.0 - 5.0$ м;
- $p = 2.23 \pm 0.09$ для коротковолнового интервала длин волн $\Lambda = 0.1 - 1.0$ м;
- $p = 2.1 \pm 0.08$ для коротковолнового интервала длин волн $\Lambda = 0.04 - 0.4$ м.

Для выяснения влияния возмущений морской поверхности на получаемые оценки из-за нестационарности волнения целесообразно воспользоваться корреляционным анализом.

Пусть $\eta_n^{(\alpha)}$, $n = 1, 2, \dots, N$ — выборка оценок характеристики η , сделанных по результатам измерений методом, обозначенным индексом α , $\eta_n^{(\beta)}$, $n = 1, \dots, N$ — выборка оценок той же характеристики, полученная с использованием метода, обозначенного индексом β . В рассматриваемой задаче индекс η используется последовательно вместо σ_ξ , p_x для двух диапазонов длин волн, а индексы α , β принимают значения "R" в случае измерения с использованием разработанного восстанавливающего оператора, "Ст" в случае измерения по данным стереосъёмки, "К" в случае измерения по контактным данным волнографа.

Коэффициенты корреляции между оценками параметра η определяются формулой:

$$r^{(\alpha, \beta)} = \left(\sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\alpha)} - \bar{\eta}^{(\alpha)}) (\eta_n^{(\beta)} - \bar{\eta}^{(\beta)}) \right) * \left(\sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\alpha)} - \bar{\eta}^{(\alpha)})^2 \sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\beta)} - \bar{\eta}^{(\beta)})^2 \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (5.12)$$

где $\bar{\eta}^{(\alpha)}$, $\bar{\eta}^{(\beta)}$ — средние значения оценок $\eta^{(\alpha)}$, $\eta^{(\beta)}$. Рассчитанные по формуле (5.12) коэффициенты корреляции между оценками характеристик морской поверхности в коротковолновом диапазоне приведены в табл. 5.2.

Анализ результатов, приведённых в табл. 5.2 показывает, что корреляция оценок, получаемых различными методами, является достаточно высокой и составляет в среднем 0.8–0.9. Те случаи, в которых наблюдается понижение коэффициента корреляции, объясняются особенностями методов измерений. Например, имеет место некоторое уменьшение коэффициента корреляции оценок показателя p_x , полученных контактным методом, с оценками, полученными по изображениям, что обусловлено разнесением по времени регистрации спектральной плотности на различных частотах ω . За время перестройки частоты пропускания фильтра может происходить изменение спектральной плотности волнения на разных частотах ω , что приводит к отклонению оценки показателя спектра

Таблица 5.2. Коэффициенты корреляции между оценками характеристик волнения σ_ξ и p_x по данным различных методов измерений в коротковолновом диапазоне ($\Lambda = 0.04 - 1.0$ м)

Оцениваемые характеристики	Сравниваемые методы	Коэффициенты корреляции		
		Диапазон длин волн $\Lambda, \text{м}$		
		$\Lambda: 0.1 - 1.0$	$\Lambda: 0.04 - 0.4$	
σ_ξ	Нелинейное восстановление по спектрам изображений	Решётка струнных волнографов	0.73	0.91
	Нелинейное восстановление по спектрам изображений	Стереофотосъёмка	0.79	0.78
	Стереофотосъёмка	Решётка струнных волнографов	0.95	0.93
p_x	Нелинейное восстановление по спектрам изображений	Решётка струнных волнографов	0.89	0.64
	Нелинейное восстановление по спектрам изображений	Стереофотосъёмка	0.65	0.93
	Стереофотосъёмка	Решётка струнных волнографов	0.86	0.86

возвышений относительно оценок, полученных для фиксированного момента времени при обработке изображений.

Наличие хорошей корреляции между независимо измеренными спектрами волнения позволяет сделать вывод, что разработанные дистанционные методы измерений достоверно отображают пространственные спектры морского волнения в коротковолновой области.

5.4. Результаты экспериментов с использованием дрейфующих буёв

Данный тип комплексных экспериментов проводился в акватории бухты Мамала (о.Оаху, Гавайские острова). Выполнялась космическая съёмка и синхронные подспутниковые измерения, в том числе с помощью дрейфующих волновых буёв, обеспечивающих регистрацию частотно-угловых спектров поверхностного волнения [19, 43, 44, 169, 221, 251, 252].

Сопоставление частотного спектра волнения, измеренного контактным методом с помощью волнового буя, с частотным спектром, пересчитанным из двумерного пространственного спектра возвышений, полученного по космическому изображению со спутника QuickBird с помощью восстанавливающего оператора в двух частотных диапазонах приведены на рисунке 5.17. Результаты, соответствующие диапазону длин волн 4.5–20 м (диапазон частот 0.29–0.59 Гц), включающему спектральный максимум, и диапазону степенного спадания спектра 4.5–10 м (диапазон частот 0.4–0.59 Гц) приведены на рис. 5.17, *a* и 5.17, *б* соответственно. Анализ рис. 5.17, *a* показывает, что в диапазоне частот 0.29–0.59 Гц, соответствующем диапазону длин волн 4.5–20 м, наблюдается хорошее соответствие формы спектра в области спектрального максимума между данными дистанционных и контактных измерений. Количественные характеристики близости спектров оценивались в частотном диапазоне степенного спадания 0.4–0.59 Гц, соответствующем диапазону длин волн 4.5–10 м. Сопоставление частотного спектра волнения, измеренного с помощью волнового буя, с частотным спектром, пересчитанным из двумерного пространственного спектра возвышений, полученного по космическому изображению со спутника «Ресурс-П» с помощью восстанавливающего оператора в двух частотных диапазонах приведены на рисунке 5.18. Результаты, соответствующие диапазонам длин волн 4.5–20 м и диапазону степенного спадания спектра, приведены на рис. 5.18, *a* и 5.18, *б* соответственно.

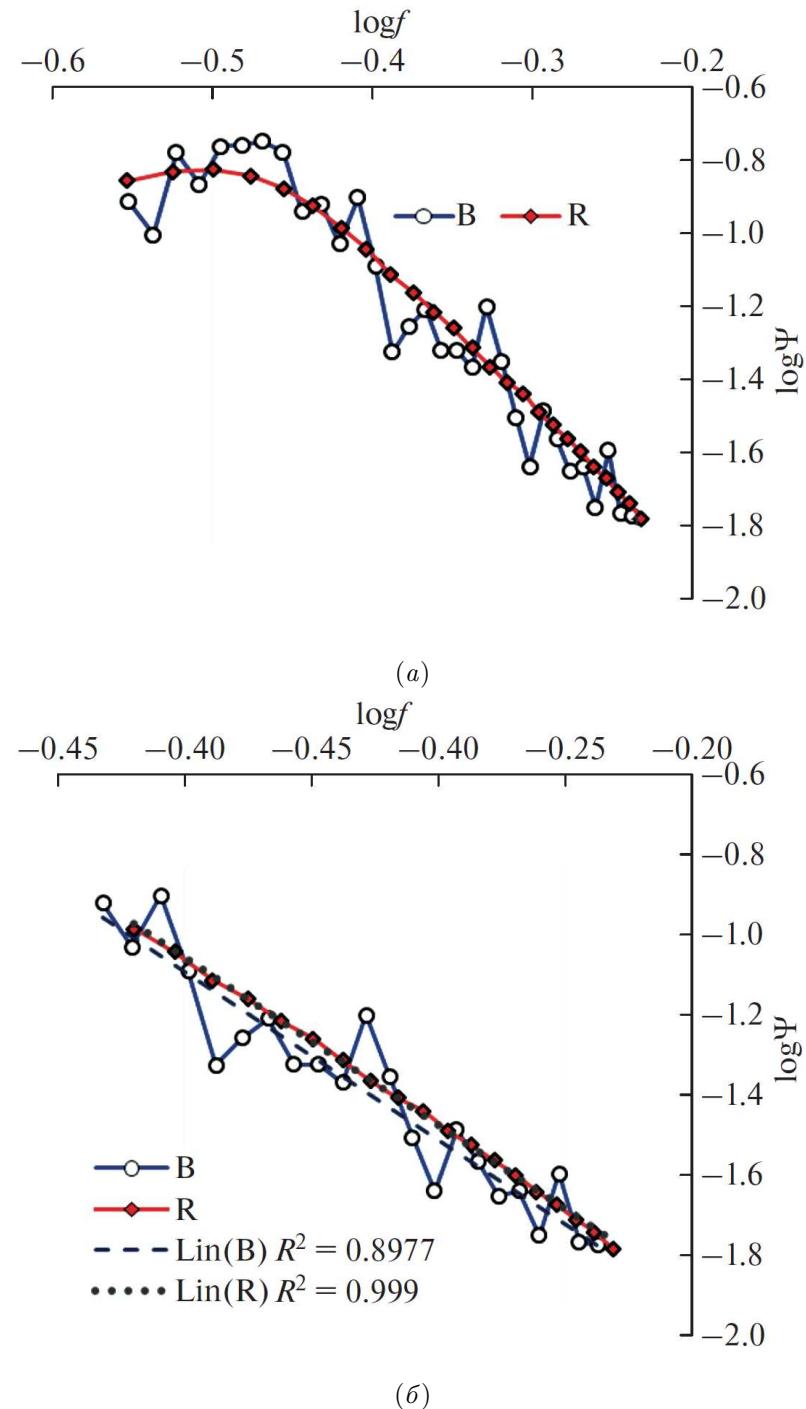


Рис. 5.17. Сопоставление частотного спектра волнения, измеренного с помощью волнового буя, с частотным спектром, пересчитанным по данным спутникового изображения со спутника QuickBird: а — для диапазона длин волн 4.5–20 м, включающему спектральный максимум; б — для диапазона степенного спадания спектра (4.5–10 м).

Наблюдается хорошее совпадение между линиями линейной регрессии, проведенными в логарифмической шкале для спектров волнения, измеренных дистанционным ($\text{Lin}(R)$), и контактным ($\text{Lin}(B)$) методами (см. рис. 5.18, а).

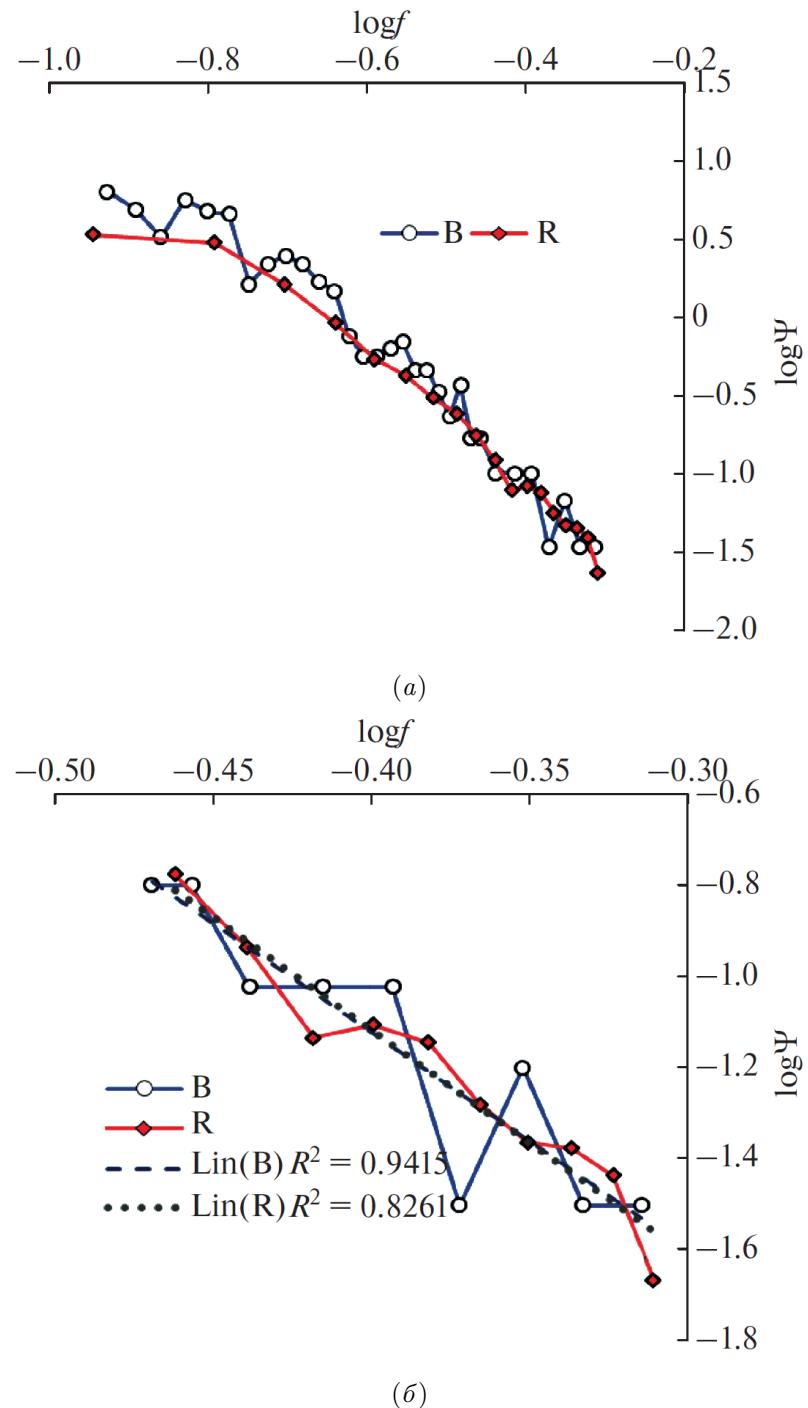


Рис. 5.18. Сопоставление частотного спектра волнения, измеренного с помощью волнового буя, с частотным спектром, пересчитанным по данным спутникового изображения со спутника «Ресурс-П»: а — для диапазона длин волн 4.5—20 м, включающему спектральный максимум; б — для диапазона степенного спадания спектра (4.5—10 м).

Расхождение в наклонах линий регрессии составляет 0.002. Для оценки близости линий регрессии использовалась величина достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации) R^2 [187]. Это число в интервале $[0, 1]$, которое от-

ражает близость значения линии тренда к фактическим данным — чем ближе эта величина к 1, тем достовернее линия тренда. Коэффициент достоверности линейной аппроксимации спектров в логарифмических координатах R^2 составляет: $R^2 = 0.999$ для частотного спектра, пересчитанного из пространственного спектра, восстановленного по спутниковому изображению и $R^2 = 0.897$ для частотного спектра, полученного по данным измерений с помощью волновых буёв. В результате сопоставления, выполненного в диапазоне длин волн, соответствующем степенному спаданию спектра (4.5–10 м), была получена поправка для параметра a_1 в формулах (4.50), (4.60) [19]. Поправка соответствует условиям волнообразования в исследуемой акватории бухты Мамала, когда наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны в условиях большого разгона, так и системы волн зыби.

В результате обработки выбранных участков фрагмента космического изображения, полученного аппаратурой спутника «Ресурс-П», были получены следующие результаты. Так же, как и в описанном выше комплексном эксперименте, проведённом в акватории бухты Мамала, двумерный пространственный спектр возвышений морской поверхности, полученный по космическому изображению (спутник «Ресурс-П») с использованием восстанавливющего оператора \mathbf{R} , построенного в виде пространственно-частотного фильтра по формуле (4.60), пересчитывался в одномерный частотный спектр с использованием дисперсионного соотношения для гравитационных волн по методике, приведенной в разделе 5.3.3. Для восстановления пространственного спектра морских волн по космическому изображению, полученному со спутника «Ресурс-П», использовался пространственно-частотный фильтр, адаптированный к условиям волнообразования в исследуемой акватории, где наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны в условиях значительного разгона, так и системы волн зыби. При этом в формуле (4.60) для восстанавливющего оператора использовался параметр $a_1 = -0.05$ с учётом поправки, полученной ранее по космическим данным спутника QuickBird для условий волнообразования в

акватории бухты Мамала, где наблюдалось смешанное волнение, включающее как развивающиеся ветровые волны, так и системы волн зыби. Возможность использования одинаковых параметров пространственно-частотного фильтра является обоснованной, поскольку панхроматические сенсоры космических аппаратов QuickBird и «Ресурс-П» имеют близкие характеристики, как по пространственному разрешению, так и по спектральной чувствительности. Примеры сопоставления спектров морского волнения, полученных в этом эксперименте контактным методом и путём восстановления по спектру космического изображения с использованием предложенного метода, приведены на рис. 5.18 [19]. Сопоставление проводилось для диапазона частот 0.29–0.59 Гц (диапазон длин волн 4.5–20 м, область спектральных максимумов), и диапазона частот 0.4–0.59 Гц (диапазон длин волн 4.5–10 м, диапазон степенного спадания спектра).

5.5. Применение метода восстановления

пространственных спектров морских волн для исследования обширных акваторий

В этом разделе описаны результаты применения разработанного метода оперативного восстановления пространственных спектров морского волнения по космическим изображениям при мониторинге обширных акваторий. В предыдущих разделах приведены результаты экспериментальных исследований, которые позволили валидировать параметры восстанавливющего пространственно-частотного фильтра для использования в акватории, где наблюдается смешанное волнение, включающее как ветровые волны в условиях большого разгона волнения, так и волны зыби. Исследования показали, что наиболее заметна зависимость степенного показателя пространственного спектра возвышений p_χ от разгона волнения в прибрежной зоне. С увеличением расстояния от берега величина этого показателя приближается к значению $p_\chi \approx 2.7$, которое является

средним между значением, соответствующим равновесному спектру Филлипса, и значением, соответствующим известной аппроксимации Тоба. В зоне максимального разгона показатель спектра практически не изменяется с расстоянием и близок к тому же значению $p_\chi \approx 2.7$. В зоне ветровой тени на большом расстоянии от берега наблюдается плавное изменение степенного показателя от $p_\chi \approx 2.7$, соответствующего максимальному разгону, до $p_\chi \approx 2.5$, которое в точности соответствует аппроксимации Тоба. С учётом полученной поправки параметров восстанавливающего оператора построены зависимости показателя степенного спектра волнения от расстояния, измеряемого в направлении ветра, для трёх зон, отличающихся условиями формирования ветрового волнения; прибрежной зоны, зоны максимального разгона и зоны ветровой тени. Физика взаимодействия в системе океан-атмосфера зависит как от скоростей ветра, так и от длины и продолжительности разгона ветровых волн [76]. Поэтому при космическом мониторинге важно измерение энергии волновых компонент в широком диапазоне длин волн на обширных акваториях. Далее представлены результаты применения метода восстановления спектров морского волнения по космическим изображениям к условиям продолжительного ветрового разгона при космическом мониторинге обширных акваторий. Для адекватной оценки спектров морской поверхности используются восстанавливающие операторы, позволяющие получать пространственные спектры волнения путём воздействием на пространственные спектры полей яркости, формируемых при космической съёмке.

5.5.1. Экспериментальное исследование спектров волнения при ветровом разгоне

В экспериментах использовалось космическое изображение, полученное 13 сентября 2003 г. со спутника QuickBird с пространственным разрешением 0.65 м в тихоокеанской акватории вблизи острова Оаху (Гавайские острова) [178, 251, 252]. Исследование применимости модифицированного восстанавливав-

ющего оператора $R_{mod}(k)$ проводилось для фрагментов космического изображения, соответствующих различным удалениям от берега и различным стадиям развития ветрового волнения. На рис. 5.19 приведены примеры применения восстанавливающего оператора: первая колонка — фрагменты спутникового изображения, полученные на различных удалениях от берега острова Оаху; вторая колонка — двумерные пространственные спектры этих фрагментов; третья и четвёртая колонки — восстановленные двумерные пространственные спектры уклонов морских волн в двух диапазонах пространственных частот $\Delta\nu = 0 - 0.5 \text{ м}^{-1}$ и $\Delta\nu = 0 - 0.15 \text{ м}^{-1}$. Центры участков изображений морской поверхности, представленных на фрагментах (1), (2), (3) и (4) рис. 5.19, расположены на расстояниях примерно 9.3 км, 21.3 км, 41.2 км и 52 км от берега соответственно. При этом средняя скорость приповерхностного ветра на этих участках составляла 5 м/с, 6 м/с, 7 м/с и 8 м/с соответственно, а его направление изменялось от 90° на ближнем к берегу участке до 60° вдали от берега.

Анализ двумерных пространственных спектров фрагментов космического изображения (вторая колонка на рис. 5.19) и восстановленных спектров уклонов (см. рис. 5.19 справа), показывает, что, по мере удаления от берега и изменения ветрового режима, развиваются характерные дополнительные волновые системы. При этом энергия морских волн возрастает с удалением от берега и ростом скорости ветра.

На рис. 5.20 представлены одномерные пространственные спектры возвышений, полученные усреднением по направлению двумерных пространственных спектров возвышений в угловом секторе $\pm 70^\circ$, восстановленных с использованием модифицированного восстанавливающего оператора \mathbf{R}_{mod} с оптимальными значениями параметров α^* , β^* , полученными в экспериментах, описанных в разделе 5.3.4.

Обозначения кривых, представленных на рис. 5.20, соответствуют фрагментам, приведённым на рис. 5.19. Анализ рис. 5.20 показывает, что ход одно-

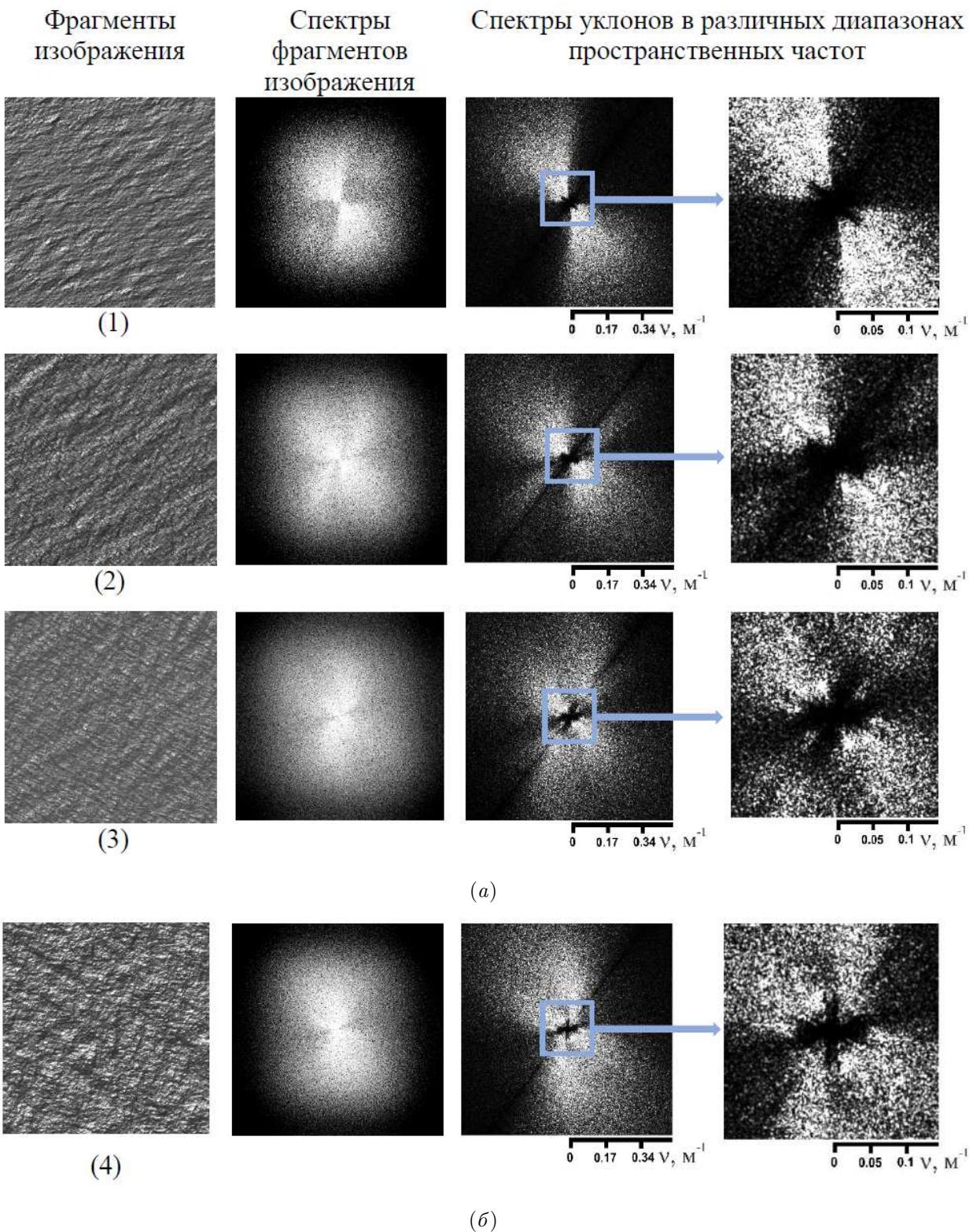


Рис. 5.19. Фрагменты спутникового изображения, полученные на различных удалениях от берега; двумерные пространственные спектры этих фрагментов и восстановленные двумерные пространственные спектры уклонов морских волн в двух диапазонах пространственных частот

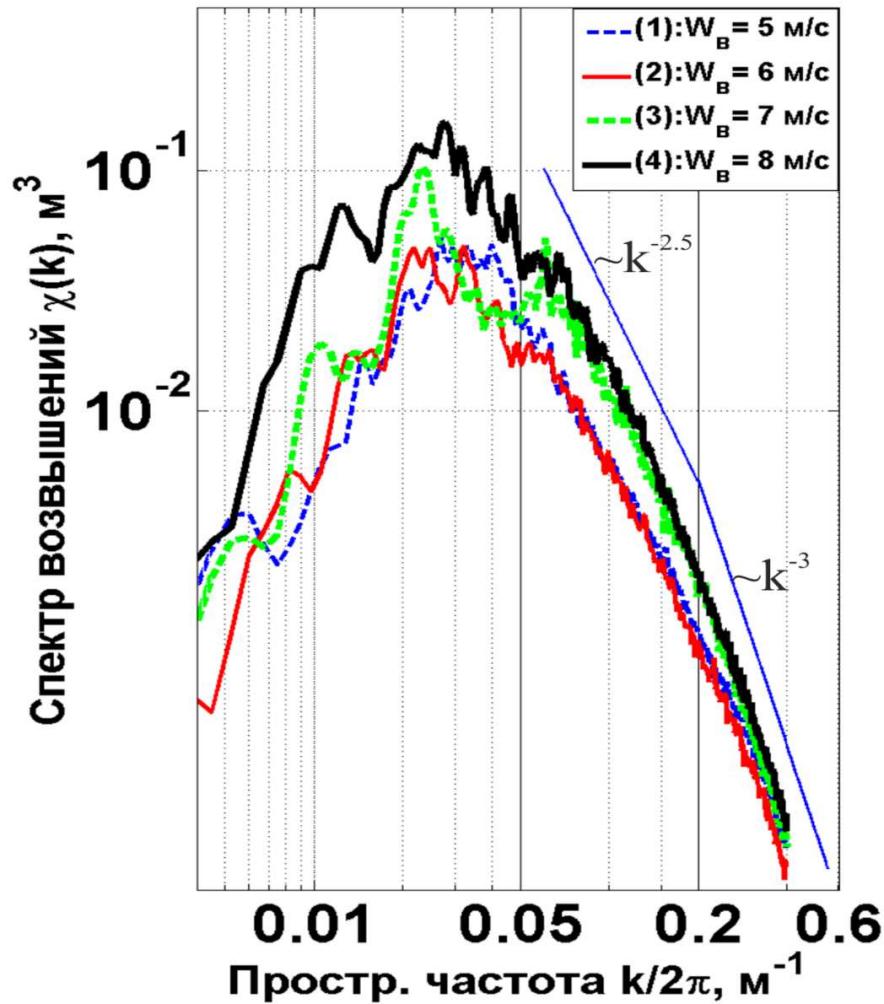


Рис. 5.20. Одномерные пространственные спектры возвышений морского волнения, восстановленные по фрагментам космического изображения, полученного на различном удалении от берега при различных скоростях ветра в тихоокеанской акватории о. Оаху (Гавайские острова)

мерных спектров, восстановленных по двумерным пространственным спектрам фрагментов космического изображения, зависит от скорости ветра и удалённости соответствующих участков от берега. При этом форма и положение спектральных максимумов зависит не только от скорости приповерхностного ветра, но и от разгона от подветренного берега, который в данном эксперименте составлял несколько десятков километров.

Кривые, представленные на рис. 5.20, в диапазоне пространственных частот $\Delta\nu = 0.07 - 0.2 \text{ m}^{-1}$ (длины волн $5 - 14.3 \text{ м}$) могут аппроксимироваться

степенной зависимостью $\chi(k) \sim k^{-n}$ с показателем $n \approx 2.5$, что согласуется с аппроксимацией Тоба [338]. В диапазоне пространственных частот $\Delta\nu = 0.2 - 0.5 \text{ м}^{-1}$ (длины волн $1.6 - 5 \text{ м}$) показатель степени составляет $n \approx 3$, что согласуется с результатами известных экспериментов JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) [236].

5.5.2. Экспериментальное исследование спектров пространственно-неоднородного волнения

Для адаптации разработанных алгоритмов к условиям космического мониторинга смешанного волнения в при наличии длительного ветрового разгона использовались изображения высокого пространственного разрешения, полученные с борта спутника QuickBird в ходе комплексного эксперимента в акватории Тихого океана.

На рисунке 5.21, б представлено поле ветра, построенное по результатам пространственного спектрального анализа спутникового изображения [58]. Как следует из этого рисунка, ближайшие к берегу участки акватории, над которыми измерялась скорость ветра расположены в $3 - 6 \text{ км}$ от наземных станций. На этих участках скорость ветра, оцененная по спектрам фрагментов космического изображения составила 4 м/с , а его направление — 85° .

По результатам проведённого анализа в районе эксперимента выявлены зоны, соответствующие различным условиям волнообразования: прибрежная зона с ограниченным разгоном ветровых волн, зона максимального разгона и ветровая тень.

Для восстановления пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям используется восстанавливающий оператор в форме (4.60). Параметры этого оператора были получены для условий волнообразования в прибрежной зоне с ограниченным ветровым разгоном, в дециметровом и метровом диапазонах длин волн [38]. Для адекватного применения этого оператора в условиях больших ветровых разгонов, выполнено уточнение ранее полу-

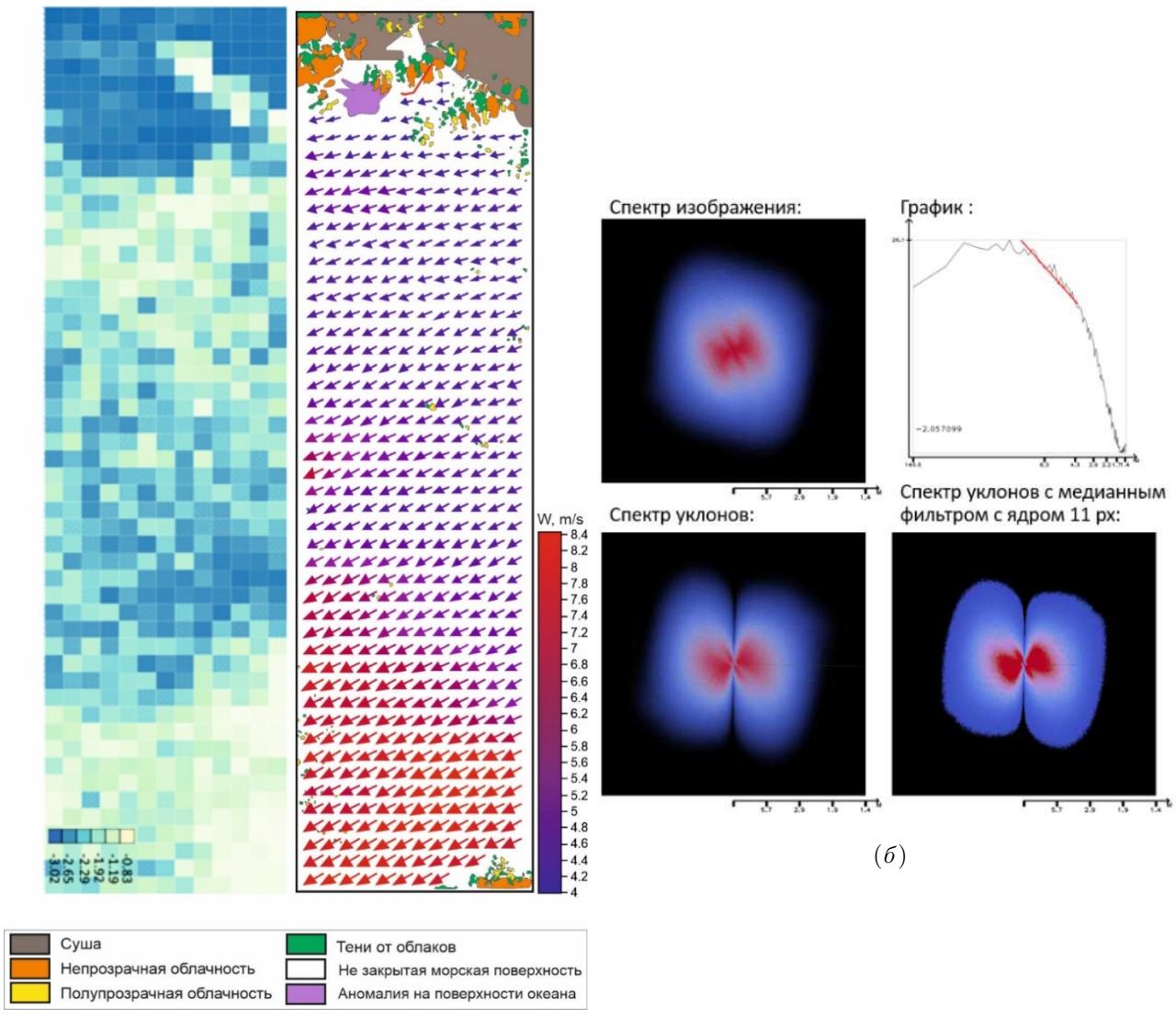


Рис. 5.21. (а) Распределение параметра степенного показателя (наклона) спектров возвышений, полученные по фрагментам космического изображения; (б) поле ветра, построенное по результатам пространственного спектрального анализа; (в) примеры двумерных спектров и одномерного разреза восстановленного спектра уклонов в зоне максимального разгона [58,59]

ченных параметров восстанавливающего оператора. Для этого использовались результаты сопоставления спектров морской поверхности, измеренных дистанционно, с данными подспутниковых буйковых измерений [19, 58].

Рассмотрим более детально вопросы валидации метода восстановления пространственных спектров в условиях пространственно-неоднородного волнения, включающего как ветровые волны в условиях большого разгона волнения, так и волны зыби.

С учётом полученной поправки параметров восстанавливающего оператора построены примеры зависимости показателя степенного спектра волнения от расстояния, измеряемого в направлении ветра для различных зон, представленных на рисунке 5.3: прибрежной зоны, зоны максимального разгона и зоны ветровой тени.

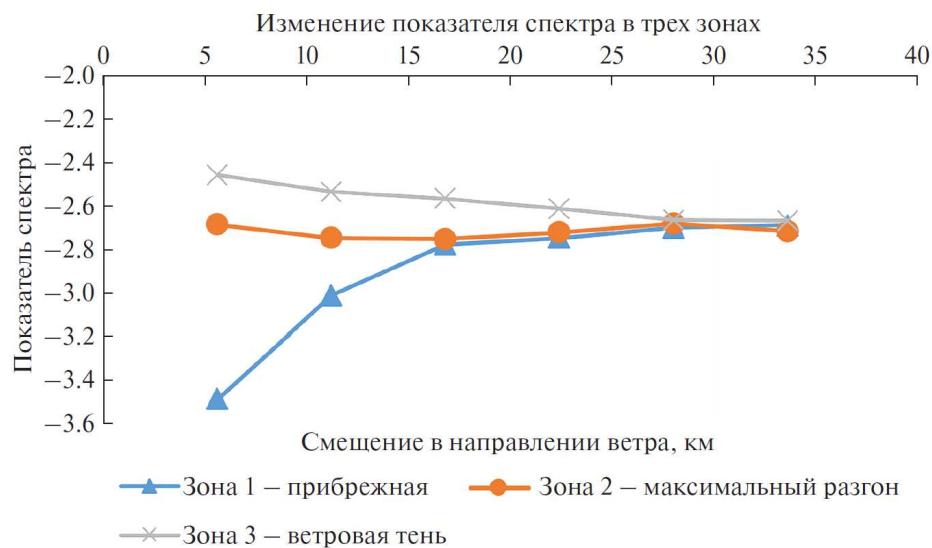


Рис. 5.22. Примеры зависимости показателей степенной аппроксимации спектров возвышений волнения от координаты смещения в направлении ветра в различных зонах акватории, отмеченных: 1 — прибрежной зоны, 2 — зоны максимального разгона, 3 — зоны ветровой тени

Наиболее заметна зависимость степенного показателя пространственного спектра возвышений p_χ от разгона волнения в прибрежной зоне. С увеличением расстояния от берега величина этого показателя приближается к значению $p_\chi \approx 2.7$. Это значение соответствует степенному показателю частотного спектра $p_\omega \approx 4.4$, если учесть известное соотношение [28, 29]:

$$p_\chi = (p_\omega + 1)/2 .$$

Таким образом, полученное значение показателя является средним между значением $p_\omega = 5$, соответствующим равновесному спектру Филлипса [141] и значением $p_\omega = 4$ в аппроксимации Тоба [338]. В зоне максимального разгона показатель спектра практически не изменяется и близок к тому же значению $p_\chi \approx 2.7$.

В зоне ветровой тени на большом расстоянии от берега наблюдается плавное изменение степенного показателя между значением $p_\chi \approx 2.7$, соответствующим максимальному разгону и значением $p_\chi \approx 2.5$, которое в точности соответствует аппроксимации Тоба.

Приведём примеры использования восстанавливающего оператора, валидация которого проведена в ходе описанного выше комплексного эксперимента, для обработки данных космического мониторинга океанских акваторий, полученных аппаратурой российского космического аппарата «Ресурс-П».

Разработанные метод и алгоритмы восстановления пространственных спектров океанского волнения позволили начать исследование изменчивости характеристик пространственных спектров при наличии различных волновых систем — ветрового волнения и волн зыби. Комплексные космические и подспутниковые исследования параметров морского волнения проводились в той же акватории вблизи острова Оаху, где ранее были проведены эксперименты по адаптации восстанавливающих операторов к условиям океанского волнения.

Были выполнены комплексные эксперименты, включающие регистрацию спутниковых изображений и подспутниковые измерения характеристик ветра и наблюдаемых волн океана. Съёмка выполнялась аппаратурой ГЕОТОН спутника «Ресурс-П».

Схема экспериментов приведена на рисунке 5.23.

Космическая съёмка выполнялась аппаратурой ГЕОТОН спутника «Ресурс-П». Зона съёмки обозначена на рисунке 5.23 а, на рисунках 5.23 б и 5.23 в приведены сами изображения, полученные 8 июня и 28 июля 2019 года, примеры восстановленных спектров уклонов морской поверхности показаны на рисунке 5.23 е. Также на этих рисунках обозначено положение станции подспутниковых измерений.

Графики изменения направлений и скоростей ветра за период с 18:00:00 GMT по 23:54:00 GMT, полученные при подспутниковых экспериментах приведены на рисунках 5.23 г и 5.23 д.

На рисунках 5.23 д, 5.23 е приведены примеры восстановленных спектров уклонов и построенных по ним одномерных разрезов. Линией показана аппроксимирующая прямая, угол наклона которой позволяет оценить показатель степени аппроксимации пространственного спектра волнения.

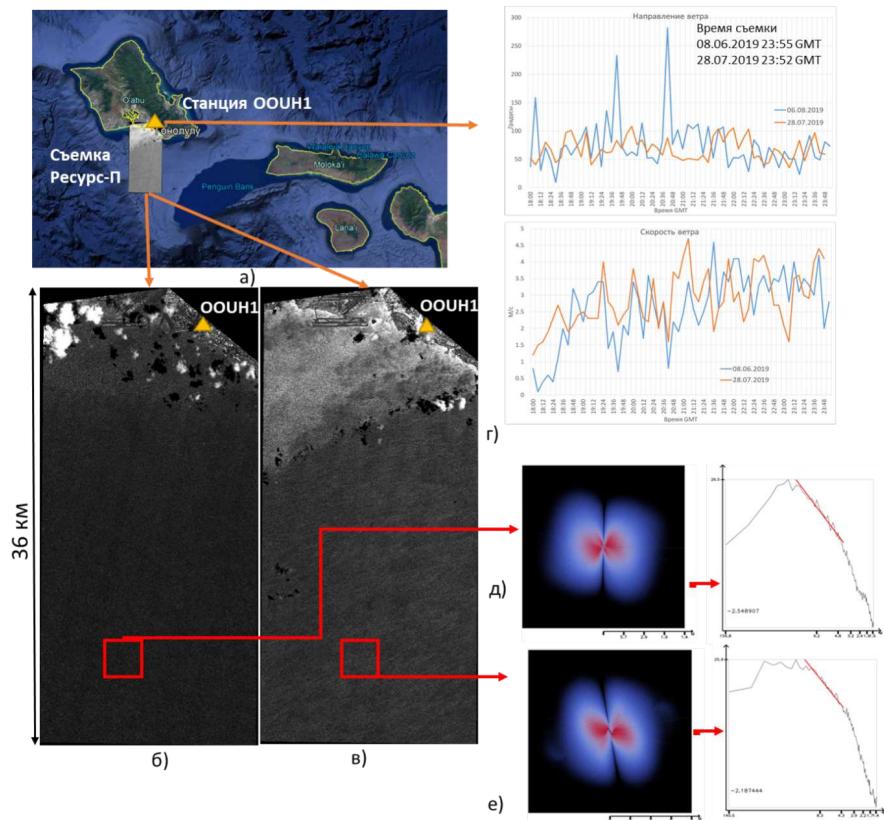


Рис. 5.23. Схема комплексных экспериментов в акватории бухты Мамала, проведенных в 2019 году. а) схема расположения области космической съемки и станции подспутниковых измерений, б) изображение, полученное со спутника «Ресурс-П» 08.06.2019 в 23:55:55 GMT, в) изображение, полученное со спутника «Ресурс-П» 28.07.2019 в 23:52:58 GMT, г) график изменения направления ветра, д) график изменения скорости ветра, е) примеры спектров уклонов восстановленных по космическим изображениям

Во время комплексного эксперимента 8 июня 2019 года (время съемки 23:55:55 GMT) ветровая компонента волнения была развита слабо, так как скорость ветра составляла всего 2 – 3 м/с. При этом наблюдались довольно значительные волны зыби (длина волны около 50 м). Спутниковая съемка выполнялась при высоте и азимуте Солнца $68^{\circ}02'$ и $80^{\circ}58'$ соответственно. Пространственное разрешение спутникового изображения составило 0.806 м.

Во время комплексного эксперимента 28 июля 2019 года (время съёмки 23:52:58 GMT) скорость ветра составляла 9 – 10 м/с, а в среднем составляла 4 – 5 м/с. При этом направление ветра было таким, что имелась возможность длительного разгона волн со стороны открытого океана. В акватории также наблюдались волны зыби, хотя и менее значительные, чем в первом эксперименте (длина волны около 30 м). Спутниковая съёмка выполнялась при высоте и азимуте Солнца $65^{\circ}13'$ и $91^{\circ}05'$ соответственно. Пространственное разрешение спутникового изображения составило 0.717 м.

Результаты измерений, полученных в комплексных экспериментах, сопоставлены на рисунке 5.24. Показаны зависимости показателя спектра возвышений океанской поверхности от координаты при различных видах волнения, наблюдавшихся в комплексных экспериментах 08.06.2019 и 28.07.2019.

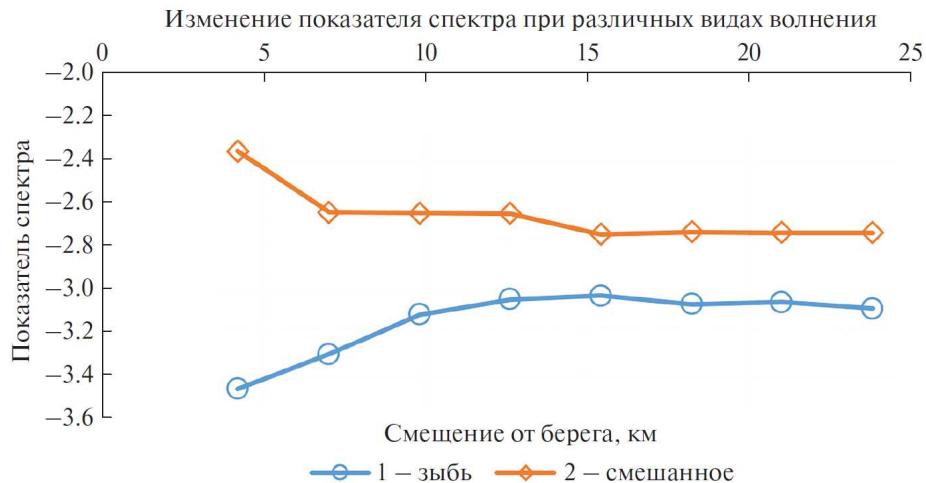


Рис. 5.24. Пример зависимости показателя степенной аппроксимации спектров возвышений волнения расстояния от берега при различных видах волнения: 1) зыбь 08.06.2019 при слабом ветровом волнении (скорость ветра 2–3 м/с); 2) смешанное волнение 28.07.2019 при порывах ветра со скоростями до 9–10 м/с

В комплексном эксперименте 28.07.2019 наблюдаемые значения степенного показателя при удалении от берега стремятся к значению $p_\chi \approx 2.7$, которое характерно для развитого ветрового волнения, как было описано выше. При этом в комплексном эксперименте 08.06.2019, где преобладали волны зыби, наблюдаемые значения степенного показателя вблизи берега составляет $p_\chi \approx 3.4$,

что близко к значению 3.5 характерному для волн зыби с учётом пересчёта к частотным спектрам волн зыби, имеющих спектр со степенным показателем $p_\omega = 5$ [58, 76]. Таким образом, проведённые комплексные эксперименты в тихоокеанской акватории дали возможность дополнительно изучить закономерности развития спектров ветрового волнения океана, а также подтвердить представления о характеристиках спектров смешанного волнения и волн зыби.

Показано, что разработанный метод восстановления пространственных спектров волнения позволяет исследовать изменчивость характеристик пространственных спектров в обширных акваториях при наличие различных волновых систем — ветрового волнения и волн зыби. Метод позволил исследовать некоторые особенности зависимости степенного показателя пространственного спектра возвышений p_χ от разгона волнения в прибрежной зоне. С увеличением расстояния от берега величина этого показателя приближается к значению $p_\chi \approx 2.7$, которое является средним между значением соответствующим равновесному спектру Филипса и значением, соответствующим известной аппроксимации Тоба [19, 58]. В зоне максимального разгона показатель спектра практически не изменяется с расстоянием и близок к тому же значению $p_\chi \approx 2.7$. Показано, что в зоне ветровой тени на большом расстоянии от берега наблюдается плавное изменение степенного показателя между значением $p_\chi \approx 2.7$, соответствующим максимальному разгону и значением $p_\chi \approx 2.5$, которое в точности соответствует аппроксимации Тоба. Проведённые эксперименты показывают целесообразность применения разработанного подхода и разработанных алгоритмов для дистанционного измерения спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам спутниковых изображений.

5.5.3. Возможности применения разработанных методов для исследования аномальных явлений на морской поверхности

Предложенное развитие метода восстановления двумерных спектров морского волнения по спектрам спутниковых изображений может использоваться

для мониторинга аномальных процессов и явлений в океане [22, 27, 172]. В качестве примера приведём результаты исследований аномалии, вызванной глубинным стоком в акваторию бухты Мамала, описанных в работах [26, 47, 170, 178]

На рисунке 5.25 (а) показана приведенная в работе [170] панорама аномальных участков морской поверхности, связанных с воздействием турбулентных струй, вызванных стоком через заглубленное сбросовое устройство. Аномальные участки морской поверхности (квадраты с размером сторон 1.33) выделялись по появлению дополнительных узких (среднее уширение $\Delta\bar{\Lambda} \sim 4$) спектральных гармоник в двумерных пространственных спектрах фрагментов спутникового изображения высокого пространственного разрешения [22, 27, 172]. Средний пространственный период для этих спектральных компонент составлял величину $\Lambda = 90$. Эти спектральные гармоники удовлетворяют условию [170]: $\Delta\Lambda \ll \Lambda$, где Λ — пространственный период для этих узких спектральных гармоник.

Такие спектральные гармоники можно назвать «квазимохроматическими». Эти «квазимохроматические» спектральные гармоники вызваны поверхностными проявлениями возмущений, связанных с внутренними волнами, генерируемыми турбулентными струями глубинных стоков [170]. Подобных спектральных гармоник нет в фоновых спектрах. Такие эффекты описаны в работах [27, 170]. На рисунке 5.25 (а) различными цветами отмечены фрагменты спутникового изображения, соответствующего квадратным участкам морской поверхности с размером 1.33, с различной интенсивностью проявления аномалий, выделенных по спектрам фрагментов космического изображения [22, 170]. На рисунке 5.25 (б) в качестве примера показано угловое распределение энергии морских волн, полученное по двумерному спектру волнения, восстановленному с использованием предложенного метода, для фрагмента №11 спутникового изображения, расположенного юго-западнее диффузора сбросового устройства в области поверхностного проявления аномалии морской поверхности, вызванной заглубленным стоком. В полученном угловом распределении энергии отчет-

ливо различимы «квазимохроматические» волновые компоненты с пространственным периодом 90, генерируемые внутренними волнами, обусловленными воздействием турбулентных струй глубинного стока [22, 170]. Эти «квазимохроматические» спектральные компоненты выделены на рис. 5.25 (б) красными кружками. Для сравнения на рис. 5.25 (в) показано угловое распределение энергии, полученное аналогичным методом для фонового участка акватории (фрагмент 104), расположенного на расстоянии около 13 км к югу от диффузора. На этом рисунке не проявляются спектральные компоненты, подобные приведенным на рис. 5.25 (б), которые соответствуют аномальному участку морской поверхности. Участки поверхности, для которых были получены угловые распределения, отмечены на рис. 5.25(а) чёрными квадратами. На рисунке 5.25 (г) для сравнения приведены угловые распределения энергии морских волн с длиной 90 м для направлений 0-180 градусов, полученные по спектрам волнения, восстановленным с использованием развитого метода, для аномального №11 (кривая красного цвета) и для фонового №104 (кривая синего цвета) фрагментов спутникового изображения исследуемой акватории. На угловом распределении энергии волн, полученном на аномальном участке акватории (красная кривая), наблюдается отчётливый локальный максимум в направлении 170 градусов, который выделен красным кружком. В угловом распределении энергии волн, полученных на фоновом участке акватории (синяя кривая), отмеченные локальные максимумы отсутствуют. Эти результаты соответствуют результатам пространственной спектральной обработки космических изображений высокого пространственного разрешения, приведенных в работе [22, 170].

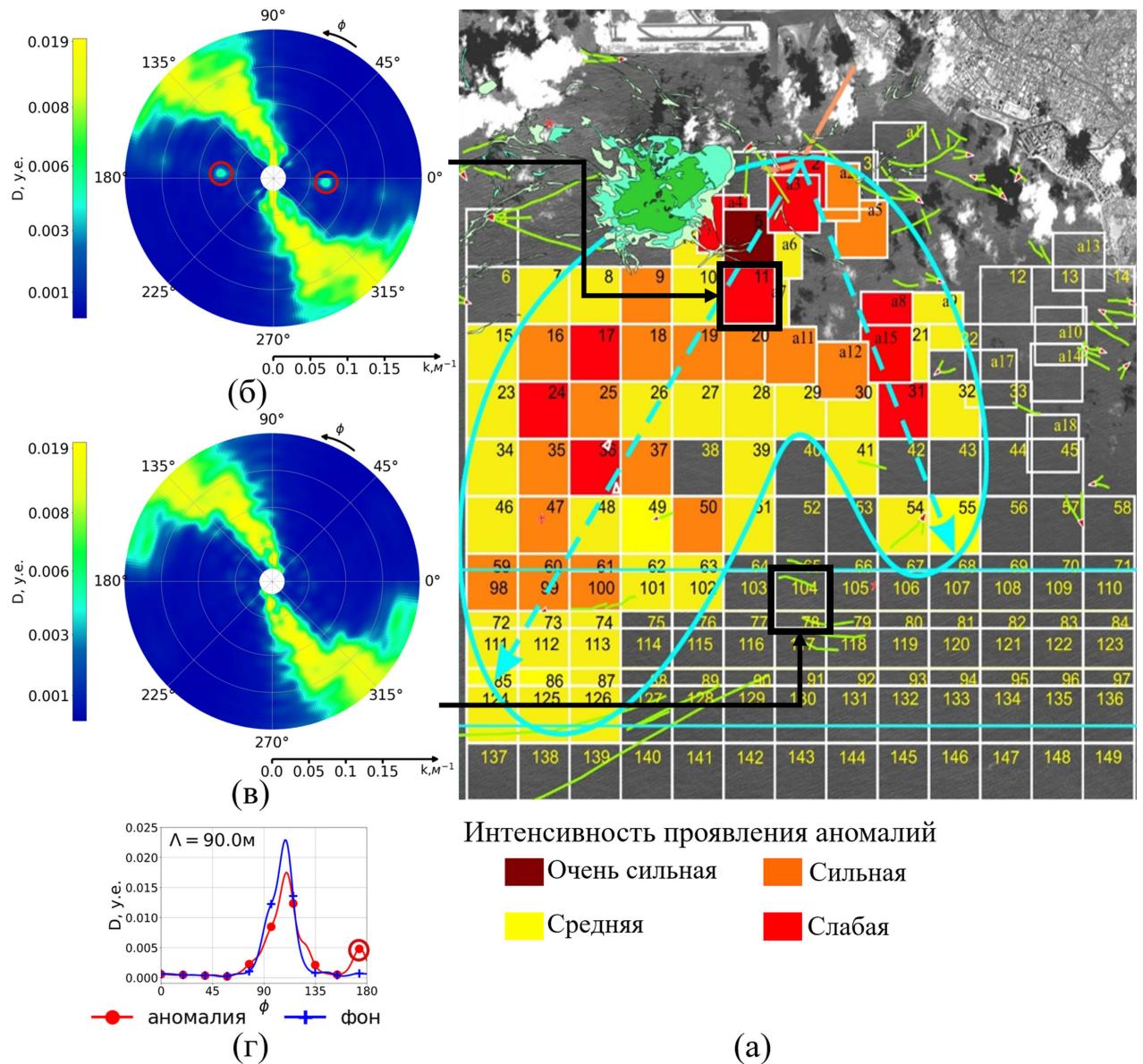


Рис. 5.25. Результаты исследования углового распределения энергии волн в области аномалий, вызванных глубинным сбросом: а) панорама аномальных участков морской поверхности, выделенных по пространственным спектрам фрагментов спутникового изображения [170]; (б, в) угловые распределения энергии волнения, полученные по спектрам морских волн, восстановленным по спектрам аномального и фонового фрагментов спутникового изображения; (г) сравнение фонового и аномального углового распределений энергии морских волн с длиной 90 м, полученным по спектрам волнения, восстановленным для аномального фрагмента №11 (кривые красного цвета) и для в фонового фрагмента №104 (кривые синего цвета) спутникового изображения.

Выводы к Главе 5

В главе получены следующие основные результаты:

- Продемонстрирована эффективность и адекватность применения метода восстановления спектров уклонов и возвышений морского волнения по космическим оптическим изображениям высокого пространственного разрешения. Пространственные спектральные характеристики морского волнения, оцениваемые по данным дистанционного зондирования сопоставлены с соответствующими характеристиками, измеряемыми контактными средствами в контролируемых условиях. В качестве подспутниковых измерений использовались данные решётки струнных волнографов, установленной на стационарной исследовательской платформе, данные стереосъёмки, выполняемой с высоким пространственным разрешением с малой высоты над поверхностью моря, данные дрейфующих волновых буёв. Сопоставление спектров волнения и его статистических характеристик продемонстрировало соответствие результатов, полученных при обработке спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и результатов обработки данных, полученных различными подспутниковыми средствами. Мера расхождения спектров волнения, полученных по спутниковым и подспутниковым данным, составляет 0.07.
- Посредством численной оптимизации подобраны значения параметров нелинейных восстанавливающих фильтров, эффективно работающих как в условиях развитого, так и в условиях развивающегося волнения, а также в присутствии волн зыби. Мера расхождения спектров волнения, полученных по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения и подспутниковым данным при оптимальных значениях этих параметров составляет 0.08 – 0.12. Это свидетельствует об адекватности предложенного метода восстановления спектров волнения по спектрам спутни-

ковых изображений в широком диапазоне частот.

- Показана перспективность разработанного метода дистанционного измерения спектров волнения для решения фундаментальных задач физической океанографии. Показано, что в интервале равновесия пространственные спектры волнения, допускают степенную аппроксимацию с показателем степени $p = (2.12 - 2.23) \pm (0.08 - 0.09)$. При этом для различных интервалов длин волн показатели степени составляют: $p = 2.1 \pm 0.08$ в диапазоне длин волн $\Lambda = 0.04 - 0.4$ м; $p = 2.23 \pm 0.09$ в диапазоне длин волн $\Lambda = 0.1 - 1.0$ м; $p = 2.22 \pm 0.08$ в диапазоне длин волн $\Lambda = 1.0 - 5.0$ м.
- Разработанный метод использован при исследованиях состояния поверхностного волнения, в том числе при космическом мониторинге естественных и антропогенных воздействий на морские акватории. Экспериментально подтверждена адекватность дистанционного измерения с использованием изображений высокого пространственного разрешения и разработанных восстанавливающих операторов, как средних по времени спектров морской поверхности, так и вариаций этих спектров, обусловленных нестационарностью волнения и аномалиями морской поверхности, связанными с антропогенными воздействиями.
- На основании результатов обработки спутниковых данных, полученных в области воздействия на поверхность внутренних волн, создаваемых турбулентными струями, вызванными глубинными стоками, продемонстрирована возможность использования предложенного метода для исследования и мониторинга аномалий, возникающих на морской поверхности и в приповерхностных слоях морей и океанов, проявляющихся в изменениях спектров волнения.
- Приведённые в главе результаты валидации метода дистанционного измерения пространственных спектров уклонов и возвышений морской по-

верхности по спутниковым изображениям с учётом численного моделирования аномальных процессов и явлений использованы при разработке фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования [20–22].

Заключение

1. Исследованы различные подходы к повышению информативности спутниковых изображений и предложены новые численные методы повышения пространственного разрешения данных при дистанционных измерениях. Разработаны методы повышения разрешения космических изображений, основанные на традиционных подходах к обработке изображений и предназначенные для совместного использования с методами машинного обучения при дистанционных измерениях. Разработаны вычислительные методы и алгоритмы повышения разрешающей способности космической аппаратуры основанные на пространственно-спектральном анализе улучшаемых изображений и синтезе изображения высокого разрешения. Методы используют экстраполяцию энергетических и фазовых спектров в области высоких пространственных частот. Разработан вероятностный метод повышения разрешения мультиспектральных изображений, основанный на использовании опорных панхроматических изображений, учёте статистических закономерностей, связывающих панхроматические изображения с мультиспектральными на локальных участках поверхности.

2. Разработаны методы и алгоритмы повышения пространственного разрешения спутниковых изображений, основанные на комплексировании методов машинного обучения с традиционными методами обработки изображений. Предложен новый вычислительный метод повышения пространственного разрешения космических изображений с использованием дополнительной априорной информации, представленной в векторной форме, предназначенный для повышения чёткости границ при мониторинге различных территорий. Разработан новый комплексный метод повышения пространственного разрешения изображений, объединяющий метод сверхразрешения на основе генеративно-состязательных нейронных сетей, не требующий априорной информации о деталях изображения и метод слияния, который обеспечивает высокое качество детализации с использованием алгоритмов, основанных на вероятностном анализе,

пространственном спектральном анализе и других классических подходах.

3. На основе проведенного анализа состояния развития систем трёхмерного машинного зрения с точки зрения решения задачи дистанционного измерения трёхмерных характеристик объектов и восстановления карт высот местности по одному или нескольким её снимкам показано, что наиболее эффективные методы дистанционного измерения трехмерных характеристик объектов основаны на комплексировании данных от двух или более сенсоров, объединенных в систему стереоскопического зрения. Предложен метод и алгоритмы восстановления трёхмерной поверхности объекта, предназначенные для работы в реальном масштабе времени. Предложенный метод основан на корреляционном алгоритме стереореконструкции, основанном на вычислительной теории стереоскопического зрения. Предложен и программно реализован алгоритм, работающий в реальном масштабе времени и восстанавливающий рельеф гладкой трёхмерной поверхности сложной формы по слабоконтрастным изображениям, получаемым в бинокулярной системе компьютерного зрения. Предложен подход к решению задачи измерения геометрических размеров наблюдаемых объектов в трёхмерном пространстве по двумерным данным, представленным в спутниковом изображении, основанный на комплексировании традиционных методов обработки изображения с методами, основанными на машинном обучении и анализе данных с применением искусственных нейронных сетей. Предложен численный метод извлечения структурной информации о наземных объектах из одиночного спутникового изображения, включающий применение нейросетевую семантическую сегментацию спутникового изображения и извлечение пространственных данных о наземных объектах с привлечением данных об условиях спутниковой съёмки.

4. Разработан метод восстановления пространственных спектров уклонов и возвышений поверхностного волнения по аэрокосмическим оптическим изображениям, основанный на применении восстанавливающих операторов, учитывают нелинейную модуляцию поля яркости уклонами морской поверхности. Ме-

тод включает в себя численный синтез полей уклонов морской поверхности с заданным пространственным спектром, моделирование поля яркости с учётом условий освещения и информации об условиях формирования изображений. При этом может использоваться подход, основанный на формировании и параметризации пространственно-частотных фильтров, восстанавливающих спектры поверхностного волнения. В качестве исходных данных при исследовании характеристик морского волнения с помощью разработанного метода могут использоваться мультиспектральные и панхроматические данные, получаемые с оптических систем высокого и сверхвысокого разрешения, устанавливаемых, на воздушных носителях и спутниках. Разработан метод нахождения оптимальных параметров восстанавливающего оператора, основанный на итерационной процедуре сопоставления спектров морского волнения, восстановленных по аэрокосмическим изображениям со спектрами волнения, измеренными с высокой точностью струнными волнографами в контролируемых условиях. В результате применения процедур численной оптимизации подобраны значения параметров нелинейных восстанавливающих фильтров, эффективно работающих как в условиях развитого, так и в условиях развивающегося волнения, а также в присутствии волн зыби. При оптимальных значениях этих параметров мера расхождения спектров волнения, полученных по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения и подспутниковым данным составляет 0.08 – 0.12. Разработан высокопроизводительный метод, алгоритм и исследовательское программное обеспечение для регистрации спектров морской поверхности по космическим изображениям. Показана возможность значительного увеличения производительности получения спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений за счет распараллеливания вычислений.

5. Проведённые исследования продемонстрировали эффективность и адекватность применения разработанного метода восстановления спектров уклонов и возвышений морского волнения по космическим спутниковым оптическим изоб-

ражениям высокого пространственного разрешения. В процессе проведения исследований пространственные спектральные характеристики морского волнения, оцениваемые по данным дистанционного зондирования, сопоставлялись с соответствующими характеристиками, измеряемыми подспутниковыми средствами в контролируемых условиях. Для сопоставления использовались данные решетки струнных волнографов, установленной на стационарной исследовательской гидрофизической платформе, данные стереосъемки, выполняемой с высоким пространственным разрешением с малой высоты над поверхностью моря, а также данные, полученные с дрейфующих волновых буёв. Сопоставление спектров волнения и его статистических характеристик продемонстрировало соответствие результатов, полученных при обработке спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и результатов обработки данных, полученных различными подспутниковыми средствами. Таким образом, экспериментально подтверждена адекватность дистанционного измерения с использованием изображений высокого пространственного разрешения и разработанного восстанавливающего оператора как средних по времени спектров морской поверхности, так и вариаций этих спектров, обусловленных нестационарностью волнения . Эксперименты, проведенные в различных акваториях, продемонстрировали возможность использования восстанавливающего оператора с оптимальными значениями параметров, найденными при определённых условиях получения космических оптических изображений морской поверхности для широкого диапазона условий волнообразования. На основании сопоставления космических данных с результатами измерений, выполненных с использований волновых буев, получена поправка к параметру восстанавливающего пространственно-частотного фильтра в диапазоне степенного спадания частотного спектра волнения для сложных условий волнообразования (длительный разгон, система волн, содержащая ветровые волны и различные волны зыби). Проведенные исследования продемонстрировали целесообразность применения разработанных методов восстановления спектров уклонов и возвышений мор-

ской поверхности по спектрам космических изображений высокого пространственного разрешения, адаптированных к различным условиям волнобразования.

Рекомендации. Полученные результаты могут быть использованы в области мониторинга различных территорий для обработки аэрокосмических изображений высокого и среднего пространственного разрешения при решении ряда фундаментальных и прикладных задач:

- для создания средств автоматической обработки данных дистанционного зондирования;
- для повышения информативности изображений, получаемых космической аппаратурой дистанционного зондирования, в том числе устанавливаемой на новых моделях космических аппаратов;
- для оценки возможностей существующей, разрабатываемой и перспективной аппаратуры, уточнение её параметров и определение путей модернизации, а также для создания программных и аппаратных средств для тестирования средств обработки спутниковой информации;
- создания наземных и бортовых программных и технических средств обработки, хранения и отображения информации;
- разработки измерительной аппаратуры для экспериментальных исследований объектов и явлений окружающей среды;
- разработки методов оперативного космического мониторинга спектров морского волнения при исследовании различных процессов и явлений, происходящих на обширных акваториях морей и океанов;
- разработке высокопроизводительных методов и средств обработки больших объемов данных, получаемых при космическом мониторинге, в том числе с использованием параллельных вычислений.

Перспективы дальнейшего исследования состоят в повышении качества разработанных методов и алгоритмов, в том числе на базе машинного обучения.

Программная реализация разработанных методов

Программные модули и комплексы, реализующие разработанные методы, зарегистрированы в государственном реестре программ для ЭВМ и внедрены в эксплуатацию:

- Игнатьев В.Ю., Матвеев И.А., Мурынин А.Б., Трекин А.Н. Программа для повышения пространственного разрешения мультиспектральных спутниковых изображений объектов железнодорожной инфраструктуры с использованием опорных изображений, предобработанных генеративно-состязательными нейросетями. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663415 от 27.01.2021.
- Бондур В. Г., Мурынин А. Б., Игнатьев В. Ю., Рихтер А. А. Модуль выявления изменений на подстилающей поверхности по разновременным мультиспектральным и радиолокационным космическим изображениям. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661300 от 22.10.2015.
- Бондур В. Г., Гапонова М. В., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н. Модуль О обучения классификаторов для космических снимков низкого и высокого разрешения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614299. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29 апреля 2013.
- Бондур В. Г., Гапонова М. В., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н. Модуль П расчета площади, пройденной огнем при природных пожарах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614800. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 мая 2013.

- Бондур В. Г., Гапонова М. В., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н. Модуль Э расчета эмиссий вредных примесей в атмосферу при лесных и торфяных пожарах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614241. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25 апреля 2013.
- Мурынин А. Б., Моисеенко К. Б., Скороход А. И., Васильева А. В., Гинзбург А. С. Модуль М моделирования состояния атмосферы при лесных и торфяных пожарах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615555. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13 июня 2013.
- Мурынин А. Б., Гороховский К. Ю., Игнатьев В. Ю., Рихтер А. А. Модуль оценки плодородия и выявления степени деградации земель. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616597. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11 июля 2013.
- Бондур В. Г., Гапонова Е. В., Игнатьев В. Ю., Мурынин А. Б. Модуль синтеза мультиспектральных изображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618294. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.09.2013.

Благодарности.

Автор выражает признательность отделу 13 ФИЦ ИУ РАН и лично Цуркову Владимиру Ивановичу за научные консультации, Матвееву Ивану Алексеевичу за полезные обсуждения и деловые советы в процессе подготовки работы. Автор также признателен Егоровой Евгении Кирилловне за помощь в оформлении результатов работы.

Автор выражает благодарность коллективу НИИ "АЭРОКОСМОС" и лично академику РАН Бондуру Валерию Григорьевичу за продолжительную и пло-

дотворную совместную работу над крупными научными проектами, многие результаты которых положены автором в основу диссертационной работы.

Внедрение результатов диссертации

Результаты, представленные в диссертации, использованы в работе ряда организаций, приводимых ниже.

- Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС"(НИИ "АЭРОКОСМОС лидер научного направления, связанного с аэрокосмическими исследованиями Земли, разработкой методов и технологий дистанционного мониторинга). Результаты глав 1,2,3,4,5 использованы в НИИ "АЭРОКОСМОС" при выполнении ряда проектов. Исследовательское программное обеспечение, основанное на полученных в работе результатах, прошло экспериментальную отработку в НИИ «АЭРОКОСМОС».
- Ракетно-космическая корпорация «Энергия» (ПАО «РКК «Энергия», головное предприятие в области пилотируемого освоения космоса). Результаты глав 1,2 в части реализации разработанных методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения спутниковых изображений использовались в РКК «Энергия» при создании программного обеспечения, эксплуатационной и методической документации для вторичной обработки космических изображений, получаемых с космического аппарата «Egyptsat-A».
- Научно-исследовательский институт гоcмических систем имени А.А. Максимова (НИИКС). Результаты глав 1,2 использовались в НИИКС при создании технологии повышения разрешения космических снимков, программного обеспечения, методической и отчётной документации в ходе выполнении работ в рамках научно-технической программы Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения по-

требителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли».

- ООО «SPIRIT Corp» (отечественный производитель софта с мировым именем). Результаты главы 3 использованы в «SPIRIT Corp» в части методов и алгоритмов измерений трёхмерных характеристик объектов при создании программно-аппаратного комплекса обработки изображений, предназначенного для обнаружения человека в зоне наблюдения и отслеживания его перемещения. Применение алгоритмов стерео реконструкции в реальном времени позволило повысить надежность работы компьютерной системы видеонаблюдения.
- Московский физико-технический институт (МФТИ, национальный исследовательский университет). Результаты глав 1,2,3,4 использованы в МФТИ в курсе лекций "Обработка изображений в системах искусственного интеллекта".
- АО «НИИАС» (ведущий институт холдинга «РЖД» в области интеллектуальных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов, мониторинга и диагностики объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта). Результаты глав 1,2,3 использовались в АО «НИИАС» при создании макета исследовательского программного комплекса повышения качества изображений в ходе выполнения прикладных исследований и экспериментальных разработок по теме «Разработка методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения аэрокосмических изображений для мониторинга объектов железнодорожного транспорта», а также при опытной эксплуатации созданного макета.

Использование результатов диссертации подтверждено соответствующими актами внедрения.

Список литературы

1. Александров В. В., Горский Н. Д. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход. М.: Наука, 1985. 192 с.
2. Алексанин А. И., Морозов М. А., Фомин Е. В. Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 9–16. DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16.
3. Алексанин А. И., Ким В., Константинов О. Г., Коротченко Р. А., Ярошук И. О. Наблюдение внутренних волн по видеоизображениям // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 3 (29). С. 47–53. DOI 10.25808/24094609.2019.29.3.006.
4. Андрианов Д. Е., Еремеев С. В., Ковалев Ю. А., Титов Д. В. Методы обработки пространственных структур на спутниковых изображениях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 1. С. 21–31. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-1-21-31.
5. Андрианов Д. Е., Еремеев С. В., Купцов К. В. Алгоритм семантической классификации пространственных объектов и сцен с использованием топологических признаков и классификатора random forest на многомасштабных картах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 4 (44). С. 8–18.
6. Антипова Н. В., Гвоздев О. Г., Козуб В. А., Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Восстановление структурной информации об антропогенных объектах из одиночных аэрокосмических изображений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2023. № 3. С. 89–105. DOI 10.31857/S0002338823030010.
7. Барановский В. Д., Бондур В. Г., Кулаков В. В., Малинников В. А., Мурынин А. Б. Калибровка дистанционных измерений двумерных пространственных спектров волнения по оптическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 1992. № 2. С. 59–67.

DOI 10.7868/S0205961416010048.

8. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые подходы в океанологии и морской геологии / Ред. А. П. Лисицин. М.: Наука, 2003. 648 с.
9. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17 + 6 с. цв. вклейк.
10. Бондур В. Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
11. Бондур В. Г. Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2000. № 5. С. 16–27.
12. Бондур В. Г. Модели полей излучения для систем дистанционного зондирования. Курс лекций // М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2008. 389 с.
13. Бондур В. Г. Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исследование Земли из космоса. 2000. № 5. С. 28–44.
14. Бондур В. Г. Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера-океан по пространственным спектрам изображений // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 217–229.
15. Бондур В. Г. Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды. Курс лекций // М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2008. 369 с.
16. Бондур В. Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.

DOI 10.7868/S0205961414010035.

17. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Гребенюк Ю. В., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Чёрного моря с использованием космических данных // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–12.
18. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Замшин В. В., Серебряный А. Н., Латушкин А. А., Ли М. Е., Мартынов О. В., Хурчак А. П., Гринченко Д. В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Чёрного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22.
19. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Мурынин А. Б. Восстановление спектров морского волнения по космическим изображениям высокого разрешения при различных условиях волнообразования // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 45–58.
20. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Чимитдоржиев Т. Н., Мурынин А. Б. [и др.] Разработка фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше, в том числе в арктическом регионе по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования: отчет о НИР по Этапу 1 (промежуточный) // Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС». Интернет-номер 221031500150-0. Регистрационный номер 221063000040-0. М., 2020. 511 с.
21. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Мурынин А. Б., Замшин В. В. [и др.] Разработка фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше, в том числе в арктическом регионе по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования: отчет о НИР по Этапу 2 (промежуточный) // Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС». Интернет-номер И222040200004-0. Регистрационный номер 222042000018-3.

М., 2021. 789 с.

22. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Мурынин А. Б.[и др.]. Разработка фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше, в том числе в арктическом регионе по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования [Текст]: отчет о НИР по Этапу 3 // Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС». Интернет-номер И223020800072-4. Регистрационный номер 223022800009-4. М., 2022. 1091 с.
23. Бондур В. Г., Гороховский К. Ю., Игнатьев В. Ю., Мурынин А. Б., Гапонова Е. В. Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 61–68.
24. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Ежова Е. В., Казаков В. И., Сергеев Д. А., Соустова И. А., Троицкая Ю. И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 833–845.
25. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Морозов Е. Г. Регистрация из космоса и моделирование коротких внутренних волн в прибрежных зонах океана // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 4. С. 543–548.
26. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Сабинин К. Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о.Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
27. Бондур В. Г., Дулов В. А., Козуб В. А., Мурынин А. Б., Юровская М.В., Юровский Ю.Ю. Восстановление углового распределения энергии морских волн по спектрам спутниковых изображений // Доклады академии наук. 2023, Т. 509. № 1. С. 125–133. DOI 10.31857/S2686739722602575.
28. Бондур В. Г., Дулов В. А., Мурынин А. Б., Игнатьев В. Ю. Восстановление спектров морского волнения по спектрам космических изображений

- в широком диапазоне частот // Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 716–728. DOI 10.7868/S0002351516060055.
29. Бондур В. Г., Дулов В. А., Мурынин А. Б., Юровский Ю. Ю. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактным данным // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1-2. С. 7–24. DOI 10.7868/S0205961416010048.
 30. Бондур В. Г., Журбас В. М., Гребенюк Ю. В. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
 31. Бондур В. Г., Зубков Е. В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
 32. Бондур В. Г., Иванов В. А., Фомин В. В. Особенности распространения загрязненных вод из подводного источника в стратифицированной среде прибрежной акватории // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 453–461. DOI 10.1134/S0002351518040053.
 33. Бондур В. Г., Килер Р. Н., Старченков С. А., Рыбакова Н. И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49 + 9 стр. цв. вклейк.
 34. Бондур В. Г., Кулаков В. В., Мурынин А. Б. Численное моделирование оптических изображений пространственно неоднородного морского волнения // 14-я Международная конференция по когерентной нелинейной оптике (КиНО'91). Ленинград, 1991. Т. 3. С. 27.
 35. Бондур В. Г., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., А. Н. Распознавание выгоревших территорий на мультиспектральных изображениях с адаптируе-

- мой маской облачности // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 131, № 6. С. 153–156.
36. Бондур В. Г., Мурынин А. Б. Восстановление спектров поверхностного волнения по спектрам изображений с учетом нелинейной модуляции поля яркости // Оптика атмосферы и океана. 1991. Т. 4. № 4. С. 387–393.
 37. Бондур В. Г., Мурынин А. Б. Восстановление характеристик поверхностного волнения по аэрокосмическим изображениям // 12-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Электрон. копия тезисов докладов. Москва, 2014. № XII.A.353. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4634> (дата обращения: 14.11.2021).
 38. Бондур В. Г., Мурынин А. Б. Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // Исследования Земли из космоса. 2015. № 6. С. 3–14.
 39. Бондур В. Г., Мурынин А. Б. Численный синтез тестовых изображений природных образований с заданными пространственными спектрами // 14-я Международная конференция по когерентной нелинейной оптике (КИНО'91). Ленинград, 1991. Т. 1. С. 11–12.
 40. Бондур В. Г., Мурынин А. Б., Игнатьев В. Ю. Оптимальный выбор параметров для восстановления спектров морского волнения по аэрокосмическим изображениям // Машинное обучение и анализ данных. 2016. Т. 2. № 2. С. 218–230.
 41. Бондур В. Г., Мурынин А. Б., Матвеев И. А., Трёкин А. Н., Юдин И. А. Метод вычислительной оптимизации в задаче сопоставления растровой и векторной информации при анализе спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования. 2013. Т. 10. № 4. С. 98–106.
 42. Бондур В. Г., Мурынин А. Б., Рихтер А. А., Шахраманьян М. А. Разработка алгоритма оценки степени деградации почвы по мультиспектральным изображениям // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 6(131).

- С. 130–135.
43. Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В. Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских волн на Гавайском шельфе // Доклады академии наук. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104. DOI 10.7868/S0869565213130173.
 44. Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В. Генерация инерционно-гравитационных волн на островном шельфе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 51. № 2. С. 1–7.
 45. Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В. Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Чёрного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 135–142.
 46. Бондур В. Г., Савин А. И. Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исследование Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24–33.
 47. Бондур В. Г., Филатов Н. Н., Гребенюк Ю. В., Долотов Ю. С., Здоровеннов Р. Э., Петров М. П., Цидилина М. Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
 48. Бондур В. Г., Шарков Е. А. Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // Океанология. 1982. Т. 22. № 3. С. 372–379.
 49. Бондур В. Г., Шарков Е. А. Статистические характеристики элементов линейной геометрии пенных структур на поверхности моря по данным оптического зондирования // Исследование Земли из космоса. 1986. № 4. С. 21–31.
 50. Бондур В. Г., Шахраманьян М. А., Мурынин А. Б., Игнатьев В. Ю., Кузнецова Т. В., Трекин А. Н., Гороховский К. Ю. Разработка методов повы-

шения разрешающей способности космической аппаратуры, основанных на анализе и синтезе изображений инфракрасного и микроволнового диапазонов: Отчет о НИР. // Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга АЭРОКОСМОС. Регистрационный номер: 114111440049. М., 2014. 344 с.

51. Бочкарева В. Г., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Цурков В. И. Методы улучшения качества изображений, основанные на пространственном спектральном анализе // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 6. С. 115–123.
52. Бутаков Е. А., Островский В. И., Фадеев И. Л. Обработка изображений на ЭВМ. М.:Радио и связь, 1987. 240 с.
53. Визильтер Ю. В., Выголов О. В., Желтов С. Ю., Рубис А. Ю. Комплексирование многоспектральных изображений для систем улучшенного видения на основе методов диффузной морфологии // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. № 4. С. 103–114. DOI 10.1134/S000233881903020X.
54. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю. Использование проективных морфологий в задачах обнаружения и идентификации объектов на изображениях // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 2. С. 125–138.
55. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Механика, управление и информатика. 2011. № 6. С. 11–44.
56. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Ларетина Н. А. Проективные морфологии на базе операторов фильтрации и сегментации изображений, вычислимых методом динамического программирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. Т. 6. С. 14–24.
57. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 609 с.
58. Воробьев В. Е., Мурынин А. Б. Восстановление спектров пространственно-

- неоднородного морского волнения при космическом мониторинге обширных акваторий // Исследование Земли из космоса. 2020. № 6. С. 47–58.
59. Воробьев В. Е., Мурынин А. Б., Хачатрян К. С. Высокопроизводительная регистрация пространственных спектров морского волнения при оперативном космическом мониторинге обширных акваторий // Исследование Земли из космоса. 2020. № 2. С. 56–68.
 60. Гвоздев О. Г., Козуб В. А., Кошелева Н. В., Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Нейросетевой метод построения трёхмерных моделей ригидных объектов по спутниковым изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 1, с. 48–55. DOI 10.17587/mau.22.48–55.
 61. Гвоздев О. Г., Козуб В. А., Кошелева Н. В., Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Построение трёхмерных моделей ригидных объектов по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения с использованием сверточных нейронных сетей // Исследование Земли из космоса. 2020. № 5. С. 78–96. DOI 10.31857/S020596142005005X.
 62. Гвоздев О. Г., Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Комплекс прикладных решений по построению и обучению искусственных нейронных сетей для семантической сегментации аэрокосмических изображений произвольной канально-спектральной структуры в условиях дефицита обучающих данных // Матер. 19-й Всеросс. конф. с междунар. участием: Математические методы распознавания образов (ММРО-2019, г. Москва). Российская академия наук. 2019. С. 344–348.
 63. Гнеушев А. Н., Мурынин А. Б. Адаптивный градиентный метод выделения контурных признаков объектов на изображениях реальных сцен // Известия РАН. Теория и системы управления. 2003. № 6. С. 153–160.
 64. Гороховский К. Ю., Игнатьев В. Ю., Мурынин А. Б., Ракова К. О. Поиск оптимальных параметров вероятностного алгоритма повышения пространственного разрешения мультиспектральных спутниковых изображений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 6. С. 112–124.

DOI 10.7868/S0002338817060099.

65. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2013614241 Модуль Э расчета эмиссий вредных примесей в атмосферу при лесных и торфяных пожарах: зарег. 25.04.2013: опубл. 20.06.2013 / Трёкин А. Н., Бондур В. Г., Гапонова М. В., Матвеев И. А., Мурынин А. Б.
66. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2013614299 Модуль О обучения классификаторов для космических снимков низкого и высокого разрешения: зарег. 29.04.2013: опубл. 20.06.2013 / Трёкин А. Н., Бондур В. Г., Гапонова М. В., Матвеев И. А., Мурынин А. Б.
67. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2013614800 Модуль П расчета площади, пройденной огнем при природных пожарах: зарег. 21.05.2013: опубл. 20.06.2013 / Трёкин А. Н., Бондур В. Г., Гапонова М. В., Матвеев И. А., Мурынин А. Б.
68. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2013618294 Модуль синтеза мультиспектральных изображений: Государственная регистрация программы для ЭВМ: зарег. 05.09.2013: опубл. 20.12.2013 / Игнатьев В. Ю., Бондур В. Г., Гапонова Е. В., Мурынин А. Б.
69. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017663599 Модуль повышения разрешения с использованием априорной информации в векторной форме при анализе объектов и границ: зарег. 07.12.2017: опубл. 07.12.2017 / Трёкин А. Н., Мурынин А. Б.
70. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018616540 Модуль оценки качества повышения разрешающей способности космической аппаратуры наблюдения инфракрасного и микроволнового диапазонов для бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли: зарег. 01.06.2018: опубл. 01.06.2018 / Игнатьев В. Ю., Мурынин А. Б., Трекин А. Н.
71. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2020619750 Модуль оценки индексов подстилающей поверхности и классификации поверхности: зарег. 24.08.2020: опубл. 24.08.2020 / Рихтер А. А., Мурынин А. Б. Пра-

вообладатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» (RU)

72. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2020663415 Программа для повышения пространственного разрешения мультиспектральных спутниковых изображений объектов железнодорожной инфраструктуры с использованием опорных изображений, предобработанных генеративно-состязательными нейросетями: зарег. 27.10.2020: опубл. 27.10.2020 / Игнатьев В. Ю., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н.
73. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 528 с.
74. Гурченков А. А., Бочкарева В. Г., Мурынин А. Б., Трёкин А. Н. Улучшение качества изображений методом экстраполяции пространственных спектров // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2016. № 2. С. 91–102.
75. Гурченков А. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н., Игнатьев В. Ю. Метод объектно-ориентированной классификации объектов подстилающей поверхности в задаче аэрокосмического мониторинга состояния импактных районов Арктики // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2017. № 3(72). С. 135–146.
76. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.
77. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 287 с.
78. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988. 488 с.
79. Документация по Visual Basic // Microsoft: сайт URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/visual-basic/> (дата обращения: 19.09.2019).

80. Дулов В. А., Юровская М. В. Спектральные контрасты коротких ветровых волн в искусственных сликах по фотографиям морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 3. С. 373–386. DOI 10.22449/0233-7584-2021-3-373-386.
81. Желтов С. Ю., Себряков Г. Г., Татарников И. Б. Компьютерные технологии создания геопространственных трехмерных сцен, использующих комплексирование географической информации и синтезированных пользовательских данных // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 8. С. 2–10.
82. Ивонин Д. В., Иванов А. Ю. О классификации пленочных загрязнений моря на основе обработки поляризационных радиолокационных данных спутника TerraSAR-X // Океанология. 2017. Т. 57. № 5. С. 815–829. DOI 10.7868/S003015741705015X.
83. Игнатьев В. Ю., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трёкин А. Н. Оценка качества изображений при повышении разрешения на основе пространственно-спектрального синтеза // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2017. Т. 72. № 1. С. 124–141.
84. Игнатьев В. Ю., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Усманова А. А., Цурков В. И. Повышение пространственного разрешения панхроматических спутниковых изображений на основе генеративных нейросетей // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. № 2. С. 62–70. DOI 10.31857/S0002338821020074.
85. Игнатьев В. Ю., Мурынин А. Б. Метод и алгоритмы прогнозирования сезонных характеристик областей антропогенного воздействия с использованием многолетних космических данных // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 3. С. 135–143.
86. Игнатьев В. Ю., Трекин А. Н., Якубовский П. Ю. Глубокие нейросети для вычисления параметров зданий по одномоментному космическому изображению // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 5.

- С. 116–128. DOI 10.31857/S0002338820050078.
87. Ичас М. О природе живого: механизмы и смысл. М.:Мир, 1994. 496 с.
 88. Кадничанский С. А. Сравнение производительности различных цифровых аэрофотосъемочных систем при аэрофотосъемке больших территорий // Геопрофи. 2011. № 8. С. 18–24.
 89. Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И. Реконфирируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / ред. И. А. Каляев. Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
 90. Каляев И. А., Левин И. И. Реконфирируемые вычислительные системы на основе ПЛИС . Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2022. 475 с.
 91. Казарян М. Л., Мурынин А. Б., Рихтер А. А., Шахраманьян М. А. Построение 3D-моделей ригидных объектов по одному изображению методом пространственных сеток // Информация и космос. 2018. № 4. С. 90–101.
 92. Князь В. А., Крыченков В. Ф., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Салтыкова Е. Б. Исследования корреляций между асимметриями лица и патологиями зрения человека методами трехмерного моделирования // Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем. 2007. Т.29. № 1. С. 224–229.
 93. Князь В. А., Крыченков В. Ф., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Салтыкова Е. Б. Диагностика патологий зрения человека по антропометрическим данным лица методами технического зрения // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2009. № 7. С. 48–54.
 94. Колмогоров В. Н., Матвеев И. А., Мурынин А. Б. Восстановление поверхности движущегося объекта в системе компьютерного зрения // Сообщения по прикладной математике. Препринт ВЦ РАН. 1999. 25 с.
 95. Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи — Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюезному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале

- УФН, 2006. Т. 176. № 7. С. 762–770.
96. Козуб В. А., Гвоздев О. Г., Матвеев И. А., Мурынин А. Б. Нейросетевая сегментация объектов хозяйственной инфраструктуры на спутниковых изображениях высокого разрешения. // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. 94. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.
 97. Ветер, волны и морские порты / под ред. Ю. М. Крылова. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
 98. Кудрявцев В. Н., Иванова Н. А., Гущин Л. А., Ермаков С. А. Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2008. Препринт № 765. 30 с.
 99. Кудряшов А. П., Соловьев И. В. Реконструкция текстурированной модели городского пространства по топографическому плану и фотоснимкам // Программные продукты и системы. 2019. № 3(32). С. 496–503. DOI 10.15827/0236-235X.127.496-503.
 100. Кузнецов В. Д., Матвеев И. А., Мурынин А. Б. Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация информационного пространства // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 4. С. 50–53.
 101. Левин Б. А. Комплексный мониторинг транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. 2017. № 1. С. 14–21.
 102. Лейкин И. А., Розенберг А. Д. Измерение высокочастотного спектра океанских волн с дрейфующего судна // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № П. С. 1188–1192.
 103. Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д. Абразия морских берегов России // Вестник московского университета. Серия 5: География. 2009. № 4. С. 40–44.
 104. Лупян Е. А., Шарков Е. А. О критерии восстановления спектральных ха-

- рактеристик шероховатой морской поверхности по её оптическому изображению. // Исслед. Земли из космоса. 1986. Т. 2. С. 68–76
105. Матвеев И. А., Мурынин А. Б. Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация алгоритмов восстановления поверхности // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 3. С. 149–155.
 106. Матвеев И. А. Модели распознаваемых объектов в системе компьютерного стереозрения реального времени. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов, систем и сетей. Москва, 1999. 122 с.
 107. Матвеев И. А., Мурынин А. Б. Принципы построения системы стереоскопического зрения для управления движением робота // Известия РАН. Теория и системы управления. 2003. № 3. С. 184–192.
 108. Матвеев И. А., Трёкин А. Н. Метод обнаружения автомобилей на аэрокосмических снимках // Машинное обучение и анализ данных. 2014. № 7. С. 828–834.
 109. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
 110. Мурынин А. Б. Автоматическая система распознавания личности по стереоизображениям // Известия РАН. Теория и системы управления. 1999. Т. 38. № 1. С. 100–108.
 111. Мурынин А. Б. Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям в нелинейной модели поля яркости // Исследование Земли из космоса. 1990. № 6. С. 60–70.
 112. Мурынин А. Б. Параметризация фильтров, восстанавливающих пространственные спектры уклонов морской поверхности по оптическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 1991. № 5. С. 31–38.
 113. Мурынин А. Б., Десятчиков А. А., Ковков Д. В., Лобанцов В. В., Маковкин К. А., Матвеев И. А., Чучупал В. Я. Комплекс алгоритмов для

- устойчивого распознавания человека // Известия РАН. Теория и системы управления. 2006. № 6. С. 119–130.
114. Мурынин А. Б., Десятчиков А. А., Ковков Д. В., Лобанцов В. В., Маковкин К. А., Матвеев И. А., Чучупал В. Я. Мультимодальная биометрия – перспективное решение. Объединение алгоритмов для повышения надежности распознавания человека // Системы безопасности. 2006. № 6. С. 156–160.
 115. Мурынин А. Б., Бондур В. Г., Игнатьев В. Ю., Гороховский К. Ю. Прогнозирование урожайности на основе многолетних космических наблюдений за динамикой развития вегетации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 245–256.
 116. Мурынин А. Б., Лупян Е. А. Восстановление пространственных спектральных характеристик границы океан-атмосфера по данным оптического зондирования // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 3. С. 299–305.
 117. Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Особенности применения методов и алгоритмов реконструкции трёхмерной формы ригидных объектов по данным панорамной съёмки // Машинное обучение и анализ данных. 2018. Т. 4. № 4. С. 235–247. DOI 10.21469/22233792.4.4.02.
 118. Мурынин А. Б., Рихтер А. А., Шахраманьян М. А. Выбор информативных признаков для выделения областей размещения отходов по космическим изображениям высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 29–44. DOI 10.31857/S0205-96142019229-44.
 119. Мурынин А. Б., Серебренников О. А., Кулаков В. В., Большаков С. А., Маковкин К. А., Чучупал В. Я., Матвеев И. А., Скорик М. Е. Автоматическая система распознавания личности по характеристикам изображения и голоса: Препринт ВЦ РАН, 1997. 46 с.
 120. Мурынин А. Б., Трёкин А. Н., Игнатьев В. Ю., Кульченкова В. Г., Ракова К. О. Метод повышения разрешения космических изображений ригидных объектов // Машинное обучение и анализ данных. 2019. № 5.

С. 296–308.

121. Мурынин А. Б., Цурков В. И. Принципы оптимизации информативных признаков в задаче автоматического распознавания лица человека компьютерной системой // Препринт ВЦ РАН, 1997. 36 с.
122. Мясоедов А. Г. Солнечный блик как «инструмент» исследования океана из космоса. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Специальность 25.00.28 – Океанология. СПб, 2014. 118 с.
123. Опенхайм А. В., Лим Д. С. Важность фазы при обработке сигналов. // ТИИЭР. 1983. Т.69, № 5, с. 39–53.
124. Панин С. В., Чемезов В. О., Любутин П. С. Метод определения характеристических точек изображения в системах стереозрения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 224–230.
125. Патент № 2315352 Российская Федерация, МПК G06K 9/46 (2006.01), G06T 7/20 (2006.01). Способ и система для автоматического обнаружения трехмерных образов: № 2005133866/09: заявл. 02.11.2005: опубл. 20.01.2008 Бюл. № 2. / Мурынин А. Б., Базанов П. В., Десятчиков А. А., Мун В. Дж., Лии Я. Дж., Янг Х. К. Патентообладатели: Корпорация "Самсунг Электроникс Ко., Лтд."(KR), Корпорация "Эс1"(KR).
126. Патент № 2315357 Российской Федерации, МПК G06T 7/20 (2006.01), G06K 9/36 (2006.01), G08B 13/196 (2006.01). Способ детектирования объекта: № 2003134283/09: заявл. 27.11.2003: опубл. 20.01.2008 Бюл. № 2. / Мун В. Дж., Ли Й. Дж., Пак М. С., Мурынин А. Б., Кузнецов В. Д., Иванов П. А. Патентообладатели: Корпорация "Самсунг Электроникс Ко., Лтд."(KR), Корпорация "Эс1"(KR).
127. Патент № 2316051 Российской Федерации, МПК G06T 7/00 (2006.01), G06K 9/78 (2006.01), G10L 15/00 (2006.01), G10L 17/00 (2006.01). Способ и система автоматической проверки присутствия лица живого человека в биометрических системах безопасности: № 2005100267/09: заявл.

- 12.01.2005: опубл. 27.01.2008 Бюл. № 3. / Мун В. Дж., Мурынин А. Б., Базанов П. В., Буряк Д. Ю., Ли Ю. Дж., Янг Х. К. Патентообладатели: САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС Ко., Лтд. (KR), Корпорация С1 (KR).
128. Патент № 2365995 Российская Федерация, МПК G06K 9/46 (2006.01). Система и способ регистрации двухмерных изображений: № 2005102210/09: заявл. 31.01.2005: опубл. 27.08.2009 Бюл. № 24. / Мун В. Дж., Мурынин А. Б., Лобанцов В. В., Десятчиков А. А., Кузнецов В. Д., Ли Ю. Дж., Янг Х. К. Патентообладатели: САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС Ко., Лтд. (KR), Корпорация С1 (KR).
129. Патент № 2370817 Российская Федерация, МПК G06K 9/80 (2006.01), G06T 7/60 (2006.01), A61B 5/117 (2006.01). Система и способ отслеживания объекта: № 2004123248/09: заявл. 29.07.2004: опубл. 20.10.2009 Бюл. № 29. / Мун В. Дж., Мурынин А. Б., Базанов П. В., Кузнецов В. Д., Фаткина С. Ю., Ли Ю. Дж., Янг Х. К. Патентообладатели: САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС Ко., Лтд. (KR), Корпорация С1 (KR).
130. Полников В. Г. Роль механизмов эволюции в формировании равновесного спектра ветровых волн // ИзвестияРАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 462–473. DOI 10.1134/S0002351518040120.
131. Прэtt У. Цифровая обработка изображений. Пер с англ. М.:Мир, 1982. 312 с.
132. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в морях и океанах. Под редакцией Нестерова Е. С. М.: Росгидромет., 2013. 337 с.
133. Рихтер А. А., Шахраманьян М. А., Казарян М. Л. Мурынин А. Б. Оценка геометрических параметров областей замусоривания по мультиспектральным космическим изображениям // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-13. С. 2866–2870.
134. Рихтер А. А., Шахраманьян М. А., Казарян М. Л. Мурынин А. Б. Разработка метода оценки степени деградации почвы на основе данных долгосрочных наблюдений // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-14.

С. 3095–3099.

135. РКЦ-Прогресс, Космический аппарат «Ресурс-П» URL: https://www.samspace.ru/products/earth_remote_sensing_satellites/ka_resurs_p/ (дата обращения: 04.04.2021).
136. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001.
137. Титов Г. И. Перенос излучения в модели разорванной облачности, построенной на основе пуассоновского потока точек // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 9. С. 940–948.
138. Трёкин А. Н., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Бочкарева В. Г. Метод повышения разрешения космических изображений с использованием априорной информации в векторной форме для сохранения границ // Тезисы докладов 17-й Всероссийской конференции с международным участием ММРО-17. 2015. С. 134–135.
139. Трубкин И. П. Ветровое волнение. Взаимодействие и расчет вероятностных характеристик. М.: Научный мир, 2007. 264 с.
140. Тужилкин А. Ю. Распознавание и реконструкция 3D-объектов по спутниковым изображениям на основе сравнения спектров графов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. С. 3727–3732.
141. Филлипс О. М. Динамика верхнего слоя океана: Пер. с англ.- М.: Мир, 1980. 319 с.
142. Харкевич А. А. Спектры и анализ. 4-е изд. Москва: ЛКИ, 2007. 89 с.
143. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение: Пер с англ. – М.:Мир, 1990. 240 с.
144. Центр коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» ФИЦ ИУ РАН: офиц. сайт // URL: <http://www.frccsc.ru/ckr> (дата обращения: 10.02.2022).
145. Цурков В. И. Аналитическая модель сохранения кромки при подавлении шумов посредством анизотропной диффузии // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 3. С. 107–110.

146. Цурков В. И., Мурынин А. Б., Матвеев И. А. [и др.] Разработка методов и алгоритмов повышения пространственного разрешения аэрокосмических изображений для мониторинга объектов железнодорожного транспорта: Заключительный отчет о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук. Регистрационный номер 119122790042-2. М., 2020. 392 с.
147. Шахраманьян М. А., Мурынин А. Б., Игнатьев В. Ю., Трекин А. Н., Ракова К. О. Разработка методов и математических моделей повышения разрешающей способности космической аппаратуры наблюдения инфракрасного и микроволнового диапазонов для бортовой аппаратуры дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) маломассогабаритных космических аппаратов и их экспериментальная отработка: Отчет о НИР. Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга АЭРОКОСМОС. Регистрационный номер: 114111440049. М., 2017. 374 с.
148. Шахраманьян М. А., Рихтер А. А., Мурынин А. Б., Казарян М. Л. Методика построения 3D-модели объектов правильной формы по одному изображению и ее применение в задаче космического мониторинга объектов захоронения отходов // Информация и космос. 2018. № 2. С. 76–81.
149. Шокуров М. В., Дулов В. А., Скиба Е. В., Смолов В. Е. Ветровые волны в прибрежной зоне Южного берега Крыма – оценка качества моделирования на основе морских натурных измерений // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 230-241. DOI 10.7868/S0030157416020192.
150. Юровская М. В., Кудрявцев В. Н., Шапрон Б., Дулов В. А. Интерпретация оптических спутниковых изображений Черного моря в зоне солнечного блика // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2014. С. 145–167.
151. Яншин В. В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы.

М.:Машиностроение, 1994. 112 с.

152. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М.:Советское радио, 1979. 312 с.
153. Adamo M., Giacomo C., Vito P., Guido P. Combined use of SAR and Modis imagery to detect marine oil spills // Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering 2005. Vol. 5980. Pp. 12. DOI 10.1117/12.627505.
154. Open Dataset for Building Height Estimation / Aeronetlab, Skoltech // GitHub: website URL: <https://github.com/aeronetlab/open-datasets> (дата обращения: 18.04.2020).
155. Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Garzelli A., Selva M. MTF-tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2006. Vol. 72. Pp. 591–596. DOI 10.14358/PERS.72.5.591.
156. Aiazzi B., Baronti S., Selva M. Improving component substitution pansharpening through multivariate regression of MS + Pan data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. № 10. Pp. 3230–3239. DOI 10.1109/TGRS.2007.901007.
157. Alidoost F., Arefi H. A CNN Based Approach for Automatic Building Detection and Recognition of Roof Types Using a Single Aerial Image // PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 2018. Vol. 86. Pp. 235–248. DOI 10.1007/s41064-018-0060-5.
158. Alidoost F., Arefi H., Tombari F. 2D Image-To-3D Model: Knowledge-Based 3D Building Reconstruction (3DBR) Using Single Aerial Images and Convolutional Neural Networks (CNNs) // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. № 19. Pp. 2219. DOI 10.3390/rs11192219.
159. Aly H. A., Dubois E. Image Up-sampling Using Total-variation Regularization with a New Observation Model // IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society. 2005. Vol. 14. № 10. Pp. 1647–1659. DOI 10.1109/TIP.2005.851684.

160. Antipova N. V., Gvozdev O. G., Kozub V. A., Murynin A. B., Richter A. A. Restoration of Structural Information on Anthropogenic Objects from Single Aerospace Images // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2023. Vol. 62. № 3. Pp. 507–522. DOI 10.1134/S1064230723030012.
161. Ayache N., Faverjon B. Efficient registration of stereo image by matching graph descriptions of edge segments // International Journal of Computer Vision. 1987. Vol. 1. № 2 Pp. 107–131. DOI 10.1007/BF00123161.
162. Baker H. H., Binford T. O. Depth from edges intensity based stereo // Proc. 7th international joint conference on Artificial intelligence. 1981. Vol. 2. Pp. 631–636. DOI 10.5555/1623264.1623271.
163. Barnard S. T., Thomson W. B. Disparity analysis of images // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1980. Vol. 2. № 4. Pp. 333–340. DOI 10.1109/tpami.1980.4767032.
164. Bazanov P. V., Buryak D. Y., Murynin A. B., Mun W. J., Yang H. K. Comparison of Gabor wavelet and neural network-based face detection algorithms // Proc. 7th IASTED International Conference on Signal and Image Processing. Honolulu, 2005. Pp. 178–184.
165. Beardsley P. A., Zisserman A., Murray D. W. Navigation using affine structure from motion // Proc. 3rd European Conf. Computer Vision. 1984. Vol. 2. Pp. 85–96. DOI 10.1007/BFb0028337.
166. Bittner K., D'Angelo P., Koerner M., Reinartz P. DSM-to-LoD2: Spaceborne Stereo Digital Surface Model Refinement // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. № 12. Pp. 1926. DOI 10.3390/rs10121926.
167. Bochkareva V. G., Matveev I. A., Murynin A. B., Tsurkov V. I. Methods for Improving Image Quality Using Spatial Spectral Analysis // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2015. Vol. 54. № 6. Pp. 897–904. DOI 10.1134/S1064230715060027.
168. Bolshakov A. N., Burdyugov V. M., Grodsky S. A., Kudryavtsev V. N. 2-Dimensional surface elevation spectra from airphoto data // Izvestia

- Atmospheric and Oceanic Physics. 1990. Vol. 26. Pp. 652–658.
169. Bondur V. G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. St. Petersburg, 2005.
170. Bondur V. G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // Waste Water — Evaluation and Management. / Ed. F. S. G. Einschlag. London: IntechOpen, 2011. Pp. 155–180. DOI 10.5772/16134.
171. Bondur V., Dulov V., Kozub V., Murynin A., Yurovskaya M., Yurovsky Y. Validation of the satellite method for measuring spectra of spatially inhomogeneous sea waves // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. № 1. Pp. 1510. DOI 10.3390/jmse10101510.
172. Bondur V., Dulov V., Kozub V., Murynin A., Yurovskaya M., Yurovsky Y. Retrieving the Angular Distribution of Sea Wave Energy According to Satellite Imagery Spectra // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 509. Part 1. PP. 363–369. DOI 10.1134/S1028334X22601766.
173. Bondur V. G., Dulov V. A., Murynin A. B., Ignatiev V. Yu. Retrieving Sea-Wave Spectra Using Satellite-Imagery Spectra in a Wide Range of Frequencies // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52. № 6. Pp. 637–648.
174. Bondur V. G., Dulov V. A., Murynin A. B., Yurovsky Yu.Yu. A Study of Sea-Wave Spectra in a Wide Wavelength Range from Satellite and In-Situ Data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52. № 9. Pp. 888–903. DOI 10.1134/S0001433816060049.
175. Bondur V. G., Murynin A. B. Measurement of Sea Wave Spatial Spectra from High-Resolution Optical Aerospace Imagery // Surface Waves — New Trends and Developments. / Ed. F. Ebrahimi. London: IntechOpen, 2018. Pp. 71–88. DOI 10.5772/intechopen.71834.
176. Bondur V., Murynin A. The Approach for Studying Variability of SeaWave

- Spectra in a Wide Range of Wavelengths from High-Resolution Satellite Optical Imagery. // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. № 9. Pp. 823. DOI 10.3390/jmse9080823.
177. Bondur V. G., Murynin A. B. Methods for Retrieval of Sea Wave Spectra from Aerospace Image Spectra // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52. № 9. Pp. 877–887. DOI 10.1134/S0001433816090085.
 178. Bondur V. G., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // Proc. 31st International Symposium Remote Sensing of Environment. St. Petersburg, 2005. Pp. 192–195.
 179. Bondur V. G., Vorobyov V. E., Murynin A. B. Retrieving Sea Wave Spectra Using High Resolution Satellite Imagery under Various Conditions of Wave Generation // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. Vol. 56. № 9. Pp. 887–897. DOI 10.1134/S0001433820090042.
 180. Bondur V. G., Zamshin V. V. Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas // Proc. Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016". 2018. Pp. 625–637. DOI 10.1007/978-3-319-62870-7_66.
 181. Burger W., Bhanu B. Estimating 3D egomotion from perspective image sequences // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12. № 11. Pp. 1040–1058. DOI 10.1109/34.61704.
 182. Canny J. E. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1985. Vol. 8. № 6. Pp. 679–698. DOI 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
 183. Carlsson S., Weinshall D. Dual computation of projective shape and camera positions from multiple images // International Journal of Computer Vision. 1998. Vol. 27 № 3. DOI 10.1023/A:1007961913417.
 184. Carrato S., Ramponi G., Marsi S. A Simple Edge-Sensitive Image Interpolation Filter // 3rd IEEE International Conference on Image Processing. Lausanne,

1996. Vol. 3. Pp. 711–714. DOI 10.1109/ICIP.1996.560778.
185. Chapman R. D., Irani G. B. Errors in estimating slope spectra from wave images // Applied Optics. 1981. Vol. 20. № 20. Pp. 3645–3652. DOI 10.1364/AO.20.003645.
186. Chavez P. S., Bowell J. A. Jr. Comparison of the spectral information content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for three different sites in the Phoenix, Arizona region // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1988. Vol. 54. № 12. Pp. 1699–1708.
187. Chicco D., Warrens M. J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation // PeerJ Computer Science: e-journal. 2021. Vol. 7:e623 URL: <https://peerj.com/articles/cs-623/> Дата публикации: 05.07.2021. DOI 10.7717/peerj-cs.623.
188. Choi J., Yu K., Kim Y. A new adaptive component-substitution-based satellite image fusion by using partial replacement // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. № 1. Pp. 295–309. DOI 10.1109/TGRS.2010.2051674.
189. Conventional analysis of wave measurement arrays // Measuring and Analysing the Directional Spectra of Ocean Waves / Ed. D. Hauser, K. K. Kahma, H. E. Krogstad et al. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005. Pp. 56–71.
190. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // J. Optical Society of America. 1954. Vol. 44. № 11. Pp. 838–850. DOI 10.1364/JOSA.44.000838.
191. CUDA Zone — Library of Resources // NVIDIA Developer: website URL: <https://developer.nvidia.com/cuda-zone> (дата обращения: 19.09.2021).
192. Dalvadi J. A Survey on Techniques of Image Super Resolution // International Journal Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2016. Vol. 4. № 3. Pp. 3084–3089. DOI 10.15680/IJIRCCE.2016.0403030.

193. Deriche R. Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector // International Journal of Computer Vision. 1987. Vol. 1. № 2. Pp. 167–187. DOI 10.1007/BF00123164.
194. Dave C. P., Joshi R., Srivastava S. S. A survey on Geometry Correction of Satellite Imagery // International Journal of Computer Applications. 2015. Vol. 116. № 12. Pp. 24–27. DOI 10.5120/20389-2655.
195. Desyatchikov A. A., Kovkov D. V., Lobantsov V. V., Makovkin K. A., Matveev I. A., Murynin A. B., Chuchupal V. Ya. A System of Algorithms for Stable Human Recognition // Journal of computer and systems sciences international. 2006. Vol. 45. № 6. Pp. 958–969. DOI 10.1134/S1064230706060116.
196. Dhond U. R., Aggarwal J. K. Structure from Stereo-A review // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1989. Vol. 19. № 6. Pp. 1489–1510. DOI 10.1109/21.44067.
197. Dong C., Loy C. C., He K., Tang X. Image super-resolution using deep convolutional networks // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2016. Vol. 38. № 2. Pp. 295–307. DOI 10.1109/TPAMI.2015.2439281.
198. Dong W., Zhang L., Shi G.-M., Wu X.-L. Image Deblurring and Super-resolution by Adaptive Sparse Domain Selection and Adaptive Regularization // IEEE Transactions on Image Processing. 2011. Vol. 20. № 7 Pp. 1838–1857. DOI 10.1109/TIP.2011.2108306.
199. Dou W., Chen Y. An improved IHS image fusion method with high spectral fidelity // International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress. Beijing, 2008. Vol. XXXVII. Part B7. Pp. 1253–1256.
200. Dou W., Chen Y., Li X., Sui D. A general framework for component substitution image fusion: an implementation using fast image fusion method // Computers & Geosciences. 2007. Vol. 33. № 2. Pp. 219–228. DOI 10.1016/j.cageo.2006.06.008.
201. Dulov V., Kudryavtsev V., Skiba E. On fetch- and duration-limited wind

- wave growth: Data and parametric model // Ocean Modelling. 2020. Vol. 153. № 101676. DOI 10.1016/j.ocemod.2020.101676.
202. Dulov V. V., Yurovskaya M. V. Spectral Contrasts of Short Wind Waves in Artificial Slicks from the Sea Surface Photographs // Physical Oceanography: e-journal. 2021. Vol. 28. № 3. Pp. 348–360. DOI 10.22449/1573-160X-2021-3-348-360.
203. ENVI — Environment for Visualizing Images // L3Harris Geospatial: website URL: http://www.harrisgeospatial.com/docs/using_envi_Home.html (дата обращения: 19.09.2019).
204. ERDAS Imaging 2018 Release guide // Hexagon: website URL: <https://www.hexagongeospatial.com/technical-documents/release-guides-2018/erdas-imagine-2018-release-guide> (дата обращения: 19.09.2019).
205. Essa I. A., Pentland A. P. Coding, analysis, interpretation, and recognition of facial expressions // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1997. Vol. 19. № 7. Pp. 757–763. DOI 10.1109/34.598232.
206. Everingham M., Eslami S. M. A., Van Gool L. et al. The Pascal Visual Object Classes Challenge: A Retrospective // International Journal of Computer Vision. 2015. Vol. 111. № 1. Pp. 98–136. DOI 10.1007/s11263-014-0733-5.
207. Fattal R. Image upsampling via Imposed Edges Statistics // ACM Transactions on Graphics. 2007. Vol. 26. № 3. Pp. 95. DOI 10.1145/1276377.1276496.
208. Faugeras O. D. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig // Computer Vision — ECCV'92. Lecture Notes in Computer Science. 1992. Vol. 588. Pp. 563–578. DOI 10.1007/3-540-55426-2_61.
209. Fermuller C., Aloimonos Y. What is computed by structure from motion algorithms? // Computer Vision — ECCV'98. Lecture Notes in Computer Science. 1998. Vol. 1406. Pp. 359–375. DOI 10.1007/BFb0055678.
210. Fienup J. R. Invariant error metrics for image reconstruction // Applied Optics. 1997. Vol. 36. № 32. Pp. 8352–8357. DOI 10.1364/AO.36.008352.
211. Forstner W. Digital image matching techniques for standard photogrammetric

- applications // ACSM-ASPRS Annual conference. 1986.
212. Frisby J. P., Mayhew J. E. W. The role of spatial frequency tuned channels in vergence control // Vision research. 1980. Vol. 20. № 8. Pp. 727–732. DOI 10.1016/0042-6989(80)90099-1.
213. Fua P. A parallel stereo algorithm that produces depth maps and preserves image features // Machine Vision and Applications. 1993. № 6. Pp. 35–49. DOI 10.1007/BF01212430.
214. Fua P. Combining stereo and monocular information to compute dense depth maps that preserve depth discontinuities // Proc. 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Sydney, 1991. Pp. 1292–1298.
215. Fua P., Leclerc Y. G. Object-Centered Surface Reconstruction: Combining Multi-Image Stereo and Shading // International Journal of Computer Vision. 1995. Vol. 16. № 1. Pp. 35–56. DOI 10.1007/BF01428192.
216. Garding J. Shape from texture for smooth curved surfaces in perspective projection // Journal Mathematical Imaging and Vision. 1992. Vol. 2. № 4. Pp. 329–352. DOI 10.1007/BF00121877.
217. Gatys L., Ecker A. S., Bethge M. Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. Pp. 2414–2423. DOI 10.1109/CVPR.2016.265.
218. Gatys L., Ecker A. S., Bethge M. Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks // Proc. of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2015. Vol. 1. Pp. 262–270.
219. Geospatial Data Abstraction Library: website URL: <https://www.gdal.org> (дата обращения: 19.09.2019).
220. Getreuer P. Linear Methods for Image Interpolation // Image Processing on Line. 2011. № 1. Pp. 238–259. DOI 10.5201/ipl.2011.g_lmii.
221. Gibson C. H., Keeler R. N., Bondur V. G. Vertical stratified turbulent transport mechanism indicated by remote sensing // Proc. SPIE Conference on Optics+Photonics. 2007. 3 p. URL: <https://arxiv.org/abs/0712.0115> Дата

публикации: 02.12.2007. DOI 10.48550/arXiv.0712.0115.

222. Gneushev A. N., Murynin A. B. Adaptive gradient method for extracting contour features of objects in images of real-world scenes // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2003. Vol. 42. № 6. Pp. 973–980.
223. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing. 3rd edn. Pearson, 2008. 976 p.
224. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M. et al. Generative adversarial networks // Communications of the ACM. 2020. Vol. 63, № 11. Pp. 139–144. DOI 10.1145/3422622.
225. Gorokhovskiy K. Yu., Ignatiev V. Yu., Murynin A. B., Rakova K. O. Parameters Optimization of the Novel Probabilistic Algorithm for Improving Spatial Resolution of Multispectral Satellite Images // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2017. Vol. 56. № 6. Pp. 1008–1020. DOI 10.1134/S1064230717060053.
226. Grabner H., Nguyen T. T., Gruber B., Bischof H. On-line boosting-based car detection from aerial images // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2008. Vol. 63. № 3. Pp. 382–396. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2007.10.005.
227. Greenfeld J. S., Schenk A. F. Experiment with edge-based stereo matching // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1989. Vol. 55. № 12. Pp. 1771–1777.
228. Grimson W. E. L. A computer implementation of a theory of human stereovision // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1981 Vol. 292. № 1058. Pp. 217–253.
229. Grimson W. E. L. From Images to Surfaces: a Computational Study of the Human Early Visual System. MIT Press, 1981. 274 p.
230. Grimson W. E. L. Computational experiments with a feature-based stereo algorithm // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1985. Vol. 7. № 1. Pp. 17–34. DOI 10.1109/TPAMI.1985.4767615.
231. Gvozdev O., Kosheleva N., Kozub V., Murynin A., Richter A. 3D-modeling

- infrastructure facilities using deep learning based on high resolution satellite images // Proc. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. 2020. Vol. 20. № 2.2. Pp. 149–156. DOI 10.5593/sgem2020/2.2/s10.018.
232. Hannah M. J. A system for digital stereo image matching // Photographic Engineering and Remote Sensing. 1989. Vol. 55. № 12. Pp. 1765–1770.
233. Hanson J. I., Phillips O. M. Wind Sea Growth and Dissipation in the Open Ocean // Journal of Physical Oceanography. 1999. Vol. 29. Pp. 1633–1647. DOI 10.1175/1520-0485(1999)029<1633:WSGADI>2.0.CO;2.
234. Haralik R. M. Digital step edges from zero-crossings of second directional derivatives // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1984. Vol. 6. № 1. Pp. 58–68. DOI 10.1109/TPAMI.1984.4767475.
235. Hartt K., Carlotto M. A Method for Shape-from-Shading using Multiple Images Acquired under Different Viewing and Lighting Conditions // Proc.IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1989. Pp. 53–60. DOI 10.1109/CVPR.1989.37828.
236. Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E. et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Ergnzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe. 1973. Vol. 8. № 12. Pp. 1–95.
237. Hennings I., Matthews J., Metzner M. Sun glitter radiance and radar crosssection modulations of the sea bed // Journal Geophysical Research. 1994. Vol. 99. № C8. Pp. 16303–16326. DOI 10.1029/93JC02777.
238. Hinz S. Detection and counting of cars in aerial images // Proc. International Conference on Image Processing. 2003. Vol. 3. Pp. 997–1000. DOI 10.1109/ICIP.2003.1247415.
239. Horn B. K. P. Relative orientation // International Journal Computer Vision. 1990. Vol. 4. № 1. Pp. 59–78. DOI 10.1007/BF00137443.
240. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining optical flow // Artificial Intelligence. 1981. Vol. 17. Pp. 185–203.

241. Ignatiev V. Yu., Murynin A. B. Method and algorithms of forecasting the seasonal characteristics of anthropogenic impact areas using long-term remote sensing data // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2015. Vol. 54. № 3. Pp. 406–414. DOI 10.1134/S1064230715030119.
242. Ignatiev V. Yu., Matveev I. A., Murynin A. B., Usmanova A. A., Tsurkov V. I. Increasing the Spatial Resolution of Panchromatic Satellite Images Based on Generative Neural Networks // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2021. Vol. 60. № 2. Pp. 239–247. DOI 10.1134/S1064230721020076.
243. IKONOS Satellite Sensor // Satellite Imaging Corporation: website URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos/> (дата обращения: 04.04.2021).
244. Intel Integrated Performance Primitives // Intel: website URL: <https://software.intel.com/en-us/intel-ipp> (дата обращения: 19.09.2019).
245. Jain A., Murty M., Flynn P. Data Clustering: A Review // ACM Computing Surveys. 1999. Vol. 31. № 3. Pp. 264–323. DOI 10.1145/331499.331504.
246. Jiang K., Wang Z., Yi P. et al. Edge-Enhanced GAN for Remote Sensing Image Superresolution // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. Vol. 57. № 8. Pp. 5799–5812. DOI 10.1109/TGRS.2019.2902431.
247. Julesz B. Binocular depth perception in computer-generated patterns // Bell Systems Technical J. 1960. № 39. Pp. 1125–1162. DOI 10.1002/j.1538-7305.1960.tb03954.x.
248. Julesz B. Foundations of cyclopean perception. MIT Press, 2006. 428 p.
249. Julesz B., Miller J. E. Independent spatial frequency tuned channel in binocular fusion and rivalry // Perception. 1975. Vol. 4. № 2. Pp. 125–143. DOI 10.1068/p040125.
250. DSTL Satellite Imagery Feature Detection Challenge // Kaggle Inc.: website URL: <https://www.kaggle.com/c/dstl-satellite-imagery-feature-detection/> (дата обращения: 23.07.2019).

251. Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geophysical Research Letters: e-journal. 2005. Vol. 32. № L12610. 5 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/228616196_Optical_satellite_imagery_detection_of_internal_wave_effects_from_a_submerged_turbulent_coutfall_in_the_stratified_ocean Дата публикации: 20.06.2005. DOI 10.1029/2005GL022390.
252. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology. 2004. Vol. 45. № 4. Pp. 53–58.
253. Keys R. Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1981. Vol. 29. № 6. Pp. 1153–1160. DOI 10.1109/TASSP.1981.1163711.
254. Kim Y. C., Aggarwal J. K. Positioning three-dimensional objects using stereo images // IEEE Journal on Robotics and Automation. 1987. Vol. 3. № 4. Pp. 361–373. DOI 10.1109/JRA.1987.1087107.
255. Kim N. H., Bovik A. C. A contour-based stereo matching algorithm using disparity continuity // Pattern Recognition. 1988. Vol. 21. № 5. Pp. 505–514. DOI 10.1016/0031-3203(88)90009-X.
256. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // Proc. 3rd International Conference for Learning Representations. San Diego, 2015. 15 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> Дата публикации: 30.01.2017. DOI 10.48550/arXiv.1412.6980.
257. Koenderink J. J., Doorn A. J. Affine structure from motion // Journal of the Optical Society of America. 1991. Vol. 8. № 2. Pp. 377–385. DOI 10.1364/JOSAA.8.000377.
258. Kolmogorov V. N., Matveev I. A., Murynin A. B. Some techniques of real-time disparity estimation // Proc. International Conference Computer Vision and Graphics "Graphicon-99". 1999. Pp. 174.
259. Korosov A., Pozdnyakov D., Folkestad A. et al. Semiempirical Algorithm

for the Retrieval of Ecology Relevant Water Constituents in Various Aquatic Environments // Algorithms. 2009. Vol. 2. № 1. Pp. 470–497. DOI 10.3390/a2010470.

260. Kosnik M. V., Dulov V. A. Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // Measurement Science and Technology: e-journal. 2011. Vol. 22. № 1. 9 p. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/22/1/015504> Дата публикации: 10.12.2010. DOI 10.1088/0957-0233/22/1/015504.
261. Kozub V. A., Murynin A. B., Litvinchev I., Matveev I. et al. Neural Network Approach to Segmentation of Economic Infrastructure Objects on High-Resolution Satellite Images // Artificial Intelligence in Industry 4.0 and 5G Technology. Wiley, 2022. Pp. 63–100. DOI 10.1002/9781119798798.ch4.
262. Kudryavtsev V. N., Myasoedov A. G., Chapron B. et al. Synergy of SAR and optical imagery in studies of mesoscale ocean dynamics // Proc. 3d International Workshop held SeaSAR. 2010. Vol. 679 8 p.
263. Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Chapron B., Collard F., Donlon C. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122. № 2. Pp. 1369–1383. DOI 10.1002/2016JC012425.
264. Kuznetsov V. D., Matveev I. A., Murynin A. B. Identification of Objects on the Basis of Stereo Images: 2. Optimization of Information Space // Journal of Computer and Systems International. 1998. Vol. 37. № 4. Pp. 557–560.
265. Kuznetsov V. D., Matveev I. A., Murynin A. B. Optimization of Informative Components for 3-D Object Recognition // 23rd International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Moscow, 1999. Vol. 3516. Pp. 426–432.
266. Landsat 7 // U.S. Geological Survey: official website URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7> (дата обращения: 04.04.2021).

267. Ledig C., Theis L., Husza F. et al. Photo-realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, 2017. Pp. 105–114. DOI 10.1109/CVPR.2017.19.
268. Lee M. J., Lei W.-L. Region matching and depth finding for 3-D objects in stereo aerial photographs // Pattern recognition. 1990. Vol. 23. № 1. Pp. 81–94. DOI 10.1016/0031-3203(90)90050-U.
269. Leckler F., Arduin F., Peureux C. et al. Analysis and interpretation of frequency-wavenumber spectra of Young wind waves // Journal of Physical Oceanography. 2015. Vol. 45. Pp. 2484–2496. DOI 10.1175/jpo-d-14-0237.1.
270. Lengagne R., Tarel J. P., Monga O. From 2D Images to 3D Face Geometry // Proc. IEEE 2nd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. Killington, 1996. Pp. 301–306 DOI 10.1109/AFGR.1996.557281.
271. Li J., Fang F., Mei K., Zhang G. Multi-scale residual network for image super-resolution // European Conference on Computer Vision. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2018. Vol. 11212. Pp. 527–542 DOI 10.1007/978-3-030-01237-3_32.
272. Li X., Orchard M. T. New Edge-Directed Interpolation // IEEE Transactions on Image Processing. 2001. Vol. 10. Pp. 1521–1527. DOI 10.1109/83.951537.
273. Liao W., Huang X., Coillie F. et al. Processing of multiresolution thermal hyperspectral and digital color data: Outcome of the 2014 IEEE GRSS data fusion contest // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8. № 6. Pp. 2984–2996. DOI 10.1109/JSTARS.2015.2420582.
274. Lin Ts.-Yi., Goyal P., Girshick R., He K.-M., Dollar P. Focal Loss for Dense Object Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. Vol. 42. № 2. Pp. 318–327. DOI 10.1109/TPAMI.2018.2858826.
275. Lindeberg T., Garding J. Shape from texture from a multi-scale perspective //

- Proc. 4th International Conference on Computer Vision. 1993. Pp. 683–691. DOI 10.1109/ICCV.1993.378146.
276. Liu J. G. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. № 18. Pp. 3461–3472. DOI 10.1080/014311600750037499.
277. Longuet-Higgins H. C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections // Nature. 1981. Vol. 293. Pp. 133–135. DOI 10.1016/B978-0-08-051581-6.50012-X.
278. Loncan L., de Almeida L. B., Bioucas-Dias J. M. at al. Hyperspectral pansharpening: a review // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2015. Vol. 3. № 3. Pp. 27–46. DOI 10.1109/MGRS.2015.2440094.
279. Luong Q.-T., Vieville T. Canonic representations for the geometries of multiple projective views // Proc. 3rd European Conference Computer Vision. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 1994. Vol. 800. Pp. 589–599. DOI 10.1007/3-540-57956-7_66.
280. Ma W., Pan Z., Guo J., Lei B. Super-Resolution of Remote Sensing Images Based on Transferred Generative Adversarial Network // Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, 2018. Pp. 1148–1151. DOI 10.1109/IGARSS.2018.8517442.
281. Maggiori E., Tarabalka Y., Charpiat G. et al. Can Semantic Labeling Methods Generalize to any City? The INRIA Aerial Image Labeling Benchmark // Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth, 2017. Pp. 3226–3229. DOI 10.1109/IGARSS.2017.8127684.
282. Marr D., Poggio T. A computational theory of human stereovision // Proc. Royal Society, Series B. London, 1979. Vol. 204. Pp. 301–328. DOI 10.1098/rspb.1979.0029.
283. Matveev I. A., Murynin A. B. Identification of Objects on the Basis of Stereo Images: 1. Optimization of Algorithms for Reconstruction of a

Surface // Journal of Computer and Systems International. 1998. Vol. 37. № 4. Pp. 487–493.

284. Matveev I. A., Murynin A. B. Principles of development of a stereovision system for motion control of a robot // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2003. Vol. 42. № 3. Pp. 490–498.
285. Matveev I., Murynin A., Trekin A. Vehicle detection in color images // 11th International Conference Pattern Recognition and Image Analysis. Samara, 2013. Vol. 2. Pp. 656–659.
286. Matveev I. A. , Murynin A. B. , Trekin A. N. Method for Detecting Cars in Aerospace Photos // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25. № 4. Pp. 679–673. DOI 10.1134/S1054661815040161.
287. Mayhew J. E. W., Frisby J. P. Psychophysical and computational studies towards a theory of human stereopsis // Artificial Intelligence. 1981. Vol. 17. № 1-3 Pp. 349–385. DOI 10.1016/0004-3702(81)90029-1.
288. Medioni G., Nevatia R. Matching images using linear features // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1984. Vol. 6. № 6. Pp. 675–685. DOI 10.1109/tpami.1984.4767592.
289. Mejia-Inigo R., Barilla-Perez M. E., Montez-Venegas H. A. Color-based Texture Image Segmentation for Vehicle Detection // Image Segmentation. IntechOpen, 2011. Pp. 273–290. DOI 10.5772/15893.
290. Milanfar P. Super-Resolution Imaging. Boca Raton: CRC Press, 2011. 473 p.
291. Mohan R., Medioni G., Nevatia R. Stereo error detection, correlation, and evaluation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. Vol. 11. Pp. 113–120. DOI 10.1109/34.16708.
292. Monaldo F. M., Kasevich R. S. Optical determination of short-wave modulation by long ocean gravity waves // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1982. V .GE-20. № 3. Pp. 254–258. DOI 10.1109/TGRS.1982.350439.
293. Moravec H. P. Towards automatic visual obstacle avoidance // Proc. 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Cambridge, 1977. Pp. 584.

294. Mou L., Member S., Zhu X. X., Member S. IM2HEIGHT: Height Estimation from Single Monocular Imagery via Fully Residual Convolutional-Deconvolutional Network // arXiv: open-access archive URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.10249.pdf> Дата публикации: 28.02.2018. DOI 10.48550/arXiv.1802.10249.
295. Mouche A. A., Hauser D., Kudryavtsev V. Radar scattering of the ocean surface and sea roughness properties: A combined analysis from dual polarizations airborne radar observations and models in C band // Journal of Geophysical Research: e-journal. 2006. Vol. 111. № C9. 18 p. DOI 10.1029/2005JC003166.
296. Murynin A. B. Spatial-frequency 2-D filters synthesized for reconstruction of sea-surface spectra from images. // Proc. SPIE - The International Society for Optical Engineering. 1993. Vol. 1978. Pp. 317–333. DOI 10.1117/12.155063.
297. Murynin A. B., Matveev I. A. 3-D Surface Reconstruction in Automatic Recognition System // 23rd International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Moscow, 1999. Vol. 3516. Pp. 417–425. DOI 10.1117/12.350521.
298. Murynin A. B. Automatic Person Identification System Based on Stereo Images // Journal of Computer and Systems International. 1999. Vol. 38. № 1. Pp. 100–107.
299. Murynin A. B., Krychenkov V. F., Matveev I. A., Kuznetsov V. D. Estimation of Bilateral Facial Symmetry Deviation using Stereoscopic Computer Vision System // Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. Vol. 11. № 2. Pp. 350–352.
300. Murynin A. B., Knyaz V. A., Matveev I. A. Applying computer stereovision algorithms to study of correlation between face asymmetry and human vision pathology // Pattern Recognition and Image Analysis. 2009. Vol. 19. № 4. Pp. 679–686. DOI 10.1134/S1054661809040178.
301. Murynin A. B., Knyaz V. A., Matveev I. A. Human Vision Pathology Diagnostics by Photogrammetries Means // The International Archives of

- the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. XL-5. Pp. 437–443. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-5-437-2014.
302. Murynin A., Vorobyev V., Khachatran K. Method of high-performance registration of sea surface spectra in the process of satellite monitoring // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Albena, 2019. Vol. 19. Pp. 569–576. DOI 10.5593/sgem2019/2.2/S10.070.
303. Nagel H.-H. Representation of moving rigid objects based on visual observations // Computer. 1981. Vol. 14. № 8. Pp. 29–39. DOI 10.1109/C-M.1981.220560.
304. Nakamura Y., Matsuura T., Sato K., Ohta Y. Occlusion Detectable Stereo-Occlusion Patterns in Camera Matrix // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1996. Pp. 371-378. DOI 10.1109/CVPR.1996.517099.
305. Nasonov A. V., Krylov A. S. Finding areas of typical artefacts of image enhancement methods // Pattern Recognition and Image Analysis. 2011. Vol. 21. № 2. Pp. 316–318. DOI 10.1134/S1054661811020830.
306. Negri P., Clady X., Hanif S. M., Prevost L. A Cascade of Boosted Generative and Discriminative Classifiers for Vehicle Detection // EURASIP Journal Advances in Signal Processing. 2008. Pp. 136. DOI 10.1155/2008/782432.
307. Nishihara H. K., Poggio T. Stereo vision for robotics // First International Symposium Robotics Research. Cambrige, 1984. PP.489–505.
308. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1928. Vol. 47. № 2. Pp. 617–644. DOI 10.1109/T-AIEE.1928.5055024.
309. Ohta Y., Kanade T. Stereo by intra-and-inter scanline search using dynamic programming // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1985. Vol. 7. № 2. Pp. 139–154. DOI 10.1109/TPAMI.1985.4767639.
310. OpenCV (Open Source Computer Vision Library): website. URL:

<https://opencv.org> (дата обращения: 23.09.2019).

311. The OpenMP API specification for parallel programming: website URL: <https://www.openmp.org> (дата обращения: 19.09.2019).
312. OpenStreetMap: website URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 30.08.2020).
313. Optiz B. K. Advanced stereo correlation research // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1983. Vol. 49. № 4. Pp. 533–544.
314. USGS EROS Archive — Commercial Satellites — OrbView 3 // U.S. Geological Survey: official website URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-commercial-satellites-orbview-3> (дата обращения: 04.04.2021).
315. Overpass turbo: wesite URL: <http://overpass-turbo.eu/> (дата обращения: 30.08.2020).
316. Pierson W. J., Moskowitz Z. A. Proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii // Journal of Geophysical Research. 1964. Vol. 69. № 24. Pp. 5181–5190. DOI 10.1029/JZ069i024p05181.
317. Planet imagery and archive // Planet: website URL: <https://www.planet.com/products/planet-imagery/> (дата обращения: 04.04.2021).
318. Plass G. N., Kattawar G. W. Catchings F. E. Matrix operator theory of radiance transfer. I: Rayleigh scattering // Applied Optics. 1973. Vol. 12. Pp. 314–329. DOI 10.1364/AO.12.000314.
319. Pollard S. B., Mayhew J. E. W., Frisby J. P. PMF: a stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit // Perception. 1981. Vol. 14. № 4. Pp. 449–470. DOI 10.1068/p140449.
320. Microsoft PowerPoint // Microsoft: website URL: <https://products.office.com/ru-ru/powerpoint> (дата обращения: 19.09.2019).
321. Preetham A. J., Shirley P., Smits B. E. A practical analytical model

- for daylight // Proc. 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, 1999. Vol. 99. Pp. 91–100. DOI 10.1145/311535.311545.
322. Preetham A. J. Modeling skylight and aerial perspective // RenderWonk blog: website. 15 p. URL: <http://renderwonk.com/publications/s2003-course/preetham/notes-preetham.pdf> Дата публикации: 27.06.2003.
323. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2015. Vol. 9351. Pp. 234-241. DOI 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
324. Rottensteiner F., Sohn G., Gerke M. et al. 2D Semantic Labeling Contest // International Society for Photogrammetry and Remote Sensing: website URL: <http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/semantic-labeling.html> (дата обращения: 23.05.2020).
325. Anwar S., Barnes N. Densely Residual Laplacian Super-Resolution // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2022. Vol. 44. № 3. Pp. 1192–1204. DOI 10.1109/TPAMI.2020.3021088.
326. Saifi M. Y., Singla J. Deep Learning based Framework for Semantic Segmentation of Satellite Images // 2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication. 2020. Pp. 369–374. DOI 10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00069.
327. Sajjadi M. S., Scholkopf B., Hirsc M. Enhancenet: Single Image Super-resolution through Automated Texture Synthesis // Proc. IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, 2017. Pp. 4501–4510. DOI 10.1109/ICCV.2017.481.
328. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // Proc. 23rd ACM national conference. 1968. Pp. 517–524. DOI 10.1145/800186.810616.

329. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3rd edn. Orlando: Academic Press, 1997. 560 p.
330. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition // arXiv: open-access archive. URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (дата обращения: 10.04.2015). DOI 10.48550/arXiv.1409.1556.
331. Sotelo M. A., Nuevo J., Bergasa L. M. et al. Road vehicle Recognition in Monocular Images // Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2005. Vol. 4. Pp. 1471–1476. DOI 10.1109/ISIE.2005.1529149.
332. Spetsakis M. E., Aloimonos J. Optimal motion estimation // Proc. IEEE Workshop on Visual Motion. 1989. Pp. 229–237. DOI 10.1109/WVM.1989.47114.
333. Spot 6/7 // Airbus: website URL: <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/> (дата обращения: 15.05.2021).
334. Su D., Willis P. Image Interpolation by Pixel Level Data-Dependent Triangulation // Computer Graphics Forum. 2004. Vol. 23. № 2. Pp. 189–201. DOI 10.1111/j.1467-8659.2004.00752.x.
335. Sun X., Li Q., Yang B. Compositional Structure Recognition of 3D Building Models Through Volumetric Analysis // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 33953–33968. DOI 10.1109/ACCESS.2018.2842721.
336. Szeliski R. Fast surface interpolation using hierarchical basis functions // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12. № 6. Pp. 513–528. DOI 10.1109/34.56188.
337. Tappen M. F., Russell B. C., Freeman W. T. Efficient Graphical Models for Processing Images // Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, 2004. Vol. 2. Pp. 673–680. DOI 10.1109/CVPR.2004.1315229.
338. Toba J. Local balance in the air-sea boundary process // Journal of Oceanography. 1972. Vol. 28. Pp. 109–120. DOI 10.1007/BF02109772.

339. Tsai L.-W., Hsieh J.-W., Fan K.-C. Vehicle Detection Using Normalized Color and Edge Map // IEEE Transactions on Image Processing. 2007. Vol. 16. № 3. Pp. 850–864. DOI 10.1109/TIP.2007.891147.
340. Tsai R. Y., Huang T. S. Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1984. Vol. 6. № 1. Pp. 13–27. DOI 10.1109/TPAMI.1984.4767471.
341. Tumblin J., Chouldhury P. Bixels: Picture Samples with Sharp Embedded Boundaries // Proc. of the 15th Eurographics Workshop on Rendering Techniques. Norkoping, 2004. Pp. 255–264. DOI 10.2312/EGWR/EGSR04/255-264.
342. Turk M., Pentland A. P. Eigenfaces for Recognition // Journal of Cognitive Neuroscience. 1991. Vol. 3. № 1. Pp. 71–86. DOI 10.1162/jocn.1991.3.1.71.
343. Turkowski K. Filters for Common Resampling Tasks // Graphics Gems. Boston: Academic Press Professional Inc., 1990. Pp. 147–165. DOI 10.5555/90767.90805.
344. Ullman S. The interpretation of visual motion. Cambridge: MIT Press, 1979. 139 p. DOI 10.7551/mitpress/3877.001.0001.
345. Van E. A., Lindenbaum D., Bacastow T. M. Spacenet: A Remote Sensing Dataset and Challenge Series // arXiv: open-access archive. 2018. 10 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1807.01232> Дата публикации: 15.07.2019.
346. Vijayaraj V., O'Hara C. G., Younan N. H. Quality analysis of pansharpened images // Proc IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2004. Vol. 1. Pp. 20–24. DOI 10.1109/IGARSS.2004.1368951.
347. Vivone G., Alparone L., Chanussot J. et al. A Critical Comparison Among Pansharpening Algorithms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 53. № 5. Pp. 2565–2586. DOI 10.1109/TGRS.2014.2361734.
348. Vivone G., Restaino R., Dalla Mura M. et al. Contrast and error-based fusion schemes for multispectral image pansharpening // IEEE

- Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11. № 5. Pp. 930–934. DOI 10.1109/LGRS.2013.2281996.
349. Vorobyev V. E., Murynin A. B. Retrieving Spectra of Spatially Inhomogeneous Sea Waves during the Satellite Monitoring of Vast Water Areas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. Vol. 57. № 9. Pp. 1108–1116. DOI 10.1134/S000143382109067X.
350. Wald L., Ranchin T., Mangolini M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1997. Vol. 63. Pp. 691–699.
351. Wang T., Sun W., Qi H., Ren P. Aerial Image Super Resolution via Wavelet Multiscale Convolutional Neural Networks // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. Vol. 15. № 5. Pp. 769–773. DOI 10.1109/LGRS.2018.2810893.
352. Wang X., Yu K., Wu S. et al. ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks // Computer Vision — ECCV 2018 Workshops. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol. 11133. Pp. 63–79. DOI 10.1007/978-3-030-11021-5_5.
353. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. № 4. Pp. 600–612. DOI 10.1109/TIP.2003.819861.
354. Welch P. D. The use of FFT for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. Vol. 15. № 2. Pp. 70–73. DOI 10.1109/TAU.1967.1161901.
355. Weng J., Ahuja N., Huang T. S. Optimal motion and structure estimation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1993. Vol. 15. № 9. Pp. 864–884. DOI 10.1109/CVPR.1989.37842.
356. Williams R. M., Fender D. M. The synchrony of binocular saccadic eye movements // Vision Research. 1977. Vol. 17. № 2. Pp. 303–306.

DOI 10.1016/0042-6989(77)90096-7.

357. Wu J. Sea surface and equilibrium wind-wave spectra // Physics of Fluids. 1972. Vol. 15. № 5. Pp. 741–747. DOI 10.1063/1.1693978.
358. Yang H. K., Mun W. J., Lee Y. J., Murynin A. B., Kuznetsov V. D., Matveev I. A. Development of the robust Human feature detection algorithm for surveillance system // Proc. Samsung Tech. Conference. 2004. Pp. 53.
359. Yokoya N., Yairi T., Iwasaki A. Coupled nonnegative matrix factorization unmixing for hyperspectral and multispectral data fusion // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50. № 2, Pp. 528–537. DOI 10.1109/TGRS.2011.2161320.
360. Yokoya N. Texture-Guided Multisensor Superresolution for Remotely Sensed Images // Remote Sensing: e-journal. 2017. Vol. 9. № 4-316. 19 p. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/4/316> Дата публикации: 28.03.2017. DOI 10.3390/rs9040316.
361. Yi Y., Zhang Zh., Zhang W., Zhang Ch., Li W., Zhao T. Semantic segmentation of urban buildings from VHR remote sensing imagery using a deep convolutional neural network // Remote Sensing: e-journal. 2019. Vol. 11. № 15-1774. 19 p. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/15/1774> Дата публикации: 28.06.2019. DOI 10.3390/rs11151774.
362. Yuan Y., Liu S., Zhang J. et al. Unsupervised Image Super-resolution Using Cycle-in-cycle Generative Adversarial Networks // Proc. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Salt Lake City, 2018. Pp. 814–823. DOI 10.1109/CVPRW.2018.00113.
363. Yurovskaya M. V., Dulov V. A., Chapron B., Kudryavtsev V. N. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118. № 9. Pp. 4380–4394. DOI 10.1002/jgrc.20296.
364. Yurovsky Y. Y., Kudryavtsev V. N., Grodsky S. A., Chapron B. Validation of Doppler Scatterometer Concepts using Measurements from the Black Sea

Research Platform // Doppler Oceanography from Space. 2018. Pp. 1–9.
DOI 10.1109/DOfS.2018.8587275.

365. Zhao H., Gallo O., Frosio I., Kautz J. Loss functions for image restoration with neural networks // IEEE transactions on computational imaging. 2017. Vol. 3. № 1, Pp. 47–57. DOI 10.1109/TCI.2016.2644865.
366. Zhao T., Nevatia R. Car detection in low resolution aerial images // PImage and Vision Computing. 2003. Vol. 21. № 8. Pp. 693–703. DOI 10.1016/S0262-8856(03)00064-7.
367. Zhu J., Park T., Isola P., Efros A. A. Unpaired Image-to-Image Translation Using Cycle-Consistent Adversarial Networks // Proc. IEEE International Conference on Computer Vision. 2017. Pp. 2242–2251. DOI 10.1109/ICCV37128.2017.