

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном исследовательском центре
«Информатика и управление» Российской академии наук.

Официальные оппоненты: Каляев Игорь Анатольевич, доктор технических наук, академик РАН, научный руководитель направления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

Алексанин Анатолий Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Андрианов Дмитрий Евгеньевич, доктор технических наук, заместитель директора по учебной работе, заведующий кафедрой информационных систем Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН

Защита состоится 19 октября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.224.03 при Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук по адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 40

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук и на сайте www.frccsc.ru/diss-council/00207305/diss/list/muruinin_ab.

Автореферат разослан «____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.224.03,
к.т.н.



И. А. Рейер

Общая характеристика работы

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. С помощью данных ДЗЗ производятся мониторинг стихийных бедствий и катастроф, картографирование, наблюдение за состоянием атмосферы и мирового океана, а также другие исследования.

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 позволят 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 [2].

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 получен-

ных 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 волнения, 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); Самарский Государственный Аэрокосмический Университет и Институт обработки изображений; Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН ; Научный Геоинформационный Центр РАН ; 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; Южного федерального университета; Владимирского государственного университета и других университетов и институтов РАН.

За рубежом тематикой дистанционного зондирования занимаются многие научные коллективы 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.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- Разработан новый вычислительный метод и алгоритм повышения разрешающей способности космической аппаратуры основанные на про-

странственно-спектральном анализе улучшаемых изображений и синтезе изображения высокого разрешения с использованием специально разработанных алгоритмов восполнения энергетических и фазовых спектров в области высоких пространственных частот, экстраполяции спектров улучшаемых изображений в область высоких пространственных частот с использованием известных эмпирических закономерностей.

- 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.
- 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 поверхностного 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 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 выпол-

нялось сопоставление спектров волнения, измеренных дистанционно по спутниковым изображениям, со спектрами морского волнения, измеренными с высокой точностью контактными методами в контролируемых условиях.

- Показана 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 восстанавливающих 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 поверхности и океана. В работе используются 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.

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 ПР-КА) 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) маломассогабаритных 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 «Egypatsat-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» 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 выполнении ряда работ по грантам РФФИ, в частности:

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);

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-сопоставительные 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 каналах мультиспектрального изображения, основанные на использовании опорных панхроматических изображений и учёте статистических закономерностей, связывающих панхроматические изображения с мультиспектральными на локальных участках поверхности. Метод объединяет сверхразрешение на основе искусственных нейронных сетей, в том числе генеративно-сопоставительных, не требующий априорной информации о деталях изображения, и метод слияния, обеспечивающий высокое качество детализации с использованием алгоритмов, основанных на вероятностном анализе и пространственном спектральном анализе.
- 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 поверхностного 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 поверхностного 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:

- 16-й, 17-й, 18-й, 19-й, 20-й Международных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, Москва 2018 – 2022 г.;
- Всероссийских научных конференциях «Моря России: вызовы отечественной науки». Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, 2019 – 2023 г.;
- 20-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов» (ММРО-2021). Вычислитель-

ный центр Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, 7–10 декабря 2021 г.;

- 13-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации». Москва, Россия, 8–11 декабря 2020 г.;
- International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020 Earth and Planetary Sciences, Альбена, Болгария, 2019 – 2020 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 получены патенты РФ [46–51], свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [52–58].

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.

Диссертация представляется по специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы»

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Глава 1. В главе описаны базовые методы повышения пространственного разрешения изображений, развиваемые в работе.

В п.1.1 приведена классификация подходов, используемых для повышения пространственного разрешения изображений при дистанционных измерениях [23, 25, 39].

В п.1.2 описаны критерии качества повышения пространственного разрешения изображений, используемые в настоящей работе [20, 42].

В п.1.3 представлен подход к повышению пространственного разрешения спутниковых изображений, основанный на методах дистанционных измерений пространственных спектров объектов суши и океана с использованием специально разработанных способов экстраполяции энергетических и фазовых спектров в области высоких пространственных частот.

В п.1.4 представлен метод повышения разрешения космических изображений, который заключается в 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 использованием фазовых спектров, полученных из опорных изображений [23, 25].

Изображение $B(x, y)$ восстанавливается по его энергетическому $S(\mathbf{k})$ и фазовому $\Phi(\mathbf{k})$ спектрам путём обратного преобразования Фурье :

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

где \mathbf{F}^{-1} — оператор обратного преобразования Фурье; C — постоянный множитель, зависящий от L_x, L_y .

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.

В п.1.5 представлен 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. [18, 36] Метод предназначен для повышения разрешения в нескольких каналах мультиспектрального изображения. Восстановленное мультиспектральное изображение считается поэлементным умножением интенсивностей изображения на восстановленное нормированное мультиспектральное изображение. При заданной мере различия изображений решается задача минимизации функции двух переменных k (линейный размер ядра) и t (величина отступа от границы двумерного ядра).

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 госу-

дарственной регистрации программ для ЭВМ [52, 54]

Результаты, приведённые в главе, опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus [18, 20, 23, 25]

Глава 2. В Главе 2 представлены методы обработки данных дистанционного зондирования, разработанные для получения информации об антропогенных объектах на аэрокосмических изображениях с использованием традиционных и нейросетевых подходов.

В п. 2.1 представлен 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. [19, 26, 28, 40, 41].

В п. 2.2 представлен 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. [10, 27].

В п. 2.3 представлен комплексный подход к применению искусственных нейронных сетей (ИНС) для извлечения и интерпретации пространственной информации 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 [3, 8].

В п. 2.4 представлен исследовательский программный комплекс (ИПК), разработанный для обработки и анализа экспериментальных данных с использованием методов, описанных в настоящей работе. ИПК реализует в интерактивном и пакетном режимах полный цикл обработки данных, полученных при космическом мониторинге антропогенных объектов с использованием разработанного комплексного нейросетевого подхода. ИПК 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 рисунке 1 показан результат совместного применения метода в ИПК нейросетевого сверхразрешения и слияния изображений вероятностным методом для повышения пространственного разрешения изображений инфраструктурных объектов, полученных аппаратурой спутника “WorldView-2”.

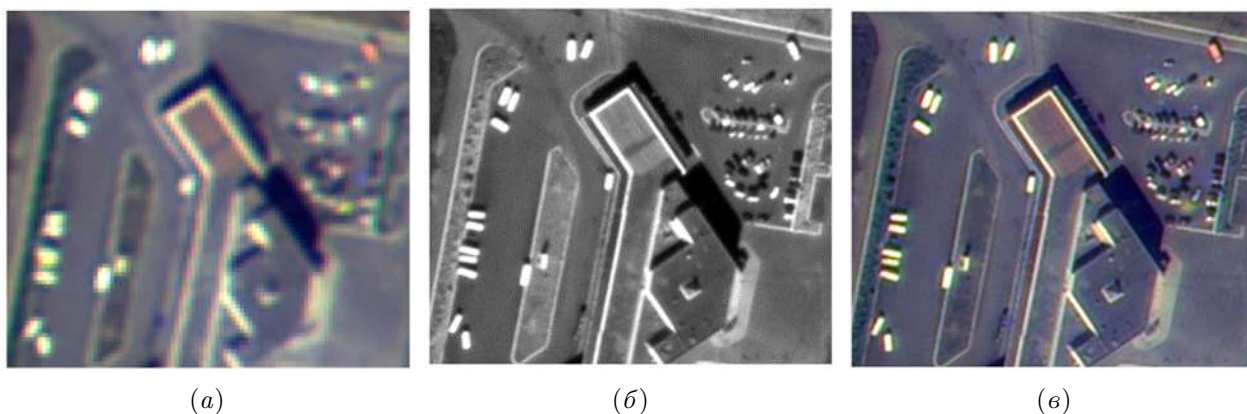


Рис. 1. Результаты совместного применения метода нейросетевого сверхразрешения и слияния изображений вероятностным методом. По строкам: (а) исходное мультиспектральное изображение, полученное аппаратурой спутника “WorldView-2” (разрешение 2м); (б) результат нейросетевого сверхразрешения, панхроматическое изображение с разрешением 0.25м; (в) результат слияния вероятностным методом, мультиспектральное изображение с разрешением 0.25м

При использовании разработанной ИНС сверхразрешения получены следующие количественные меры качества: значение среднего индекса структурного сходства составляет 0.942 при двукратном сверхразрешении (для сравнения – при использовании классических методов эта величина не превосходит 0.887); максимальное отношение пикового сигнала к шуму при двукратном сверхразрешении составляет 33.27 (для классических методов эта величина не превосходит 28.52); универсальный индекс качества составляет $Q=0.990$ при двукратном сверхразрешении, 0.991 при четырехкратном сверхразрешении (для классических методов эта величина не превосходит $Q=0.975$).

На созданное программное обеспечение получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [53, 55–58]

Предложенные в главе методы и алгоритмы 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), причём экспериментальная отработка алгоритмов проведена на коллекции спутниковых изображений различных объектов, включая объекты железнодорожной инфраструктуры.

Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [3, 8, 10, 19, 26–28].

Глава 3. 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. В главе описаны следующие основные результаты:

В п.3.1 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. [2, 29–31].

В п.3.2 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 [31].

В п.3.3 предложен метод и алгоритмы восстановления трёхмерной по-

верхности объекта с целью использования его пространственных характеристик, работающие в реальном масштабе времени. Для решения задачи избран корреляционный алгоритм стереорекострукции, как наиболее быстрый по сравнению с прочими методами восстановления трёхмерной поверхности [31, 38]. Предложен также метод восстановления трехмерной поверхности по серии изображений, полученных одной камерой при движении объекта относительно камеры [2, 43–45]. Приведены примеры восстановления рельефа гладкой трёхмерной поверхности сложной формы по слабоконтрастным изображениям, получаемым в бинокулярной системе компьютерного зрения.

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. На результаты работы получена правовая защита в виде патентов РФ [46–51].

В п 3.4 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 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. [2, 5, 6]

Описанный 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 [2, 13]. 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. 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 [12–14].

Пример результатов интерпретации изображений представлены на рис. 2.

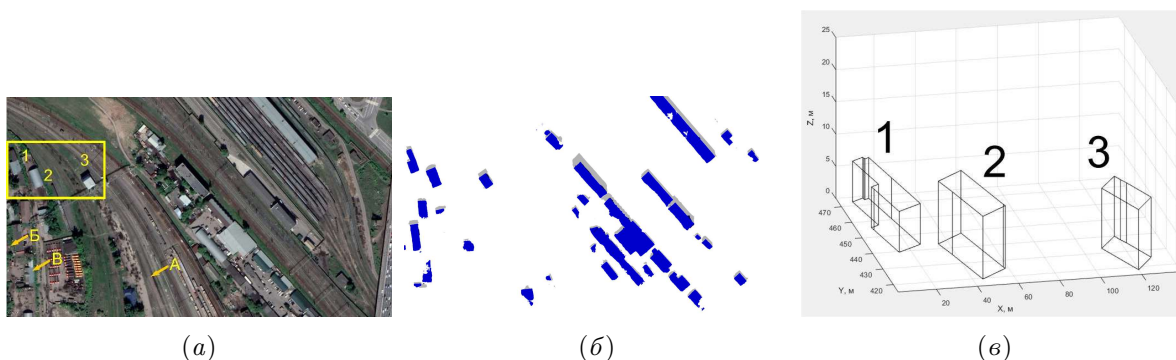


Рис. 2. Семантическая сегментация и построение трехмерных моделей зданий с помощью ИНС : (а) тестовое спутниковое изображение; (б) результат семантической сегментации зданий (в) трехмерная модель зданий 1–3 (фрагмент изображения)

Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [2, 5, 6, 12–14, 29–31].

Глава 4. Данная глава посвящена разработке новых 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.

В п. 4.1 данно описание взволнованной морской поверхности как поля возвышений (волновых аппликат) [7, 24, 33–35].

$$z = \zeta(x, y, t), \quad (2)$$

где (x, y, z) — прямоугольная декартова система координат, в которой плоскость (x, y) совпадает с уровнем спокойной (невзволнованной) водной поверхности; t — время.

В п. 4.2 приведен сравнительный анализ методов определения спектров волнения [4, 17, 21, 33].

В п. 4.3 дано представление 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 [7, 17, 33–35]:

$$\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}S(\mathbf{k}). \quad (3)$$

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 п. 4.4 представлен модифицированный восстанавливающий оператор \mathbf{R}_{mod} в виде суперпозиции двух пространственно-частотных фильтров $R_{high}(\mathbf{k})$ и $R_{low}(\mathbf{k})$ в области высоких и низких частот соответственно [1, 17, 21, 37].

Для параметризации восстанавливающего оператора использовалась степенная функция волнового числа с параметрами, зависящими от волнового азимута, в виде [24, 34]:

$$R(\mathbf{k}, \mathbf{a}) = a_0(\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{-(a_1 + a_2 \cos(\varphi - \varphi_c))}. \quad (4)$$

Набор условий формирования поля яркости МП включает зенитный угол Солнца и пространственное разрешение изображения МП. Вектор \mathbf{a} 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.

Схема, иллюстрирующая предлагаемый метод дистанционного измерения углового распределения энергии по двумерным пространственным спектрам ветровых волн, восстанавливаемых по спектрам спутниковых изображений, приведена на рис. 3 [1].

Операции подготовки данных (блок 1) включают выбор областей инте-

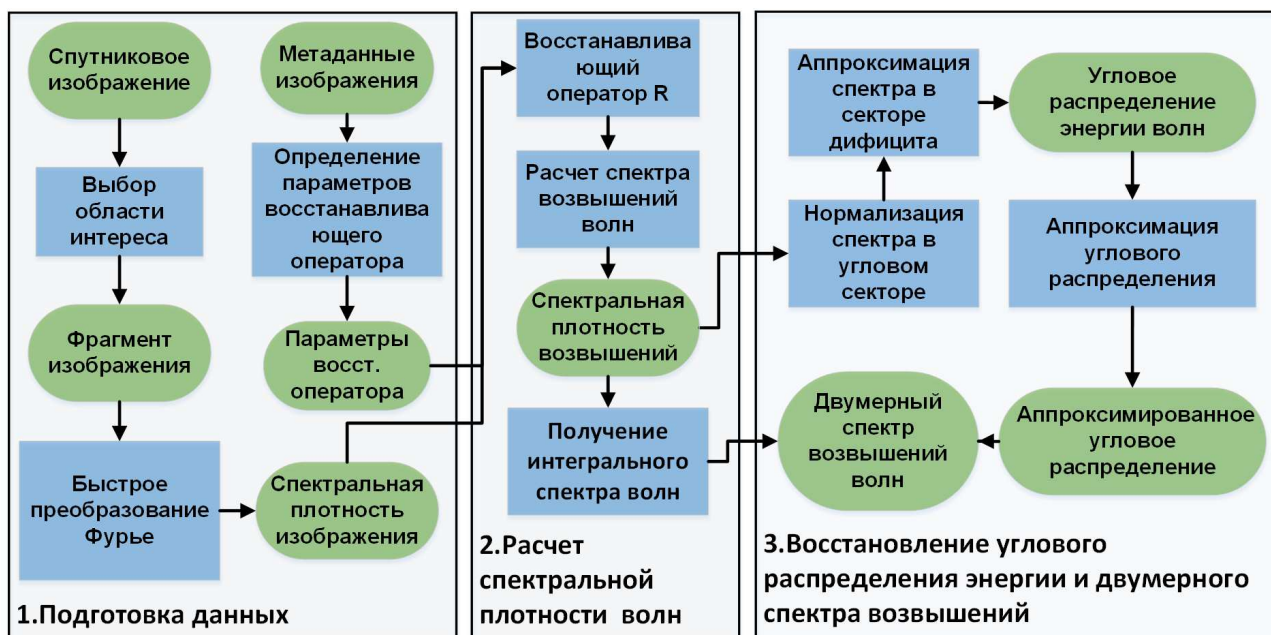


Рис. 3. Блок-схема метода дистанционного измерения углового распределения

реса 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 обеспечение возможности восстановления углового распределения энергии волн в двумерном спектре по одиночным спутниковым изображениям.

В таком представлении двумерный спектр волнения можно рассматривать как произведение

$$\Psi(k, \varphi) = \chi(k)D(k, \varphi), \quad (5)$$

где $\chi(k)$ — интегральный одномерный спектр, $D(k, \varphi)$ — безразмерная функ-

ция углового распределения энергии морских волн, k — волновое число (модуль волнового вектора \mathbf{k}), φ — волновой азимут, характеризующий направление распространения волновой гармоники с волновым вектором \mathbf{k} .

$$D(k, \varphi) = \Psi(k, \varphi) \int_{-\pi}^{\pi} \Psi(k, \varphi) d\varphi. \quad (6)$$

В п. 4.5 разработан высокопроизводительный алгоритм и исследовательское программное обеспечение для регистрации спектров морской поверхности по космическим изображениям, которые могут применяться для решения задач оперативной океанографии [9, 16]. Разработанное исследовательское программное обеспечение предназначено для работы с применением многоядерных процессоров. Проведено тестирование разработанных алгоритмов и получены оценки их производительности на экспериментальных данных.

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.

Представленные методы реализованы программно и внедрены при создании программного обеспечения экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации

Результаты настоящей главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [1, 4, 7, 9, 16, 17, 21, 24, 33–35].

Глава 5. В п.5.1 представлен подход к валидации методов восстановления спектров по спектрам оптических космических изображений с применением восстанавливающих операторов в широком диапазоне длин волн. Для калибровки и проверки адекватности метода 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 [1, 4, 32].

В п.5.2 описаны условия проведения комплексных экспериментов [21, 22].

В п.5.3 представлены результаты экспериментов с использованием стационарной исследовательской платформы [4, 7, 21, 22, 32]. Результат восстановления углового распределения энергии волн по фрагментам спутникового изображения с помощью разработанного метода показан на рис. 4, а. Для сравнения на рис. 4, б показано углового распределения энергии волн, полученное путём пересчёта из данных струнного волнографа, установленного на исследовательской платформе.

Для более детального анализа соответствия результатов дистанционных и контактных измерений двумерных угловых распределений энергии, приведенных на рис. 4, выполнено сопоставление одномерных разрезов этих распределений для морских волн различной длины. Результаты такого сопоставления приведены на рис. 5, где представлены одномерные разрезы угловых распределений для различных длин.

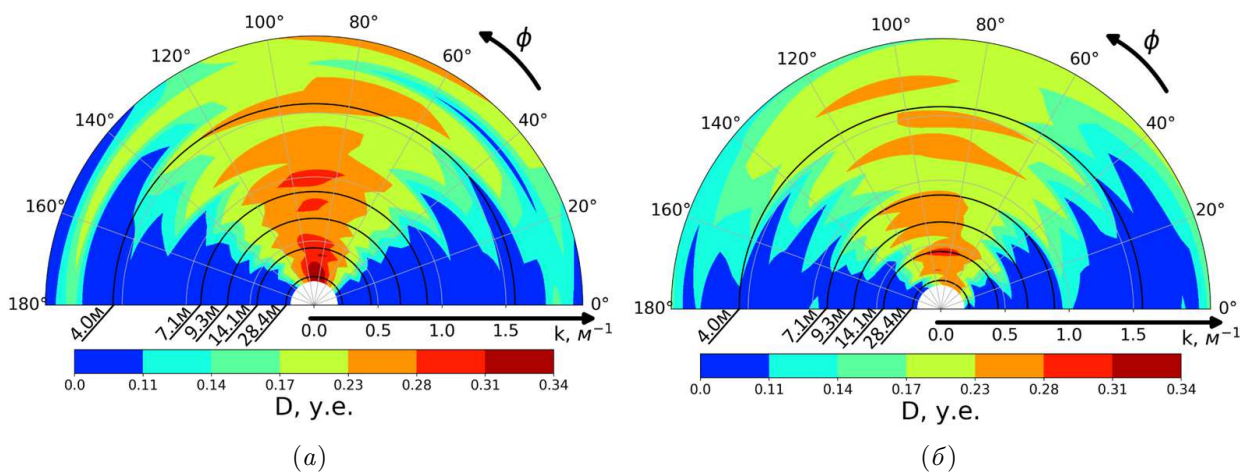


Рис. 4. Сопоставление результатов измерений двумерных спектров волнения по спутниковым и подспутниковым данным: (а) угловое распределения энергии морских волн, восстановленное по спектру фрагмента спутникового изображения; (б) свёрнутое угловое распределение энергии морских волн, построенное по данным подспутниковых измерений

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;

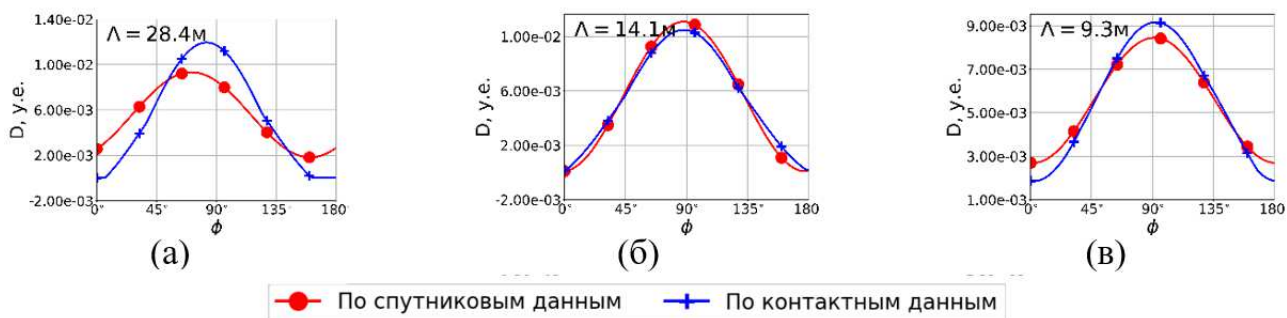


Рис. 5. Угловые распределения энергии морских волн, полученные различными методами: восстановленные по спектрам фрагментов спутникового изображения (красные линии); оцененные по данным решетки струнных волнографов (синие линии) для длин волн: а) $\Lambda = 28.4$ м, б) $\Lambda = 14.1$ м, в) $\Lambda = 9.3$ м

$p = 2.23 \pm 0.09$ 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. .

В п.5.4 представлены результаты экспериментов, проведённых в акватории Тихого океана с использованием дрейфующих буёв. По результатам экспериментов были получены поправки в параметры восстанавливающего оператора, соответствующие смешанному волнению, включающему как ветровые волны в условиях большого разгона, так и системы волн зыби [11, 15].

В п.5.5 представлены результаты применения метода восстановления спектров уклонов и возвышений морского волнения по космическим оптическим изображениям высокого пространственного разрешения. Разработанный метод использован при исследованиях состояния поверхностного волнения, в том числе при космическом мониторинге естественных и антропогенных воздействий на морские акватории [1]. Экспериментально подтверждена адекватность дистанционного измерения как средних по времени спектров морской поверхности, так и вариаций этих спектров, обусловленных нестационарностью волнения и аномалиями морской поверхности, связанными с антропогенными воздействиями.

Результаты главы опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК (и/или индексируемых в системах Web-of-Science/Scopus) [1, 4, 7, 11, 15, 21, 22, 32].

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. 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 вы-

сот 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. 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. Метод 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 используется подход, основанный на формировании и параметризации пространственно-частотных фильтров, восстанавливающих спектры поверхностного волнения. 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 оптимальные 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 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.

5. Подтверждена адекватность разработанного метода восстановления спектров уклонов и возвышений морского волнения по спутниковым оптическим изображениям высокого пространственного разрешения. В процессе исследований пространственные спектральные характеристики морского волнения, оцениваемые по данным дистанционного зондирования, сопоставлялись с соответствующими характеристиками, измеряемыми подспутниковыми средствами в контролируемых условиях, включая: данные решетки струнных волнографов, установленной на исследовательской гидрофизической платформе, данные стереосъемки с малой высоты над поверхностью моря, а также данные, полученные с дрейфующих волновых буёв. 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. Получена поправка к параметру восстанавливающего пространственно-частотного фильтра в диапазоне степенного спада частотного спектра волнения для сложных условий волнообразования (длительный разгон, система волн, содержащая ветровые волны и различные волны зыби).

Рекомендации. Полученные результаты могут быть использованы в области мониторинга различных территорий для обработки аэрокосмических изображений высокого и среднего пространственного разрешения при реше-

нии ряда фундаментальных и прикладных задач:

- для повышения информативности изображений, получаемых космической аппаратурой дистанционного зондирования, в том числе устанавливаемой на новых моделях космических аппаратов;
- 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.

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 плодотворную совместную работу над крупными научными проектами, многие результаты которых положены автором в основу диссертационной работы.

Публикации:

1. 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. Англ. версия: 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.
2. 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. Англ. версия: 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.
 3. 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.
 4. 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.
 5. Kazaryan M. L., Richter A. A., Murynin A. B., Gvozdev O. G., Kozub V. A., Pukhovskiy D. Yu., Zelensky A., Semenishchev E. Parametric Evaluation of Observed Objects from Images Based on Perspective Geometry Methods and Convolutional Neural Networks // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2022. Vol. 12317. № 123171E. 9 p. DOI 10.1117/12.2646261.
 6. Kazaryan M., Richter A., Gvozdev A., Murynin A., Kozub A., Pukhovskiy D., Shakhramanyan M., Semenishchev E. Reconstruction of 3D models of infrastructure objects from satellite images based on typed elements // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2022. Vol. 12269. Pp. 77–90. DOI 10.1117/12.2641134.
 7. 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.
 8. Игнатъев 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.
- Англ. версия: 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
- Англ. версия: 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.
12. Гвоздев О. Г., Козуб В. А., Кошелева Н. В., Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Нейросетевой метод построения трехмерных моделей ригидных объектов по спутниковым изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 1, с. 48–55. DOI 10.17587/mau.22.48–55.
13. 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. Англ. версия: Gvozdev O. G., Kozub V. A., Kosheleva N. V., Murynin A. B., Richter A. A. Constructing 3D Models of Rigid Objects from Satellite Images with High Spatial Resolution Using Convolutional Neural Networks // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2020, Vol. 56, No. 12, pp. 166–1677. DOI 10.1134/S0001433820120427.

14. 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.
15. 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.
Англ. версия: 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.
16. 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. Англ. версия: Vorobyev V. E., Murynin A. B., Khachatryan K. S. High-Performance Registration of Sea-Wave Spatial Spectra during the Operational Space Monitoring of Vast Water Areas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2020, Vol. 56, No. 9, pp. 1159–1167. DOI 10.1134/S0001433820090248.
17. 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.
18. Гороховский К. Ю., Игнатъев 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.
Англ. версия: 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.
19. Гурченков А. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н., Игнатъев 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.

20. Игнатъев В. Ю., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трёкин А. Н. Оценка качества изображений при повышении разрешения на основе пространственного спектрального синтеза // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2017. Т. 72. № 1. С. 124–141.
21. Бондур В. Г., Дулов В. А., Мурынин А. Б., Игнатъев 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.
Англ. версия: 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.
22. Бондур В. Г., Дулов В. А., Мурынин А. Б., Юровский Ю. Ю. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1-2. С. 7–24. DOI 10.7868/S0205961416010048.
Англ. версия: 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.
23. Гурченков А. А., Бочкарёва 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.
24. Бондур В. Г., Мурынин А. Б. Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // Исследования Земли из космоса. 2015. № 6. С. 3–14.
Англ. версия: 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.
25. 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.
Англ. версия: Bockkareva 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.

- Рр. 897–904. DOI 10.1134/S1064230715060027.
26. Игнатъев 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.
Англ. версия: 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. Lobantsov V. V., Matveev I. A., Murynin A. B. A Biometrical Data Quality Analysis Method to Reliably Evaluate the Efficiency of Recognition Algorithms and Systems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2012. Vol. 22. № 4. Pp. 595–600. DOI 10.1134/S1054661812040116.
 30. Lobantsov V. V., Matveev I. A., Murynin A. B. Method of multimodal biometric data analysis for optimal efficiency evaluation of recognition algorithms and systems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2011. Vol. 21. № 2. Pp. 494–497. DOI 10.1134/S1054661811020684.
 31. 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.
Англ. версия: 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.
 32. 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.
 33. 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.
34. Мурынин А. Б. Параметризация фильтров, восстанавливающих пространственные спектры уклонов морской поверхности по оптическим изображениям // *Исследование Земли из космоса*. 1991. № 5. С. 31–38.
35. 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.
36. Мурынин А. Б., Трёкин А. Н., Игнатъев 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.
37. Бондур В. Г., Мурынин А. Б., Игнатъев 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.
38. Murynin A. B., Knyaz V. A., Matveev I. A. Human Vision Pathology Diagnostics by Photogrammetrics 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.
39. Мурынин А. Б., Бондур В. Г., Игнатъев 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.
40. Трекин А. Н., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Бочкарёва В. Г. Метод повышения априорной информации в векторной форме для сохранения границ // *Машинное обучение и анализ данных*. 2015. Т. 1. № 12. С. 1717–1730. DOI 10.21469/22233792.1.12.07.
41. Murynin A., Gorokhovskiy K., Ignatiev V. Trainable method for predicting characteristics of land surface objects // *Proc. IADIS international conference computer graphics, visualization, computer vision and image processing 2013*. Prague, Czech Republic, July 22–24, 2013. Pp. 119–125.
42. Murynin A., Gorokhovskiy K., Bondur V., Ignatiev V. Analysis of Large Long-term Remote Sensing Image Sequence for Agricultural Yield Forecasting // *Image Mining. Theory and Applications. Proc. 4th International Workshop on Image Mining. In conjunction with VISIGRAPP 2013*. Barcelona, Spain, February 2013. Pp. 48–55.
43. 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. 174–181.
44. 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.
45. 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.

Патенты и свидетельства:

46. Патент № 2497112 Российская Федерация, МПК G01N 33/24 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01), G01N 11/06 (2006.01). Способ дистанционного определения деградации почвенного покрова: № 2012123643/28; заявл. 08.06.2012:

- опубл. 27.10.2013 Бюл. № 30. / Бондур В. Г., Мурынин А. Б., Давыдов В. Ф., Гороховский К. Ю. .
47. 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.
 48. Патент № 2315357 Российская Федерация, 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.
 49. Патент № 2316051 Российская Федерация, 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.
 50. 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.
 51. 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.
 52. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2013618294 Модуль синтеза мультиспектральных изображений: Государственная регистрация программы для ЭВМ: зарег. 05.09.2013: опубл. 20.12.2013 / Игнатъев В. Ю., Бондур В. Г., Гапонова Е. В., Мурынин А. Б.
 53. 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.
 54. 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 / Игнатъев В. Ю., Мурынин А. Б., Трекин А. Н.
 55. 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.
 56. 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 / Игнатъев В. Ю., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Трекин А. Н.
 57. 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.
 58. 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.