

Санкт-Петербургский филиал АО «Конструкторское бюро «ЛУЧ»

На правах рукописи

УДК 528.85

Кириенко Андрей Васильевич

МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОИСКА ТЕХНОГЕННОГО  
МУСОРА НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНОЙ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в Санкт-Петербургском филиале  
АО «Конструкторское бюро «Луч»

**Научный руководитель:** **Бурлов Вячеслав Георгиевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационных технологий и систем безопасности», ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Научный консультант:** **Остриков Вадим Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский филиал АО «Конструкторское бюро «Луч»

**Официальные оппоненты:** **Якушев Денис Игоревич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Специальных информационных технологий», ФГКОУ ВО «Санкт-Петербургский университет МВД РФ»

**Вагизов Марсель Равильевич**, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедры «Информационных систем и технологий», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.212.197.03 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г.Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

Отзыв на автореферат, в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.03, Ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д.212.197.03, к.в.н., доцент

Соколов А.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования*

В соответствии с Указом президента Российской Федерации от 08 июля 2011г. № 899 технологии геоинформационного мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды отнесены к критическим. Частью таких технологий являются интегрированные пространственно-временные геоинформационные системы (ГИС), а оперативное дистанционное зондирование поверхности Земли на основе воздушной съемки - одним из основных компонентов информационного обеспечения (ИО) ГИС. Такая съемка широко используется на воздушных пилотируемых, а также беспилотных летательных аппаратах (БЛА), в том числе, для оперативного предупреждения чрезвычайных ситуаций из-за возможных загрязнений местности опасными техногенными отходами производства и потребления, определенными ГОСТ 30772-2001. К такого типа загрязнениям относятся, в том числе, обломки отделяемых частей (ОЧ) ракетносителей (РН) (включая высокотоксичные элементы топливных баков, относящиеся к I классу опасности в соответствии с «Федеральным классификационным каталогом отходов»), образующиеся в ходе проведения запусков. Что в свою очередь требует оперативности работ по ИО ГИС поиска техногенного мусора и ликвидации загрязнений.

С учетом того, что разброс обломков, как правило, распространяется на значительную территорию, а размеры фрагментов малы, их обнаружение методами воздушной оптико-электронной съемки (ОЭС) становится значительной проблемой. Эта проблема связана с низкой заметностью искомых объектов на фоне реальной степной, лесистой и иногда частично урбанизированной местности. В итоге их выявление с помощью ОЭС сопряжено с большими временными затратами, поскольку требуется высокое пространственное разрешение. Для этого необходимо, применительно к средствам ОЭС, обеспечивать небольшие высоты полета носителя, что при облете больших площадей, приводит к крайне низкой производительности ИО ГИС и большим финансовым затратам на полетное время.

Повышение эффективности (оперативности и качества) ИО ГИС поиска техногенного мусора возможно путем применения сравнительно новых средств дистанционной съемки видеоспектрального (ВС) типа (в англоязычной литературе – гиперспектральной съемки). Их явное преимущество перед обычной, давно отработанной аппаратурой ОЭС, в настоящее время до конца не обосновано. Вместе с тем, геоинформационные данные дистанционного зондирования, полученные с помощью ВС приборов, обеспечивают, в отличие от традиционного подхода, автоматизированное распознавание элементов поверхностей сравнением, на основе специальных метрик, пространственно разрешаемых спектральных векторов регистрируемых сцен с заведомо возможным набором опорных кривых.

С другой стороны, ВС средства построены на необходимости реализации измерительного режима получения данных, который, в свою

очередь, требует решения ряда специфических задач. Первая из них, в ходе первичной обработки результатов съемки, – реализация радиометрической калибровки в полевых условиях. Кроме того, первичная обработка данных требует обоснованного выбора метода атмосферной коррекции, правильность такого выбора может быть построена лишь на оценке качества решения конечной тематической задачи.

Вторая специфическая задача, - выбор и обоснование использования методик предварительной обработки для снижения шумовых искажений. В настоящее время известные подходы не позволяют их качественно применить к результатам ВС съемки (ВСС) из-за искажения спектральной составляющей. Также применение ВСС с аппаратурой сканирующего типа характеризуется наличием геометрических искажений данных в виде высокочастотных флуктуаций строк (в англоязычной литературе – «джиттера»), отсюда в рамках предварительной обработки необходимо создание новой модели и методики его компенсации, совместно с телеметрическими данными.

Третья специфическая задача – обеспечение качественной тематической обработки данных поиска техногенного мусора, для чего требуется априорный выбор метрик спектрального сравнения применительно к объектам заданного типа. С этой целью необходимо построение новой, ранее не известной в литературе, специальной имитационной модели, позволяющей в «критических» условиях поиска заранее выбирать метрики и пороги текущего сравнения сигнатур спектральных векторов снимка с опорными характеристиками.

Четвертая специфическая задача состоит в разработке модели и методики сравнения предложенного варианта оперативного ИО ГИС поиска на основе ВСС с традиционно используемым подходом с применением ОЭС. Итогом их применения является сравнительная оценка вероятностей решения задачи и производительности поиска техногенного мусора двумя подходами для одинаковых условий функционирования.

#### ***Научно-техническая задача.***

В работе ставится и решается важная научно-техническая задача, имеющая актуальное и существенное значение для развития страны: разработка моделей и методик информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе применения воздушной видеоспектральной съемки, которые в отличии от известных подходов позволят решить конечную задачу идентификации техногенного мусора с требуемым качеством.

#### ***Объект исследования.***

Объектом исследования является техногенный мусор, в том числе обычные и токсичные обломки отделяемых частей ракетносителей, образующиеся в процессе ракетных пусков, ГИС его поиска.

#### ***Предмет исследования.***

Предметом исследования являются процесс и средства обработки данных о пространственном положении и атрибутивных характеристиках фрагментов отделяемых частей ракетносителей как объектов техногенного

мусора специфического типа в целях информационного обеспечения ГИС поиска.

***Цель и задачи исследования.***

Целью настоящей работы является повышение эффективности информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора путем применения и обработки данных воздушной видеоспектральной съёмки.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ и определить основные проблемы получения и обработки данных воздушной видеоспектральной съёмки для информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора;

2. Разработать модели и методики первичной обработки данных ВСС, позволяющие выполнять радиометрическую калибровку в полевых условиях, а атмосферную коррекцию в условиях облачности;

3. Разработать модели и методики предварительной обработки данных ВСС, обеспечивающей повышение качества исходных данных без искажения спектральных составляющих сигналов;

4. Разработать методику тематической обработки данных ВСС на основе имитационной модели априорной оценки ее качества и провести апробацию разработанных методик на реальных результатах воздушного поиска фрагментов ОЧ РН;

5. Провести системное оценивание эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе использования традиционных данных ОЭС и с применением ВСС.

***Научная новизна исследования:***

1. Разработана новая модель и методика оценки спектрального разрешения аппаратуры ВСС по результатам тестовой съёмки, реализуемая путем аналитического сравнения полученных данных с совокупностью расчетов на основе атмосферной модели MODTRAN. На их основе реализована методика радиометрической калибровки, обеспечивающая качественное функционирование средства ВСС в реальных условиях эксплуатации.

2. Доработана до практического применения модель и методика атмосферной коррекции результатов ВСС с использованием наземных эталонов.

3. Адаптированы и обоснованы модель и методика коррекции случайных шумов и демпфирования полосовых искажений применительно к данным ВСС, позволяющие значительно снизить влияние шумовых возмущений.

4. Разработана новая модель и методика комбинированной геометрической коррекции данных ВСС, позволяющая демпфировать высокочастотный «джиттер» визуальных образов искомых объектов.

5. Разработана новая имитационная модель геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных

ВСС для произвольных условий наблюдения. Обосновано ее применение для предварительной оценки качества ИО ГИС поиска техногенного мусора; обоснован выбор и применение метрик тематической обработки данных ВСС для решения рассматриваемой задачи.

6. Разработана методика системного оценивания эффективности оперативного ИО ГИС поиска техногенного мусора, позволяющая провести сравнительную оценку ИО ГИС для двух вариантов построения: на основе использования традиционной аппаратуры ОЭС и с применением ВСС.

7. Разработаны практические рекомендации по построению ИО ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной ВСС.

#### ***Состояние вопроса исследования***

В настоящее время для ИО ГИС поиска техногенного мусора, в том числе фрагментов ОЧ РН, традиционно используется технология применения воздушной ОЭС. Вместе с отработанными методами ее использования, основным недостатком такого подхода является необходимость практически чисто визуального обнаружения фрагментов ОЧ РН, значительная часть которых (до 60%) имеет сравнительно небольшие размеры (единицы десятков сантиметров в поперечнике). При этом такие обломки часто маскируются травяным покровом и могут быть разбросаны на весьма значительные площади.

Другой подход к ИО ГИС поиска может быть построен на применении аппаратуры ВСС, в основе которой лежит принципиальная возможность автоматизированного обнаружения фрагментов, отличающихся от окружающего фона своими спектральными характеристиками даже в условиях значительного замешивания элемента разрешения окружающим фоном. Результаты спектральной обработки таких данных, где уже заведомо выявлены все элементы сцены, со значительной степенью достоверности подозрительные на наличие объектов поиска, позволяют оператору тратить существенно меньшее время, во-первых, на их обнаружение (обзор больших площадей снимка). Во-вторых, - на собственно принятие решений к отнесению выделенных зон либо к реальным объектам поиска, либо к ложным тревогам, и занесение в базу данных (БД) объектов ГИС. Платой за принципиально новое качество применения такого подхода является ряд не вполне решенных до настоящего времени задач, связанных со сравнительно новым типом используемой ВС аппаратуры (в отечественном исполнении – пока опытной), реализующей измерительный режим обработки данных, не подкрепленный совокупностью методических основ ее применения. Ликвидации пробела в разработке этих основ, а также для оценки принципиальной возможности реализации преимуществ ИО ГИС на основе использования ВСС, особенно в части их главного достоинства – повышения производительности работы оператора, посвящено проведение исследований в данной работе.

***Теоретическая значимость работы обоснована:***

– разработанной новой методикой оценки спектрального разрешения ВС аппаратуры и на ее основе построения методики радиометрической калибровки, реализуемой путем применения тестовой съемки с использованием атмосферной модели MODTRAN, позволяющих осуществлять качественную коррекцию данных ВСС непосредственно в полевых условиях;

– проведением адаптации методики компенсации полосовых искажений и случайных шумов к обработке данных ВСС, обеспечивающей повышение качества исходных данных без искажения спектральных составляющих сигналов;

– разработанной новой методикой комбинированной коррекции геометрических искажений и геокодирования данных ВСС, демпфирующей высокочастотный «джиттер» образов искомым объектов с повышением точности геокодирования;

– разработанной новой оригинальной имитационной моделью геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных ВСС применительно к решению тематической задачи поиска объектов техногенного мусора;

– разработанной методикой системного оценивания эффективности оперативного ИО ГИС поиска техногенного мусора.

Теоретическая значимость работы подтверждена 6-тью публикациями в рецензируемых журналах РАН (из списка, рекомендованного ВАК): «Исследование Земли из космоса», 2-мя статьями в «Оптике атмосферы и океана», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», «Информационно-измерительные и управляющие системы» (из них две статьи продублированы в зарубежных англоязычных журналах), в журнале «Гидрометеорология и экология» (принята к публикации). Кроме того, результаты опубликованы в 4-х подразделах монографии «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА», под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.

***Практическая значимость работы состоит:***

– в создании программного обеспечения (ПО) первичной обработки данных ВСС для ИО ГИС поиска техногенного мусора для оценок спектрального разрешения аппаратуры и его использования для последующей радиометрической калибровки, а также ПО атмосферной коррекции данных ВСС;

– в создании ПО предварительной обработки данных ВСС для ИО ГИС поиска техногенного мусора с целью компенсации полосовых искажений и случайного шума, а также ПО геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС;

– в создании ПО имитационной модели геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных для априорной оценки возможностей ИО ГИС на основе ВСС;

– в создании ПО тематической обработки данных для ИО ГИС поиска техногенного мусора, обеспечивающего автоматизированную спектральную идентификацию объектов;

– в разработке ПО системного сравнения ИО ГИС поиска техногенного мусора на основе использования традиционных данных ОЭС и с применением ВСС;

– в разработке практических рекомендаций по построению ИО ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной ВСС.

Практическая значимость также подтверждена полученными 7-ю свидетельствами о государственной регистрации ПО.

#### ***Методы исследования***

При решении поставленных задач использованы методы математического моделирования, методы теории оптико-электронных систем и их построения, методы теории атмосферной оптики, методы автоматизированной обработки сигналов и теории вероятностей. В ходе экспериментальных исследований применялись методы планирования эксперимента, статистической обработки результатов наблюдений.

#### ***Научные положения и результаты, выносимые на защиту:***

1. ***Модели и методики первичной обработки данных ВСС, включающие: новую модель и методику оценки спектрального разрешения данных ВСС по тестовой съемке на основе атмосферной модели MODTRAN, на их основе – методику радиометрической калибровки данных ВСС, методику атмосферной коррекции данных ВСС по наземным эталонам,*** которые отличаются тем, что обеспечивают оценку точности спектрального разрешения до 0,5 нанометра во всем интервале чувствительности прибора без использования специальных дорогостоящих установок на производстве и позволяют оперативно решать задачу радиометрической калибровки в любых, включая натурные, условиях эксплуатации аппаратуры.

2. ***Модели и методики предварительной обработки данных ВСС, включающие: адаптацию модели и методику компенсации шумовых искажений данных ВСС, новую модель и методику комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС,*** которые отличаются тем, что позволяют демпфировать полосовые искажения и случайный шум данных ВСС с повышением отношения сигнала к шуму в 1,5-1,8 раза и существенно уменьшают высокочастотный «джиттер», что повышает визуальную дешифрируемость снимков и точность геокодирования данных до 20%.

3. ***Методика тематической обработки данных ВСС на основе оригинальной имитационной модели геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных для априорной оценки возможностей информационного обеспечения ГИС на основе ВСС с использованием разработанных методик первичной и предварительной обработки,*** которая отличается тем, что позволяет в 1,4-1,5



раза повысить вероятность выявления объектов техногенного мусора за счет априорного выбора метрик и параметров обработки данных.

**4. Модель и методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора, сравнение построения информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора с использованием традиционной оптико-электронной съемки и с применением ВСС, практические рекомендации по построению и реализации информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной ВСС,** которые показали, что при более высокой вероятности идентификации объектов техногенного мусора, использование ГИС на основе ВСС в 5 раз повышает оперативную производительность системы распознавания техногенного мусора в сравнении к стандартному применению оптико-электронной съемки для информационного обеспечения ГИС.

#### ***Апробация работы***

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 2-х всероссийских научно-практических конференциях: «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве», Санкт-Петербург, 16-17 сентября 2015г.- СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015 (2 доклада), «Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии» - материалы VI международной конференции (8-13 сентября 2013г.) - г. Ростов-на-Дону, 2013.

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) и его реализация лично автором диссертации на основе применения предложенных моделей и методик внедрено в создание комплекса получения и обработки ВС данных в рамках опытно-конструкторской работы «Питатель» (головной исполнитель Санкт-Петербургский филиал АО «Вега», заказчик работы – Министерство промышленности и торговли РФ, название работы: «Разработка базовых технологий создания ряда унифицированных электронных модулей для контрольно-измерительной, метрологической и поверочной аппаратуры измерения основных характеристик гиперспектральных средств наблюдения»), а также использовалось в обеспечение 3-х научно-исследовательских работ по специальной тематике в интересах МО РФ.

Разработанное ПО применялось к полученным данным воздушной ВСС в ходе проведения научного эксперимента по обнаружению ОЧ РН на тестовом полигоне для оценки возможностей решения экологической задачи поиска фрагментов техногенного мусора. Эксперимент проводился совместно с ЗАО НТЦ «Реагент» и АО «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры». Положительные результаты показали целесообразность применения данных ВСС для решения поставленной задачи.

В ходе проведения совместного научного эксперимента СПб филиала АО «КБ «Луч» с СПб «Агрофизическим институтом им. А.Ф.Иоффе» РАН РФ, с участием географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, применялась первичная и предварительная обработка данных ВСС воздушной

съемки на основе разработанного в диссертации ПО. Результаты использованы в учебном процессе подготовки студентов географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

**Соответствие паспорту специальности.** Полученные научные результаты соответствуют пунктам 2, 6, 7, 8 паспорта научной специальности 25.00.35 – «Геоинформатика».

**Личный вклад автора.** Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 20 работ, включая 6 статей из перечня изданий, рекомендованных ВАК (две из них продублированы в англоязычном варианте), 4 подраздела в монографии, 3 работы в материалах всероссийских научно-технических конференций. В числе опубликованных работ также 7 свидетельств о регистрации в Государственном реестре программ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 81-го наименования. Основная часть работы содержит 151 страницу, 56 рисунков и 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** приводится анализ возможности применения воздушного дистанционного ВС зондирования для ИО ГИС поиска техногенного мусора, особенности построения аппаратуры и проблемы обработки данных ВСС, рассматривается применение атмосферной модели MODTRAN для учета влияния атмосферы как основного фактора, влияющего на формирование спектральных идентифицирующих свойств ВС данных.

Проведенный анализ по применению видеоспектральной съемки, а также особенности ее работы в измерительном режиме позволили сформировать общую схему оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе данных ВСС (рис.1) и определить ключевые задачи проведения исследований.

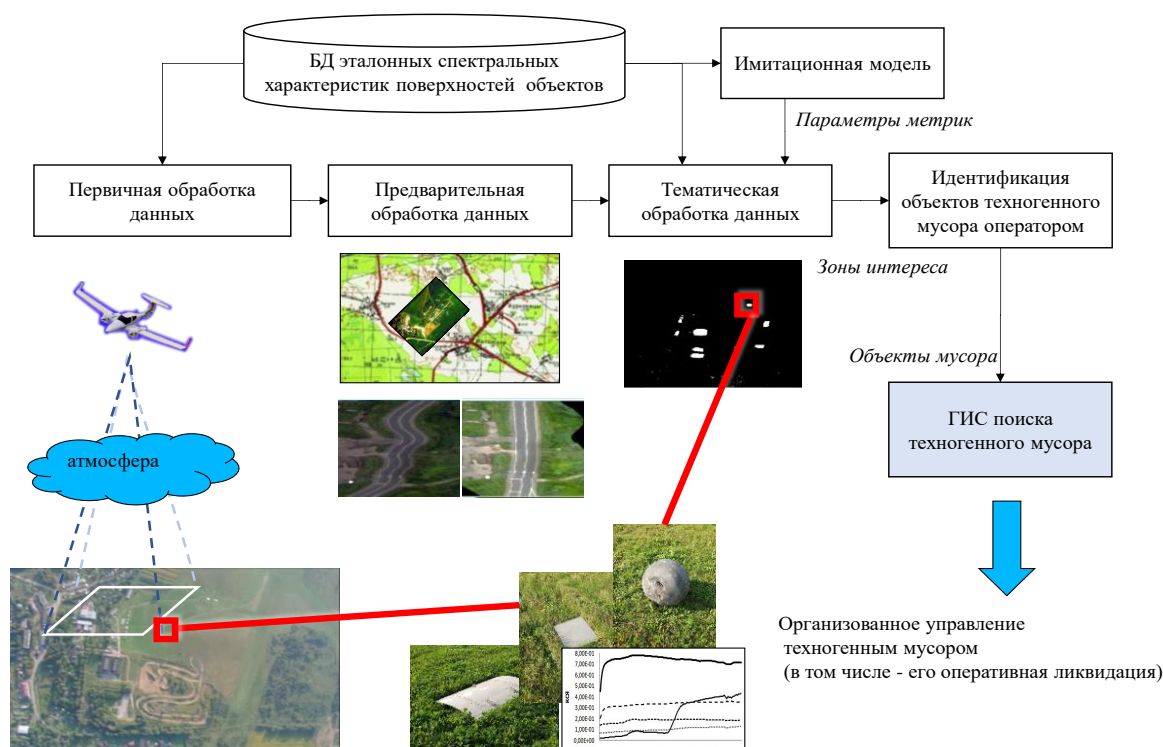


Рис.1

Во второй главе рассматривается методика первичной обработки данных ВСС, включая методики радиометрической калибровки (на основе новой методики оценки спектрального разрешения) и атмосферной коррекции данных. Описана разработанная методика внутренней радиометрической калибровки исходных данных [5,10,17,19]. Показано, что при достаточно точном (эта точность определена предложенной новой методикой оценки спектрального разрешения (СР) используемого прибора) знании СР получаемых ВС сигналов, возможно ее успешное применение. Методика калибровки основана на использовании атмосферной модели MODTRAN и позволяет, в пределах ошибки около 5-10% от требуемых значений сигналов, скорректировать спектральные кривые реальной аппаратуры. Методика оценки СР аппаратуры основана на сравнении результатов тестовой съемки участка неба с рассчитанными модельными данными. Для ее реализации каждая кривая – приборная и модельная (последняя - применительно к каждому заданному СР), предварительно подвергаются выделению высокочастотного тренда на тестируемом участке как разности между исходными и сглаженными значениями кривых, полученных использованием скользящего сглаживающего фильтра. В итоге высокочастотный тренд  $\tilde{x}$  определяется как разность между исходной кривой  $x_i$ , ( $i = 1, \dots, N$ ),  $N$ - общее число спектральных точек на тестируемом участке) и ее сглаженным значением:

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i. \quad (1)$$

Математическая модель расчета низкочастотной составляющей  $\bar{x}$ , при аппроксимации данных полиномом  $(P - 1)$ -го порядка:  $\bar{x}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}x_j$ , (2)

где  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  - текущая вектор-выборка  $N$  значений сглаживаемой кривой в окрестности центральной точки скользящего интервала,  $a_{ij}$  - постоянные весовые коэффициенты, соответствующие элементам матрицы  $A$  (принимается  $P = 3$ ):

$$A = (B^T B)^{-1} B^T = \begin{Bmatrix} a_{11} a_{12} \dots a_{1N} \\ a_{21} a_{22} \dots a_{2N} \\ a_{31} a_{32} \dots a_{3N} \\ \dots \dots \dots \dots \\ a_{N1} a_{N2} \dots a_{NN} \end{Bmatrix}, \quad B^T = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & \dots & \dots & 1 \\ t_1 & t_2 & \dots & \dots & t_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{t_1^{P-1}}{(P-1)!} & \frac{t_2^{P-1}}{(P-1)!} & \dots & \dots & \frac{t_N^{P-1}}{(P-1)!} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

На основе кубического сплайна приборная кривая предварительно приводится к сетке спектральных линий с постоянным шагом в 1 нм, интервалы между положениями отсчетов взяты равномерные:  $t_i = -(i - 1)$ .

В качестве примера на рис.2 представлены приведенные спектральные сигналы исследуемых приборов и сопутствующих модельных разрешений на опорной линии 700 нм: а – применительно к FieldSpec, б – для прибора ВСС.

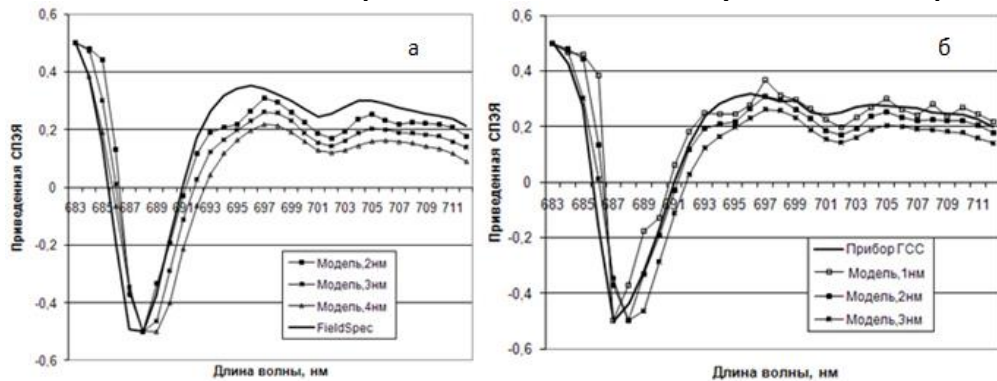


Рис.2

Сравнение, основанное на расчете среднеквадратической ошибки (СКО) невязок и коэффициента корреляции между сравниваемыми кривыми, позволяет с точностью до 0,5 нм оценить значения СР на участке чувствительности используемой аппаратуры. Методика апробирована на трех разновидностях приборов – двух видеоспектрометров НПЦ «Реагент» и для серийного спектрорадиометра FieldSpec (FS), СР которого известно и задано паспортными данными.

В целом методика радиометрической калибровки данных ВСС состоит из следующих этапов: тестовая съемка безоблачного участка неба; расчет модельных данных по MODTRAN для соответствующих условий наблюдения; оценка СР; расчет коррекционной кривой смещений центров линий для рассчитанных СР; расчет коррекционной кривой первичной радиометрической калибровки, которая определяется коэффициентом отношения радиометрических величин модельных данных для соответствующих рассчитанных СР к данным ВСС. Далее коррекционная кривая смещений центров линий и калибровочная кривая применяются к исходным данным ВСС в процессе непосредственной работы.

После первичной калибровки проводится атмосферная коррекция данных ВСС. Предлагается методика атмосферной коррекции на основе

эталона, расположенного в зоне съёмки [2,10,12,13]. Обозначим за  $r_{ij}$  - вычисляемую оценку коэффициента спектральной яркости (КСЯ) текущего  $ij$  пикселя снимка, за  $L_{ij}$  – спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) текущего пикселя,  $L_e$  - СПЭЯ калибрующего эталона,  $L_0$  - СПЭЯ возможного смещения,  $r_e$ - КСЯ калибрующего эталона, измеренный на земле, например, спектрорадиометром. Здесь  $i \in \{1, I\}$ ,  $j \in \{1, J\}$ ,  $I, J$ - размеры спектральных образов «куба» по двум координатам в пикселях. При этом исходные текущие отсчеты снимка предварительно, на основе внутренней калибровки, преобразуются в метрические значения СПЭЯ.

Атмосферная коррекция текущего пикселя полученного снимка на основе эталона строится на основе выражения

$$r_{ij} = r_e(L_{ij} - L_0) / (L_e - L_0). \quad (4)$$

Здесь, как это следует из (4), КСЯ калибрующего эталона должно быть заранее известно, а СПЭЯ эталона – взято из полученного снимка. То есть, эталонная поверхность должна непосредственно находиться в зоне проведения съёмки (обычно – в начале ее проведения).

Предложен специальный способ определения СПЭЯ смещения  $L_0$ . В общем случае его величина определяет уровень сигнала, соответствующего нулевой величине КСЯ на каждой линии спектра. На практике поверхность с таким КСЯ на снимке крайне редко присутствует, поэтому для оценки  $L_0$  – предложено использовать минимальную величину сигнала на каждой линии спектра, найденную по всем элементам зарегистрированного «куба»:

$$L_0(\lambda) = \min\{L_{ij}(\lambda)\}. \quad (5)$$

Многочисленные практические применения эталонной миры, а также для контроля - трех дополнительных - «темная», «серая» и «светлая», с их предварительными измерениями на земле спектрорадиометром типа FS, в ходе проведения съёмки показали успешность предлагаемой методики атмосферной коррекция даже в условиях облачности.

**В третьей главе рассматриваются модели и методики предварительной обработки данных ВСС, включая методику компенсации шумовых искажений, новую методику комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных.** Практика показала, что для многих ВС приборов может быть весьма значимым уровень регулярных полосовых искажений - до 20% полезного сигнала. Для оценки шумовых искажений, разработана методика на основе эмпирико-математической модели формирования сигналов в ВС, которая затем используется в главе 4 при разработке имитационной модели функционирования системы. Методика оценки шумов построена комбинированным (теоретико-эмпирическим) методом. На рис.3 приводится пример тестовой съёмки, а также оценка влияния вертикальных, горизонтальных и случайных составляющих шумовых искажений на уровень общего отношения сигнала к шуму.

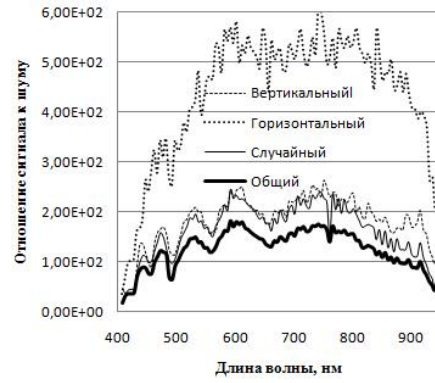
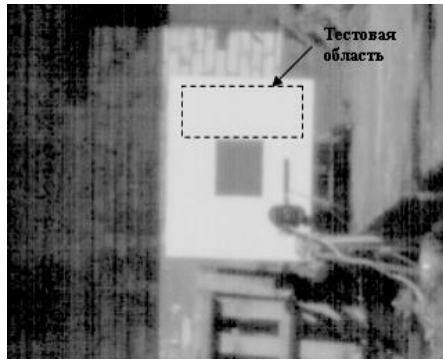


Рис.3

Оценки величин общих шумовых искажений  $\sigma_o$ , а также вертикальных  $\sigma_v$  и горизонтальных  $\sigma_g$  полосовых искажений строятся на основе оценки СКО данных по однородной области тестовой съемки.

Для оценки случайной составляющей используется расчет сигнала  $N(\lambda)$  (в виде числа сигнальных зарядов) по каждому «элементарному» пространственно разрешаемому элементу прибора, который определяется в рассматриваемом диапазоне в соответствии с общепринятым в теории ОЭС выражением с учетом известных параметров аппаратуры и условий съемки. Принимается следующая, общепринятая в мировой практике, априорная оценка отношения сигнала к шуму:

$$\xi(\lambda) = \frac{N(\lambda)}{\sqrt{N(\lambda) + t_n * u_n + \sigma_{sh}^2}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{sh}$  - СКО собственного шума матрицы (как правило, оно известна по техническому паспорту матричного приемника),  $u_n$  - скорость образования темновых электронов  $e^-/c$ ,  $t_n$  - время накопления в секундах.

Оценка СКО случайного шума на выделенной области составит величину (на каждой спектральной линии прибора):  $\sigma_e = E/\xi$ , где  $E$  - средняя величина сигнала по тестовой области. Тогда «теоретическая» оценка СКО общих шумовых искажений  $\sigma_o$  определится как корень из суммы квадратов его составляющих:

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_g^2 + \sigma_e^2}. \quad (7)$$

Выше на рис.3 приведены полученные оценки этих отношений для вертикального, горизонтального и случайного влияния шумовых искажений. Сравнение показывает совпадение «теоретической» оценки значений общего шума  $\sigma_r$  и «прямой» оценки общего уровня шумовых искажений  $\sigma_o$  (на основе прямых измерений) с ошибкой около 5% и максимальной (на выбросах) в пределах 10%, что говорит о возможности оценки и имитации шумовых искажений по отдельным составляющим.

Традиционно для компенсации полосовых искажений используется метод «глобального линейного согласования детекторов». Он заключается в пересчете каждого значения яркости таким образом, чтобы оценки двух первых случайных моментов каждой  $j$ -й «полосы»  $e_j, \sigma_j$ , которой принадлежит

текущий элемент  $f_{ij}$  исходного снимка (на одной спектральной линии), «приводились» к желаемым значениям  $e_g, \sigma_g$ , обычно рассчитанным для всего снимка в целом:

$$s_{ij} = e_g + \sigma_g(f_{ij} - e_j) / \sigma_j, \quad (8)$$

где  $s_{ij}, f_{ij}$  - скорректированное и исходное значения яркости текущих элементов снимка. Если полученное изображение высокого качества и уровень модуляции «полосовыми» искажениями составляет величины в пределах 10-20% от всей шкалы, применение коррекции по выражению (8) приводит к снижению линейного разрешения.

В предлагаемой методике предложено рассматривать полученное изображение (на каждой одной спектральной линии) как сумму двух составляющих:  $f_{ij} = f_{ij}^N + f_{ij}^v$ , первая из которых  $f_{ij}^N$  отвечает за низкочастотную часть снимка, а вторая  $f_{ij}^v$  - за высокочастотную. Исходя из физического смысла, полосовые искажения принадлежат, преимущественно, высокочастотной части. Обозначим зависящим от некоторого «срезающего» параметра  $\tau$  преобразование сглаживания (выделения низкочастотной составляющей аналогично (8)) изображения, так, что вторая, высокочастотная часть может быть представлена в виде

$$f_{ij}^v = f_{ij} - F[\tau^*, f_{ij}], \quad (9)$$

где  $\tau = \tau^*$  - значение скользящего параметра, которое обеспечивает рациональный, в смысле, означенном ниже, выбор уровня среза (обычно в пределах 5-9), а в качестве  $F$  - модель (1-3) для двумерного случая. Тогда, используя (8), рассматриваемый алгоритм коррекции полосовых (в данном случае - строчных) искажений строится на основе выражения:

$$f_{ij}^{KOR} = F[\tau^*, f_{ij}] + \sigma_g^v(f_{ij}^v - e_j^v) / \sigma_j^v, \quad (10)$$

где, аналогично тому, что было принято выше,  $e_g^v, \sigma_g^v$  - желаемые среднее и оценка второго центрального момента, рассчитанные по его высокочастотной части,  $e_j^v, \sigma_j^v$  - те же величины, но определяемые для строк высокочастотного образа.

Процедура выбора сглаживающего скользящего параметра  $\tau^*$  используется также и в ходе компенсации случайного шума. При этом сглаживание обеспечивается скольжением фильтра по спектру каждого зарегистрированного ВСС пикселя. На рис.4 приведен пример применения обработки данных ВСС на 15-й спектральной линии: а - исходный фрагмент, б - выделенные полосовые искажения, в - результат демпфирования полосовых искажений, г - результат демпфирования полосового и случайного искажений, д - выделенный случайный шум. Сравнение показывает визуально высокое качество демпфирования полосовых и спектральных шумовых искажений при отсутствии артефактов (отсутствуют проявления сюжета на шумовых срезах) и рост линейного разрешения (повышение четкости особенно применительно к мелким деталям сцены).

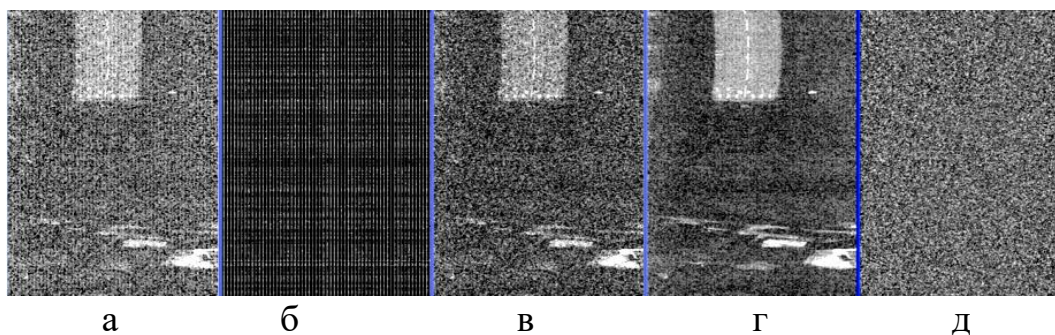


Рис.4

Разработанная методика компенсации случайных и полосовых помех, адаптированная для данных ВСС, позволяет, как показали результаты тестовой съемки, повысить отношение сигнала к шуму в 1,5 – 1,8 раза.

Практика использования ВС воздушной съемки показала также существенное влияние высокочастотных сдвигов строк регистрируемых сигналов для визуального дешифрирования снимков. При этом средства, регистрирующие угловые колебания, в силу конструктивных причин, часто не позволяют фиксировать измерения на каждую формируемую строку сканирующего прибора. В результате, в ходе последующей корректировки на основе данных навигационных датчиков, остаточные некомпенсированные искажения не позволяют реализовать последующее качество дешифрирования (наиболее важная информация о мелких деталях на снимке «рассыпается»).

В работе предложена и реализована новая оригинальная методика комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС [1,3,18], вызванных колебаниями носителя по крену, повышающая точность стандартной модели геокодирования данных. Суть методики состоит в совместном выравнивании высокочастотных колебаний строк (так называемого «джиттера») с использованием корреляционного анализа и низкочастотных колебаний (регистрируемых навигационным прибором). При этом выбор параметра, согласующего те и другие данные коррекции, осуществляется автоматически и адаптивно на основе разработанной алгоритмической оптимизации. После комбинированной коррекции выполняется геокодирование скорректированных данных ВСС на основе фотограмметрической модели формирования снимков аппаратурой сканерного типа. В качестве характерного примера на рис.5 представлен фрагмент исходного снимка (а), полученного сканирующей аппаратурой с подвижного носителя с явно выраженными геометрическими искажениями, его скорректированный образ только по навигационным измерениям крена – (б), а также результат коррекции снимка с помощью предложенной методики - (в).



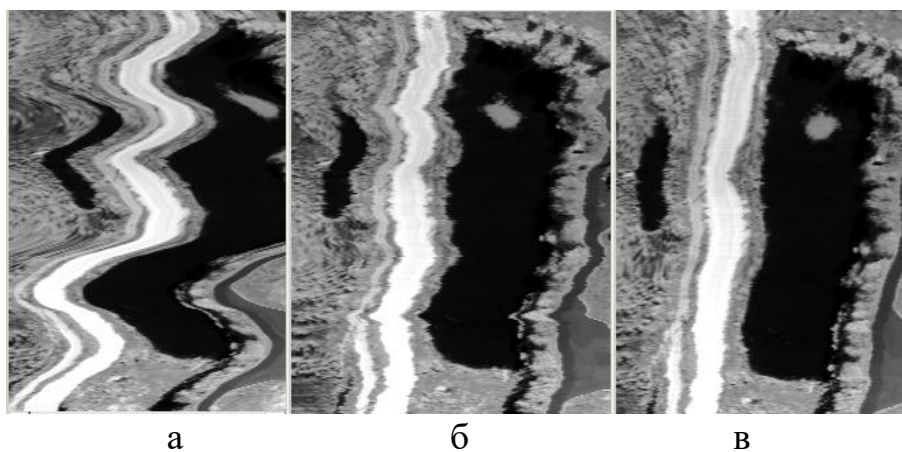


Рис.5

Оценка разности коррекции стандартным и предложенным способом, а также рассчитанная точность координат в контрольных точках в виде среднеквадратической ошибки, позволяет утверждать, что новая методика комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС позволяет повысить точность координатной привязки до 15-20%, но что более существенно - повышает визуальную дешифрируемость данных благодаря демпфированию высокочастотных геометрических искажений образов объектов.

**В четвертой главе рассматривается методика тематической обработки данных ВСС на основе имитационной модели геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных и апробация ее на результатах реального эксперимента.** Новая имитационная модель (ИМ) геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных видеоспектральной съемки разработана [7,8] для априорной оценки решения задач поиска техногенного мусора в конкретных условиях. Функционирование ИМ можно представить в виде схемы на рис.6.

Модель геопространственного и спектрального представления фоно-объектовой обстановки представляет собой «шахматное» расположение объектов на заданном фоне и является бивариантной комбинацией спектральных векторов, случайно задаваемых в пределах возможной выборки значений. Спектральное смешивание объекта с фоном в процессе реальной съемки имитируется дополнительным разбиением каждого пикселя, в котором присутствует «объект», таким образом, что имитационная модель может задавать практически любое градационное значение этого смешивания. Синтез спектрального трехмерного «куба», в свою очередь, генерируется в соответствии со следующими соображениями. Обозначим за  $\xi_{ij} = RAVN(ij)$  генерируемые датчиком случайные числа, распределенные по равномерному закону в диапазоне от 0 до 1. Индексы  $ij$  соответствуют привязке случайного числа к каждому исходному элементу (обычно 16 на 16) в элементах разрешения прибора на общем тестовом шаблоне. Обозначим априорно известные функции распределения  $F_{o,f}(\xi_{ij})$  (для имитируемого объекта «о»

или фона «f»), преобразующие равномерное распределение случайных чисел в заданное. При этом вид распределения определяется численно в ходе анализа экспериментальных данных.



Рис.6

Принадлежность каждого элемента зонного разбиения к объекту или фону определяется видом текущего элементарного шаблона. Тогда выражение для генерации спектрального «куба» в виде пространственно-спектрального распределения КСЯ  $\rho_{ij}(\lambda)$  можно определить по формуле

$$\rho_{ij}(\lambda) = \begin{cases} \rho_{Go}(\lambda) \cdot F_o(\xi_{ij}) + [1 - F_o(\xi_{ij})] \cdot \rho_{Mo}(\lambda), & ij \in o \\ \rho_{Gf}(\lambda) \cdot F_f(\xi_{ij}) + [1 - F_f(\xi_{ij})] \cdot \rho_{Mf}(\lambda), & ij \in f \end{cases} \quad (11)$$

где  $\rho_{Go}, \rho_{Mo}$  и  $\rho_{Gf}, \rho_{Mf}$  - соответственно верхняя и нижняя границы экспериментально измеренных кривых, ограничивающих распределения КСЯ по объекту и фону, а  $F_{o,f}(\xi_{ij})$  - функции распределения (для имитируемого объекта «o» или фона «f»), преобразующие равномерное распределение случайных чисел в заданное. Синтезированный спектральный «куб»  $\rho_{ij}(\lambda)$  в соответствии с моделью (11) и с учетом вышерассмотренных данных по возможному смешиванию объекта с фоном, является сформированной исходной информацией и используется в качестве входных данных в имитационной модели (ИМ).

Для имитации произвольных условий наблюдения (при безоблачном освещении Солнцем) расчет СПЭЯ для каждого элементарного участка спектра на интервале чувствительности приемной матрицы производится на основе атмосферной модели MODTRAN адаптированным известным методом «трех альbedo», подробно описанным в первой главе работы. В ИМ используется модель формирования сигналов в видеоспектрометре, рассмотренная в 3 главе и на ее основе выводится стохастическая модель

генерации возможных случайных и регулярных шумовых искажений, аддитивно накладываемых на имитируемый образ сцены.

Для реализации расчетных оценок вероятностей решения тематических задач на основе базы данных (БД) эталонных спектральных характеристик поверхностей объектов предусмотрено использование нескольких метрик спектрального сравнения: модификации Теребижа, модификации Кульбака (условно названной «разностно-векторной»), субпиксельного типа, корреляционной.

На рис.7 приведены примеры спектральных ходов по объектам техногенного мусора и фону (для двух экспериментов), которые заносятся в БД эталонных спектральных характеристик поверхностей объектов для использования в ИМ и непосредственно при оперативной работе.

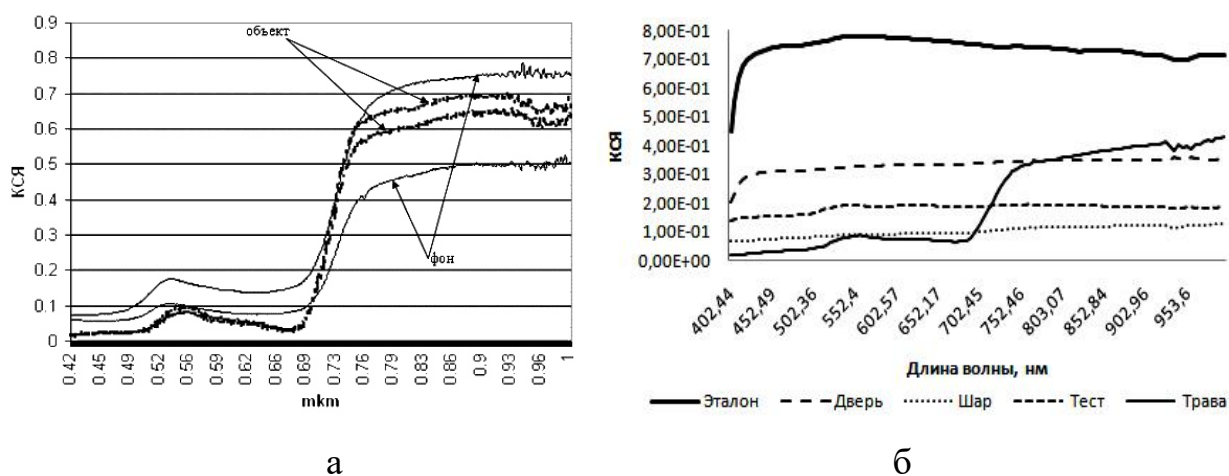


Рис.7

Предлагаемая в работе методика тематической обработки данных ВСС состоит [2,3,6,11] из двух этапов: на первом - проводится априорное оценивание возможности решения задачи поиска техногенного мусора на основе ИМ, в ходе которого определяются возможные внешние условия применения, необходимость использования методик предварительной обработки, выбираются самые чувствительные метрики спектральной идентификации и их параметры; на втором - в ходе непосредственной работы по каждому спектральному вектору данных ВСС осуществляется идентификация на основе выбранной метрики и с порогом применения, оцененным на ИМ. Затем формируется карта обнаружений (зон интереса с возможным содержанием объектов техногенного мусора), которая впоследствии визуализируется совместно с данными ВСС для окончательного принятия решения оператором.

Апробация разработанной методики на первом этапе проводилась на основе применения универсальной аппаратуры ВС съемки применительно к наиболее «жестким» условиям фоно - целевой обстановки. С этой целью исследовалось обнаружение по данным ВСС объекта техногенного мусора, раскрашенного «под травяной покров», расположенного на фоне травы, летом, вблизи аэродрома. Сравнивались результаты реальной обработки с результатами функционирования разработанной ИМ с учетом спектральных

свойств объекта и фона, представленных своими граничными кривыми КСЯ (рис.7а). Результаты расчетов по ИМ для двух случаев – без применения разработанных методик предварительной обработки и с их использованием, приведенные на рис.8а, показывают, что применение спектральной идентификации используемого типа к модельному варианту без предварительной обработки данных, приводит к низким уровням вероятностей правильного обнаружения при соизмеримых уровнях ложных тревог.

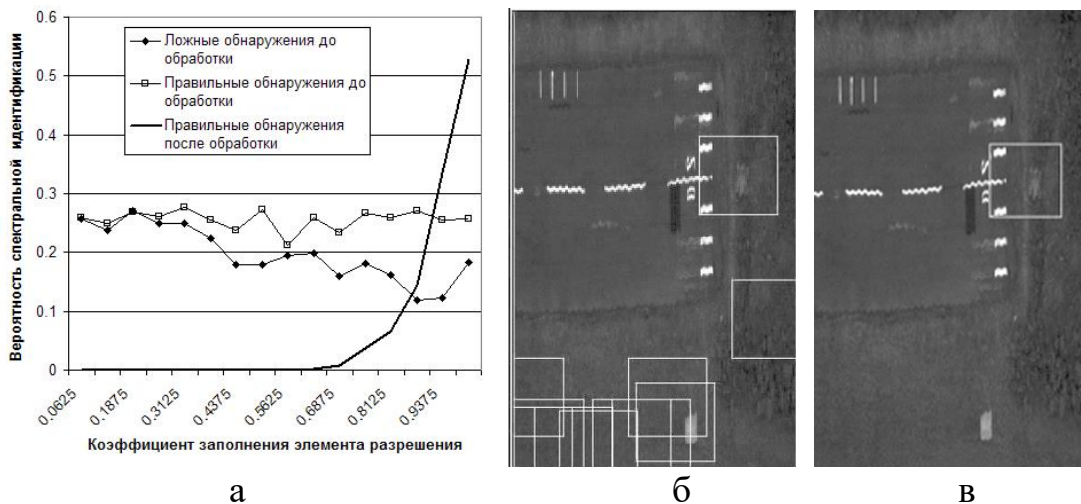


Рис.8

При спектральном распознавании по данным экспериментальной съемки на основе того же модифицированного дискриминанта Теребижа получены следующие результаты: без применения предварительной обработки (рис.8б) - помимо искомого, ложно обнаружены еще 11 объектов, в то же время (рис.8в) - после предварительной обработки, классификация приводит к однозначному распознаванию тестового объекта мусора (по совокупности обнаруженных пикселей). В итоге экспериментальные результаты с точностью до 10% совпадают с данными, предварительно полученными на основе ИМ, что подтверждает ее качество.

На втором этапе апробации обработка данных ВСС относилась к решению собственно задачи информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора в виде обломков ОЧ РН [4].

На рис.9 приведены сравнительные образы (в градациях серого) RGB-синтезированных вырезов ВСС данных на область внимания с выделенными на них объектами наблюдения. Левый образ – по исходному кадру. Правый – после применения методик предварительной обработки.

В качестве объектов техногенного мусора использовались следующие фрагменты ОЧ РН: дверь, шар, куски обшивки ОЧ. По каждому объекту наблюдения, на земле, предварительно измерялись КСЯ с помощью полевого спектрометра SR-3500 с занесением в БД (спектральные ходы приведены на рис.7б). Все опорные сигнатуры объектов имеют близкую по форме характеристику, что, в сочетании с используемым типом нормировки,

в конечном итоге приводит к спектральной близости искомым спектральным опор по их форме.

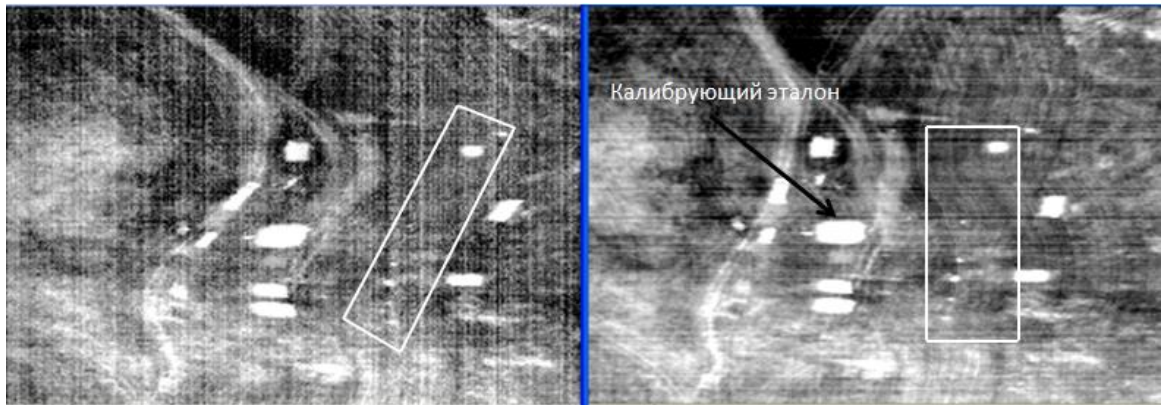


Рис.9

На рис.10 приведены результаты спектральной идентификации объектов поиска с помощью метрик: а – субпиксельного типа, б- разностно-векторной, в – модифицированной Теребижа, г – по коэффициенту корреляции. Слева – по исходным данным ВСС, справа – по данным после использования методик предварительной обработки. Во всех случаях предварительная обработка привела к существенному подавлению ложных тревог.

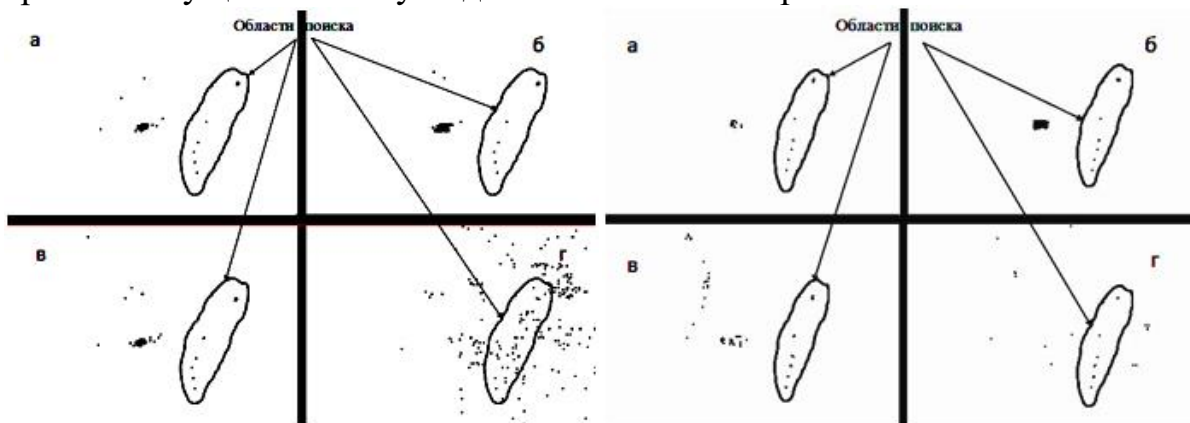


Рис.10

Результаты расчета вероятностей спектральной идентификации тремя методами до (а) и после (б) проведения предварительной обработки данных с помощью ИМ представлены на рис.11.

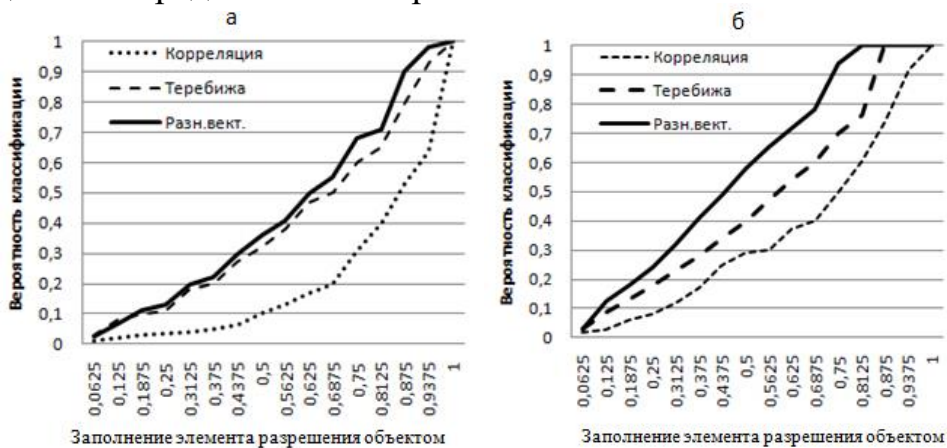


Рис.11

Приведенные данные обработки по ИМ показывают, что как до, так и после применения методик предварительной обработки, вероятности различения «объектов» на фоне травяного покрова примерно (с точностью до 10% для всех метрик спектральной идентификации) совпадают с результатами, полученными непосредственно по обработке результатов экспериментальной съемки. Это совпадение обеспечивается при условии, что коэффициент смешивания имитируемых «объектов» с «фоном», составляет величину около 0,7, что вполне соответствует реальной ситуации с учетом того фактора, что это смешивание и на самом деле составляет величину в пределах 0,5 - 0,7. Это в свою очередь объясняется тем, что пространственное разрешение аппаратуры в рассматриваемой ситуации в большинстве случаев (кроме объекта «дверь») соизмеримо с размерами большинства «объектов», то есть почти в половине случаев «объект» спектрально замешан с «фоном».

В результате тематической обработки эксперимента была выбрана наиболее подходящая метрика спектральной идентификации для такого вида техногенного мусора – «разностно-векторная», которая показала высокую вероятность распознавания 0,75 (по совокупности обнаруженных пикселей, принадлежащих объекту) и низкий уровень ложных тревог.

**В пятой главе** приведена методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора и на ее основе проведено сравнение подходов к ИО ГИС на основе ВС съемки и обычной ОЭС при их применении в оперативном режиме [6], а также приведены практические рекомендации по построению ИО ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной ВСС.

Методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора опирается на доработанную модель *системы информационного взаимодействия человек – машина* (СИВЧМ). Наиболее сложным в обеспечении функционирования СИВЧМ на конечном этапе, является функция принятия, за ограниченный интервал времени, решения о распознавании искомых объектов поиска на контролируемом участке местности значительной площади.

Поток информационных видеоданных поступает оператору с определенной заданной периодичностью -  $T_э$ . За это время оператор-дешифровщик должен обслужить весь предварительно полученный и обработанный кадр на предмет выявления элементов (зон) снимка, подозрительных на наличие объектов поиска. Эти зоны проявляются с некоторой *средней* периодичностью, равной  $\Delta t_{пп}$ . Поступающие зоны идентифицируются оператором со средним временем -  $\Delta t_{ип}$ , которое характеризует его квалификацию. *Среднее* время вынесения окончательного решения о принадлежности обнаруженного сочетания совокупности признаков к искомому объекту составляет  $\Delta t_{нп}$ .

Для учёта в модели основных ситуаций выделяются следующие четыре базовых состояния. Первое состояние (состояние S1) – это состояние, в котором находится СИВЧМ на начало рассматриваемого процесса (момент

поступления кадра на анализ оператору). Второе состояние (состояние S2) – это состояние, которое характеризует достижение процессом конечного решения задачи. Частота перехода системы из состояния S1 в состояние S2 ( $\zeta^+$ ) равна величине, обратной среднему времени выполнения целевой задачи  $T_3$ , которая характеризует возможности системы к получению решения, а частота ( $\zeta^-$ ) характеризует среднюю частоту невыполнения целевой задачи системы в целом. Третье базовое состояние системы (процесса), которое характеризуется «фактом проявления проблемы» – состояние S3. Это последовательное поступление на анализ оператором зон, подозрительных на наличие искомого объекта. При нахождении СИВЧМ в состоянии S3 возникает необходимость в идентификации подозрительной зоны. Частота перехода из состояния S3 в состояние S4 есть величина  $\nu_1 = \frac{1}{\Delta t_{III}}$ . В том случае, когда дешифровщик «пропускает» текущую зону, подозрительную на объект поиска, система переходит обратно в состояние S1 с частотой  $\nu_3$ , которая характеризует вероятность «пропуска» искомого объекта. В процессе анализа решения управляемая система переводится в состояние S4, в котором оператор уже будет понимать, каким образом он должен задействовать ресурсы, чтобы достичь решения задачи. Переход из состояния S4 в состояние S2 соответствует частоте  $\nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{III}}$ . В том случае, когда оператор, по каким-то причинам, не в состоянии принять правильное решение, тогда система, с вероятностью этого события, возвращается из состояния S2 в состояние S4 с некоторой частотой  $\nu_2^-$ . В рассматриваемом, описанном случае, граф функционирования системы представляется в виде рис.12.

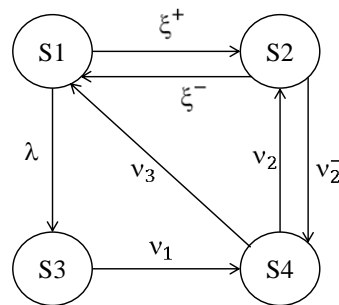


Рис.12

По размеченному графу составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена:

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -(\zeta^+ + \lambda)p_1(t) + \zeta^-p_2(t) + \nu_3p_4(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \zeta^+p_1(t) - (\nu_2^- + \zeta^-)p_2(t) + \nu_2p_4(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - \nu_1p_3(t) \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = \nu_2^-p_2(t) + \nu_1p_3(t) - (\nu_2 + \nu_3)p_4(t) \end{cases} \quad (12)$$

Для получения аналитического решения, введены обозначения:  $\zeta^+ = 1/T_3$ ,  $\lambda = 1/\Delta t_{III}$ ,  $\nu_1 = 1/\Delta t_{III}$ ,  $\nu_2 = 1/\Delta t_{III}$ . Выше также были введены: показатель частоты срыва решения задачи  $\zeta^-$ , показатель невозможности принятия

правильного решения при привлечении дополнительных ресурсов  $v_2^-$ , показатель пропуска зоны с объектом  $v_3$ .

Применительно к статическому случаю, представленному на графе, описываемому системой уравнений, матрица алгебраических уравнений  $A$ , вектор  $B$  (правой части) и вектор решений  $P$  будут иметь вид (13) (производные в левой части приравниваются нулю). При этом система преобразуется условием полноты:  $1 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$ . Тогда

$$A = \begin{bmatrix} -(\zeta^+ + \lambda) & \zeta^- & 0 & v_3 \\ \zeta^+ & -(v_2^- + \zeta^-) & 0 & v_2 \\ \lambda & 0 & -v_1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

В итоге решение уравнений вероятностей состояний системы находится в виде:

$$P = A^{-1}B. \quad (14)$$

В конечном итоге методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора состоит из задания временных характеристик системы и оценки на основе модели (12-14) вероятности решения задачи поиска техногенного мусора.

Применим методику к сравнению эффективности построения ГИС на основе ВСС и обычной ОЭС при их функционировании в оперативном режиме. Для этого зададим одинаковую область на местности для мониторинга, на которой будут находиться 6 реальных объектов ОЧ РН с размерами от 0,5 до 2 метров.

В рассматриваемом варианте (высота съемки - 1150 метров с разрешением на местности - 0,646 м) после автоматической обработки данных ВС съемки выделится в среднем 10 зон (из них 6 истинные и 4 ложных), подозрительных на наличие искомого объекта с вероятностью обнаружения и идентификации истинных – 0,98. Общее время дешифрирования, в общей сложности, составит 30 сек (сумма  $\Delta t_{НП}$  и  $\Delta t_{ИП}$  умноженная на возможное число зон). В соответствии с выражением (14), вероятность решения задачи ГИС на основе ВС съемки составит  $p_2 = 0,94$  – это вторая составляющая вектора вероятности системы в состоянии S2 на графе (рис.12).

Параметры съемки для ИО ГИС на основе ОЭС определим из следующих соображений: необходимостью обнаружения объектов поиска размером 0,5 м и соизмеримой площадью охвата местности по отношению к ВСС. Для выполнения условия правильного обнаружения объектов поиска размером 0,5 м по уровню вероятности, равном 0,95, в соответствии с критерием Джонсона разрешение на местности должно быть не менее 0,12 метра, что в 5 раз выше требуемого разрешения, чем для ВСС. При соизмеримом охвате местности примем аппаратуру ОЭС, состоящую из линейки 5-ти кадров аналогичного формата, с последовательной съемкой в количестве 5-ти раз. Таким образом, за такое же время полета носителя 28,9



секунд аппаратура ОЭС сделает  $5*5$  кадров аналогичного формата, геометрическое разрешение которых будет в 5 раз выше и составит 0,12 метра. А оператору за время 5,78 секунд будет поступать линейка из 5 кадров, на которой в среднем будет определяться также 10 зон (из них 1-2 истинные и 8-9 ложных), подозрительных на наличие искомого объекта. Отсюда, при принятых допущениях, на основе (14), вероятность решения задачи будет соответствовать величине  $p_2 = 0,12$ .

То есть, для принятых выше параметров, в рассмотренном варианте ИО ГИС поиска объектов техногенного мусора на основе ОЭС невозможно реализовать. Для повышения вероятности решения задачи уменьшим нагрузку на оператора, определив на обработку каждого кадра из линейки по отдельному оператору. Тогда, уменьшив количество зон на каждого оператора до 2-х, получим вероятность решения задачи  $p_2 = 0,75$ .

Таким образом, решение задачи оперативного визуального поиска фрагментов ОЧ РН на основе ОЭС несколько ниже по вероятности относительно применения аппаратуры ВС съемки с той же высоты. При этом обрабатываемая площадь одним оператором в 5 раз меньше. В результате конечная производительность использования системы поиска на основе ВСС, в рассматриваемом варианте расчета, в среднем в 5 раз выше по сравнению с применением ОЭС.

**В заключении** перечислены основные результаты исследований:

1. Разработаны модели, методики и программное обеспечение первичной обработки данных ВСС, в том числе: новая модель и методика оценки спектрального разрешения данных ВСС по тестовой съемке на основе атмосферной модели MODTRAN, на их основе – методика радиометрической калибровки данных ВСС, методика атмосферной коррекции данных ВСС по наземным эталонам, которые отличаются тем, что позволяют оценить точность спектрального разрешения до 0,5 нанометра во всем интервале чувствительности прибора, проводить обработку без использования специальных дорогостоящих установок на производстве и позволяют оперативно решать задачу в любых, включая натурные, условиях эксплуатации аппаратуры.

2. Разработаны модели, методики и программное обеспечение предварительной обработки данных ВСС, в том числе: адаптированные модель и методика компенсации шумовых искажений данных ВСС, модель и новая методика комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС, которые отличаются тем, что позволяют демпфировать полосовые искажения и случайный шум данных ВСС с повышением отношения сигнала к шуму в 1,5 -1,8 раза и существенно уменьшить высокочастотный «джиттер», что повышает их визуальную дешифрируемость и точность геокодирования данных для ГИС до 20%.

3. Разработаны методика и программное обеспечение тематической обработки данных ВСС на основе оригинальной имитационной модели геоинформационного представления объектов поиска, процесса

формирования и обработки данных для априорной оценки возможностей информационного обеспечения ГИС на основе ВСС с применением разработанных методик первичной и предварительной обработки, которые при апробации на данных реальной экспериментальной съемки показывают, что реализация предложенных выше методик предварительной обработки данных ВСС, а также априорно правильный выбор метрик спектральной идентификации на основе имитационной модели, позволяет в 1,4-1,5 раза повысить вероятность выявления объектов техногенного мусора.

4. Разработана модель и методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора, на ее основе проведено сравнение построения информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора с традиционной оптико-электронной съемкой и с применением ВСС, разработаны практические рекомендации по построению и реализации информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной ВСС, которые показали, что при более высокой вероятности идентификации объектов техногенного мусора, использование ГИС на основе ВСС в 5 раз повышает оперативную производительность системы распознавания техногенного мусора в сравнении к стандартному применению ОЭС для информационного обеспечения ГИС.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительном повышении эффективности информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора в оперативном режиме путем применения воздушной ВСС с использованием разработанных моделей и методик обработки и дают возможность предположить о целесообразности применения такого вида информационного обеспечения ГИС для других тематических задач (в частности: анализ загрязнения прибрежных зон водных ресурсов; применение для лесного хозяйства – автоматическая классификация разных пород деревьев, нахождение сухостоев и больных деревьев; применение для управляемого земледелия – дистанционная оценка состава почв, засоренности выращиваемых культур), что является направлением дальнейших научных исследований.

### **Публикации по теме диссертации**

*а) Публикации в научных изданиях, рекомендуемых ВАК:*

1 *Остриков В.Н., Кириенко А.В.* Навигационно-корреляционная коррекция изображений, искаженных взаимными сдвигами строк // Информационно-измерительные и управляющие системы. Т.7, №7, 2009, с. 52-57.

2 *Остриков В.Н., Плехотников О.В., Кириенко А.В.* Обработка гиперспектральных данных, получаемых с авиационных и космических носителей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т.10, №2, 2013, с.243-251.

3 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Смирнов С.И.* Оценка содержания азота и калия в биомассе растений по атмосферно скорректированным гиперспектральным данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана, т.29, № 7, 2016, с.566-571.

4 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Применение авиационной видеоспектральной съемки для поиска на местности фрагментов отделяющихся частей ракет-носителей // Исследование Земли из космоса, № 2, 2019, с.45-54; *Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Kirienko A.V.* Aerial Video-Spectral Survey in the Search for Fragments of Separated Parts of Launch Vehicles on the Ground // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1082–1088.

5 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Оценка спектрального разрешения видеоспектрометра по данным регистрации фраунгоферовых линий с использованием атмосферной модели MODTRAN // Оптика атмосферы и океана, т.32, № 7, 2019, с.1-6; *Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Kirienko A.V.* Estimation of Spectral Resolution of Imaging Spectrometers from Fraunhofer Lines with the MODTRAN Atmospheric Model // Atmospheric and Oceanic Optics, 2019, Vol.32, No 6, pp.622-627.

6 *Бурлов В.Г., Кириенко А.В., Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Оценка качества построения геоинформационной системы автоматизированного поиска техногенного мусора по видеоданным воздушной съемки // Гидрометеорология и экология, июнь 2021 (принята в набор), 15с.

*б) Публикации в прочих источниках: в монографии «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 2:*

*Робототехнические комплексы на основе БЛА», под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г. - М.: Радиотехника:*

7 *Смирнов С.И., Михайлов В.В., Остриков В.Н., Кириенко А.В.* Использование рандомизированной модификации метода главных компонент для сжатия и тематической обработки данных в перспективных типах аппаратуры дистанционного зондирования земли, применяемых на борту БЛА. - с.529-538.

8 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Шулика К.М.* Имитационно-модельное исследование влияния качества оптической системы гиперспектрометра на вероятность различения спектров. - с.538-549.

9 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Модельная оценка влияния шума гиперспектрометра БЛА на вероятность спектральной идентификации наблюдаемых объектов. - с.567-579.

10 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Оценка характеристик гиперспектрометра по результатам тестовой съемки. - с.579-587.

*в) Материалы конференций, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

11 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Оценка возможностей модельно-экспериментального контроля радиометрической калибровки

авиационного гиперспектрометра в области 450-1000 нм // Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Материалы VI международной конференции (8-13 сентября 2013г.). - Ростов-на-Дону, 2013. Том 2, с. 332-333.

12 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Смирнов С.И.* Возможность оценки содержания азота и калия на пшеничных полях по данным авиационной дистанционной гиперспектральной съемки // Материалы всероссийской научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве», Санкт-Петербург, 16-17 сентября 2015г.- СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015,с.100-105.

13 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Шулика К.М.* Калибровка данных гиперспектральной аппаратуры авиационной съемки для проведения дистанционного спектрального анализа состояния сельскохозяйственных культур // Материалы всероссийской научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве», Санкт-Петербург, 16-17 сентября 2015г.- СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015,с.20-24.

14 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Радиометрическая калибровка данных. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2013613039 от 21.03.13.

15 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Оценка качества данных. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2013613040 от 21.03.13.

16 *Остриков В.Н., Кириенко А.В., Плахотников О.В., Смирнов С.И., Михайлов В.В.* Обработка гиперспектральных данных. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2013613042 от 21.03.13.

17 *Кириенко А.В., Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Модельно-экспериментальная радиометрическая калибровка гиперспектральных данных. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2014616087 от 10.06.14.

18 *Кириенко А.В., Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Модельно-экспериментальная спектральная коррекция данных гиперспектральной аппаратуры. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2014616088 от 10.06.14.

19 *Кириенко А.В., Остриков В.Н.* Геометрическая коррекция данных воздушной гиперспектральной съемки. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2014616089 от 10.06.14.

20 *Кириенко А.В., Остриков В.Н.* Модельно-экспериментальная оценка спектрального разрешения данных гиперспектральной аппаратуры. Свид. о госуд. рег-ции программы для ЭВМ № 2014614600 от 29.04.14.