

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
В.Г. Бурлов

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
В.Н. Остриков

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

| | |
|---|----|
| Обозначения и сокращения | 5 |
| Введение | 6 |
| 1 Основные особенности, проблемы получения и обработки данных воздушной видеоспектральной съемки для информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора | 19 |
| 1.1 Анализ возможности применения дистанционного видеоспектрального зондирования для информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора | 19 |
| 1.2 Особенности построения аппаратуры видеоспектральной съемки, проблемы первичной и предварительной обработки данных | 28 |
| 1.3 Свойства атмосферы, применение атмосферной модели MODTRAN для использования в моделях обработки данных видеоспектральной съемки | 31 |
| 1.4 Возможности спектральной идентификации по данным видеоспектральной съемки | 35 |
| 1.5 Схема оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе данных видеоспектральной съемки и постановка задач проведения исследований | 37 |
| 1.6 Выводы | 39 |
| 2 Модели и методики первичной обработки данных видеоспектральной съемки | 41 |
| 2.1 Радиометрическая калибровка данных аппаратуры с применением атмосферной модели MODTRAN, модель и методика оценки спектрального разрешения данных видеоспектральной съемки | 41 |
| 2.2 Модель и методика атмосферной коррекции данных видеоспектральной съемки | 55 |
| 2.3 Выводы | 60 |
| 3 Модели и методики предварительной обработки данных видеоспектральной съемки | 61 |

| | |
|---|-----|
| 3.1 Эмпирико-математическая модель формирования сигналов в видеоспектрометре и методика оценки случайных и полосовых шумовых искажений | 61 |
| 3.2 Модель и методика компенсации шумовых искажений данных видеоспектральной съемки | 69 |
| 3.3 Методика комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных видеоспектральной съемки | 76 |
| 3.4 Выводы | 87 |
| 4 Методика тематической обработки данных видеоспектральной съемки с использованием имитационной модели | 88 |
| 4.1 Имитационная модель геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных видеоспектральной съемки | 88 |
| 4.2 Рекомендации по применению имитационной модели для задачи оценки влияния спектрального разрешения данных видеоспектральной съемки на решение тематической задачи | 96 |
| 4.3 Разработка и апробация методики тематической обработки данных на реальных результатах воздушной видеоспектральной съемки объектов техногенного мусора | 99 |
| 4.4 Выводы | 117 |
| 5 Системное оценивание эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора | 119 |
| 5.1 Методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора | 119 |
| 5.2 Системное сравнение построения информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе традиционной оптико-электронной съемки и с применением видеоспектральной съемки | 130 |
| 5.3 Практические рекомендации по построению информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной видеоспектральной съемки | 137 |

| | |
|-------------------|-----|
| 5.4 Выводы | 140 |
| Заключение | 141 |
| Список литературы | 143 |

Обозначения и сокращения

| | |
|----------|---|
| БД | - база данных; |
| БЛА | - беспилотный летательный аппарат; |
| ВС | - видеоспектрометр, видеоспектральный; |
| ВПП | - взлетно-посадочная полоса; |
| ВСС | - видеоспектральная съемка; |
| ГИС | - геоинформационная система; |
| ДЗЗ | - дистанционное зондирование Земли; |
| ИМ | - имитационная модель; |
| ИО | - информационное обеспечение; |
| КСЯ | - коэффициент спектральной яркости; |
| МДВ | - метеодальность видимости; |
| МО | - математическое ожидание; |
| ОС | - оптическая система; |
| ОСШ | - отношение сигнала к шуму; |
| ОЧ | - отделяемые части; |
| ОЭА | - оптико-электронная аппаратура; |
| ОЭС | - оптико-электронная съемка; |
| ПО | - программное обеспечение; |
| РН | - ракетоноситель; |
| СКО | - среднеквадратическое отклонение; |
| СПЭЯ | - спектральная плотность энергетической яркости; |
| СР | - спектральное разрешение; |
| ФОО | - фоно - объектовая обстановка; |
| DN | - (digital number) - приборные отсчеты яркости; |
| FS, FS-4 | - Field Spec, – Field Spec 4 (серийные спектрорадиометры производства США); |
| SR-3500 | - Spectral Resolution - 3500 (серийный спектрорадиометр производства США). |

Введение

Актуальность

Геоинформационная система (ГИС) – это автоматизированная информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных. ГИС объединяет в единый комплекс методы и технологии обработки данных автоматизированных систем и позволяет создавать на своей основе мощный инструмент для сбора, хранения, систематизации, анализа и представления информации. Все это делает ГИС незаменимыми для обеспечения принятия решений по управлению в различных областях человеческой деятельности: в производстве, транспорте, навигации, геологии, географии, экономике, военном деле, экологии и т. д. [1]. Технология ГИС позволяет собирать воедино и анализировать различную информацию об окружающей среде, что дает возможность прогнозирования и оценки техногенных рисков, а также информационно обеспечивать устранение последствий, вызванных техногенными рисками. Риск обусловлен самим существованием техногенных объектов. В зависимости от степени работоспособности эти объекты могут находиться, в том числе, в условиях эксплуатации, в ходе которых присутствуют проектно опасные ситуации. Вероятность их возникновения предусмотрена при проектировании соответствующего объекта и его последующего функционирования. Для таких случаев разрабатывают специализированные системы технологической безопасности, рассчитанные на их предотвращение [1,2].

Техногенная опасная ситуация – это состояние, при котором в результате воздействия источника этой ситуации, в общем случае, на объекте или определенной территории, нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб народному хозяйству и окружающей природной среде. Они классифицируются по признаку своего характера, которые могут на них возникнуть. К основным

группам опасных объектов относятся все транспортные системы, включая космические, а также относятся все химически опасные объекты [1]. В частности, к таким объектам следует отнести объекты техногенного мусора, засоряющие обширные территории вблизи функционирующих полигонов проведения ракетных пусков.

В процессе запусков, вблизи полигонов (районов падения отделяемых частей (ОЧ) ракетносителей (РН)), окружающие территории подвергаются засорению обломками ОЧ РН. Их составляют элементы топливных баков, в большинстве случаев с остатками горючего, представляющие собой часто весьма токсичные и опасные как для человека, так и для окружающей среды компоненты, и относящиеся к I классу опасности в соответствии с «Федеральным классификационным каталогом отходов». То есть, обломки ОЧ РН являются, в соответствии с ГОСТ 30772-2001, опасными отходами производства и потребления.

Учитывая, что такого рода техногенный мусор разбрасывается на большую территорию, а его ликвидация, очевидно, требует достаточно сжатых сроков, наиболее целесообразным методом борьбы с последствиями является, в первую очередь, применение ГИС на основе воздушного мониторинга, позволяющих оперативно выявить (с определением координат) и впоследствии быстро ликвидировать фрагменты такого мусора. Такой геоинформационный мониторинг окружающей среды, в соответствии с Указом президента Российской Федерации от 08 июля 2011 г. № 899, относится к реализации критических технологий. То есть, оперативное дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) на основе воздушной съемки, а также соответствующая ей обработка, являются одной из наиболее важных научных задач информационного обеспечения (ИО) ГИС поиска техногенного мусора, непосредственно относящихся к реализации оперативных мер экологической безопасности районов, прилегающих к полигонам.

Информационное обеспечение ГИС с использованием воздушного мониторинга значительных площадей строится, как правило, на основе

применения оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), как традиционного и одного из основных компонентов аппаратного обеспечения. Съемка осуществляется с помощью воздушных носителей пилотируемого типа, а в настоящее время часто и с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [3] с передачей в реальном масштабе времени информации в виде геоизображений на наземный пункт приема. Там получаемые данные подвергаются предварительной цифровой обработке для устранения радиометрических и геометрических искажений, влияния атмосферы и т.д. [4].

Особое внимание заслуживает вопрос оперативности получения видеоданных. Так, с учетом весьма малых размеров большинства обломков (от десятков сантиметров до единиц метров), подлежащих поиску, а также их невысоких контрастов относительно окружающих фонов (в первую очередь – за счет частичного смешивания их сигнатур с фоном), мониторинг больших площадей на основе ОЭА приходится проводить с весьма высоким пространственным разрешением (единицы сантиметров). Получение таких разрешений обеспечивается небольшими высотами полета носителя, что в итоге, при облете больших площадей, приводит к крайне низкой производительности систем и значительным финансовым затратам на полетное время. Кроме того, последующая обработка больших объемов данных, получаемых при высоком пространственном разрешении, требует, в свою очередь, временных и финансовых затрат при часто низкой эффективности (вероятности решения задачи).

Для повышения эффективности ИО ГИС поиска техногенного мусора с использованием воздушной съемки, в настоящее время возможно применение сравнительно нового специального вида данных, - геоизображений, получаемых от средств дистанционной съемки видеоспектрального (ВС) типа. Их явное преимущество перед применением обычной, давно отработанной, ОЭА, в настоящее время до конца не обосновано, отсюда выбор разработчиков систем мониторинга склоняется к обычному подходу. Вместе с тем, геоинформационные данные дистанционного зондирования, полученные с помощью ВС приборов, в

настоящее время уже существующих и в отечественном варианте, при соответствующей обработке могут обеспечивать, в отличие от традиционного подхода, автоматизированное распознавание (классификацию) элементов поверхностей. То есть, результаты обработки данных ВС съемки являются в настоящее время специальным, весьма эффективным типом ИО ГИС.

В итоге процесс поиска объектов техногенного мусора ВС данных, сравнительно с данными оптико-электронной съемки (ОЭС), во-первых, существенно ускоряется. Во-вторых, использование таких данных существенно более чувствительно к обнаружению малозаметных и частично скрытых природным фоном фрагментов, что позволяет в разы снизить требуемое пространственное разрешение аппаратуры. В итоге производительность средства воздушного мониторинга повышается.

Вместе с тем, преимущество ВС средств построено на необходимости реализации измерительного режима функционирования, который, в свою очередь, требует решения ряда специфических проблем, связанных, во-первых, с приборной калибровкой получаемых данных, во-вторых, в связи с узостью регистрируемых спектральных линий и высокой вариабельностью освещенности, необходимостью специального, за счет обработки, повышения отношения сигнала к шуму (включая обоснованный пространственный и спектральный биннинг и компенсацию шумовых искажений), а также геометрической коррекции данных, в-третьих, выбора нормировки и реализуемых метрик спектральной классификации. То есть, на этапе специальной обработки, для автоматизированного выявления искомых объектов, системе с ВС аппаратурой требуется несколько большее время на обработку, в то время как визуальная обработка данных оператора ОЭС затрачивает существенно большее время на конечный визуальный анализ. Отсюда преимущества применения одного из двух рассматриваемых типов ИО ГИС поиска техногенного мусора становится не вполне очевидным и требует обоснованного сравнения.

Таким образом, для повышения качества ИО ГИС поиска на основе ВС съемки (ВСС) в целом необходимо провести исследования по решению ряда

специфических задач. Первая из них, в ходе первичной обработки данных, – реализация радиометрической калибровки данных в полевых условиях (без применения стационарной аппаратуры). Эта задача требует, в свою очередь, разработки нового, ранее не используемого подхода к оценке спектрального разрешения данных по диапазону спектральной чувствительности аппаратуры. Кроме того, первичная обработка данных требует обоснованного выбора метода атмосферной коррекции, работающей в том числе в условиях облачности; правильность такого выбора может быть построена лишь на оценке качества решения конечной тематической задачи. Отсюда – необходимость разработки реализующих моделей и методик решения этой задачи.

Вторая специфическая задача, - выбор и обоснование использования методик предварительной обработки данных для снижения шумовых искажений. В настоящее время известные подходы не позволяют их качественно применить к данным ВС съемки из-за искажения спектральной составляющей данных. Требуется проведение исследования по специальному использованию ранее разработанных методов, выбору основных параметров их применения, разработки моделей различного типа шумовых искажений. Поскольку применение ВС съемки аппаратурой сканирующего типа характеризуется наличием геометрических искажений данных в виде высокочастотных флуктуаций строк (в англоязычной литературе – «джиттера»), в рамках предварительной обработки необходима разработка 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, на ее основе, в «критических» условиях поиска, заранее выбирать метрики и пороги текущего сравнения сигнатур спектральных векторов снимка с опорными характеристиками. Верификация разработанной модели определяется путем

проведения натурных экспериментальных исследований по решению конечной задачи и сравнением их результатов с прогнозом. Эти исследования подтверждают также качество разработанных и используемых моделей и методик первичной и предварительной обработки данных.

Четвертая специфическая задача состоит в разработке модели и методики сравнения предложенного варианта оперативного ИО ГИС поиска на основе ВС съемки с традиционно используемым подходом с применением ОЭА. 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 отличие 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 съемки.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ и определить основные проблемы получения и обработки данных воздушной видеоспектральной съемки 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.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость 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 подтверждается:

– созданием 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;

– созданием 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;

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

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

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

– разработкой 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.

Научная новизна состоит в том, что впервые:

1. Разработана новая модель и методика оценки спектрального разрешения аппаратуры ВСС по результатам тестовой съемки, 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.

Достоверность результатов работы обеспечивается следующими соображениями:

1. Полученные результаты по оценке спектрального разрешения ВС аппаратуры вполне согласуются с теоретическими расчетами и заводскими измерениями изготовителей аппаратуры ВСС.

2. Качество применения разработанных и используемых моделей и методик первичной и предварительной обработки данных ВСС подтверждается данными реальной экспериментальной съемки в ходе их тематической обработки.

3. Там, где допустимо сопоставление получаемых результатов, они совпадают в пределах заявленной точности с прототипами.

Использование результатов диссертации.

Разработанное ПО 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-С» (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 в 3-х научно-исследовательских работах по специальной тематике в интересах МО РФ (НИР «Редактор», НИР «Верификация», НИР «Наблюдение»), где АО «КБ «Луч» являлся головным исполнителем.

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».

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

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 доклада в материалах всероссийских научно-технических конференций. В том числе, получены 7 свидетельств о регистрации в Государственном реестре программ.

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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 81 наименования. Основная часть работы содержит 151 страницу, 56 рисунков и 3 таблицы.

Автор выражает глубокую благодарность коллективу Санкт-Петербургского филиала АО «КБ «Луч» за совместную работу, а также заместителю директора филиала по НИОКР Плахотникову О.В. за организацию и проведение экспериментальных и теоретических исследований по теме работы, а также за поддержку проведения диссертационных исследований.

1 Основные особенности, проблемы получения и обработки данных воздушной видеоспектральной съемки для информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора

1.1 Анализ возможности применения дистанционного видеоспектрального зондирования для информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора

В последние десятилетия в РФ и за рубежом для решения народно-хозяйственных и задач военной разведки интенсивно разрабатывается аппаратура получения видовых спектральных данных на базе авиационных и космических носителей. В РФ аппаратурой видеоспектральной съемки («гиперспектральной» в англоязычной литературе) занимаются такие организации, как КМЗ (г.Красногорск), НПЦ «Реагент» (г.Москва), НПО «Лептон» (г.Зеленоград) и другие. За рубежом, по-видимому, видеоспектральными датчиками особенно интенсивно начали заниматься начиная с 80-х годов. Известны разработки аппаратуры ВСС в Финляндии, Канаде, Японии, Франции (обычно это совместные проекты с Германией и Англией), Швейцарии. К наиболее совершенным следует отнести авиационный комплекс «AVIRIS» (США) с аппаратурой в диапазоне 0.4-2.5 мкм. Видеоспектральная съемка используется также на беспилотном летательном аппарате (БЛА) «Predator» (США). Применяется такая аппаратура и на космических носителях - например, «HIPERION» (космический аппарат (КА) EO-1, США), КА «Ресурс-П» (РФ) (запущено несколько аппаратов), а также в Китае и других странах.

Предполагается установка аппаратуры ВСС и на перспективные отечественные БЛА [3], эффективные как в военном применении, так и в народном хозяйстве. Особую роль выполняет ВСС на авиационных носителях для обеспечения подспутниковой валидации, особенно для атмосферной коррекции (калибровки) результатов космической аппаратуры по пространственно протяженным, спектрально однородным полигонам, а также при получении и

формировании спектральных баз данных и непосредственно для ведения собственно спектральной разведки местности в интересах народного хозяйства.

Основным отличием ВС аппаратуры от многоспектральной, также получившей широкое распространение (например, в спутниковой метеорологии), является значительно большее количество спектральных линий (каналов) регистрации данных (десятки и сотни, тысяча и более), на которые разбивается диапазон чувствительности приемного оптико-электронного приемника. В качестве диспергатора (спектрального расщепителя входного оптического пучка) обычно используется призма (на пропускание), либо дифракционная решетка (на отражение).

Анализ режимов получения данных ВС съемки [5] показывает, что для ВС на базе авиационных носителей, в настоящее время, в наибольшей степени подходит режим “pushbroom”, который и используется примерно в $\frac{3}{4}$ всех реализованных комплексах спектрального дистанционного зондирования. В этом случае формирование снимка представляется в виде схемы, приведенной на рис.1.1. Здесь носитель аппаратуры путевой скоростью движения сканирует наблюдаемую местность оптическим объективом в направлении Y . Приемный поток фокусируется и поступает на ограничивающую щель, расположенную поперек направления движения X . Вырезанная часть входного потока проецируется на диспергатор (на рисунке – дифракционную решетку). Диспергатор пространственно разворачивает поток, в зависимости от длины волны, на матрицу приемников в направлении λ . В результате формируются радиометрические отсчеты в соответствии с дискретными значениями длин волн $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, (здесь n - общее число спектральных линий). За время одного скана на приемной матрице регистрируется совокупность спектральных образов поперечного направлению полета выреза. Эта совокупность считывается с приемной матрицы, образуя, таким образом, одну поперечную строку (вырезанную ограничивающей щелью) снимка, размноженную числом регистрируемых спектральных линий. Последовательность строк в ходе полета носителя составляет трехмерный «куб» данных, каждый пиксель двумерного

отображения которого представляет собой развертку по спектру, определяемый отражательной способностью элемента местности.

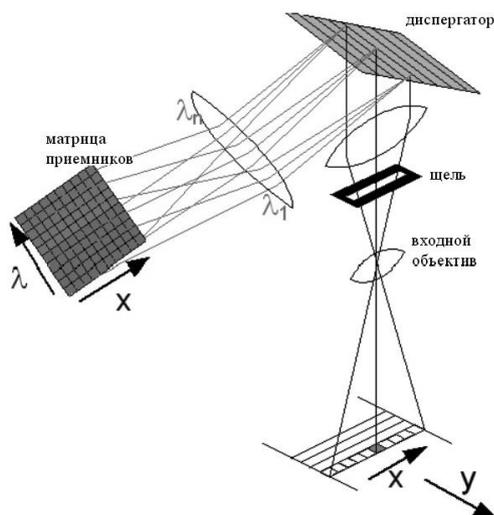


Рис. 1.1 - Схема формирования данных ВСС

После набора достаточного количества таких строк, определяемых требованиями продольного охвата местности, а чаще – размером памяти бортового накопителя, сформированный «куб» поступает на последующую обработку. Дискретизация зарегистрированных сигналов (их радиометрическое разрешение) определяется динамическим диапазоном записей и уровнем шума датчика. Так, в современных ВС обычный диапазон регистрируемых яркостей составляет $2^{12} - 2^{16}$ бит (полтора или два байта). Первичные значения сигналов записываются в виде целых без знака и представляют собой «цифровые отсчеты» (в англоязычной и отечественной литературе часто используется сокращение DN – «digital number»). Число регистрируемых линий определяется принятой дискретностью деления диапазона спектральной чувствительности, согласованным с требуемым спектральным разрешением (СР) прибора, в свою очередь определяемым корреляционной независимостью элементов регистрируемых спектров. Пространственное разрешение, как и для любой другой оптико-электронной системы, выбирается исходя из требований по решению тематической задачи с заданным показателем качества.

Особо важным достоинством и отличием использования результатов ВСС, применительно к решаемым задачам, является возможность выявления

(спектральной идентификации), по данным сравнительно невысокого пространственного разрешения, - объектов наблюдения низкого спектрального контраста на сложных фонах. Отсюда - возможность реализации ВС аппаратуры при сравнительно малых входных апертурах прибора. Использование такого рода данных позволяет не просто выявлять объекты низкого контраста, в том числе, после соответствующей обработки, визуальным путем, но и проводить автоматическую или автоматизированную спектральную идентификацию типов поверхностей вплоть до получения количественных оценок химического состава и концентрации отдельных компонентов почвы по данным обзора значительных площадей [6]. Это свойство, в сочетании с возможностями автоматизации «валовой» обработки, приводит к качественно новым результатам применения средств ВСС. Главной платой за возможность автоматизации процесса спектральной идентификации является принципиальная необходимость реализации *измерительного режима* получения и обработки данных.

На рис.1.2 схематически приведен пример полученного «куба». В каждой окрестности отдельного пикселя распределение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) идентифицируется (соотносится с конкретным типом материала наблюдаемой сцены путем его сравнением с образцом из базы данных) в соответствии с ходом выделенной спектральной кривой после проведения атмосферной коррекции для данных условий наблюдения.

То есть, каждый тип поверхности отражает подающее на него солнечное излучение в соответствии с его специфическими спектрально-отражательными свойствами. Регистрируя получаемые сигналы, можно, путем применения специальной обработки, получить образ спектральных контрастов сигналов там, где аппаратура панхроматического (или цветного - RGB) типа не может их выявить [5]. Возможно, например, выделение областей снимка, подозрительных на наличие на местности биваков или малозаметных фрагментов техногенного мусора.

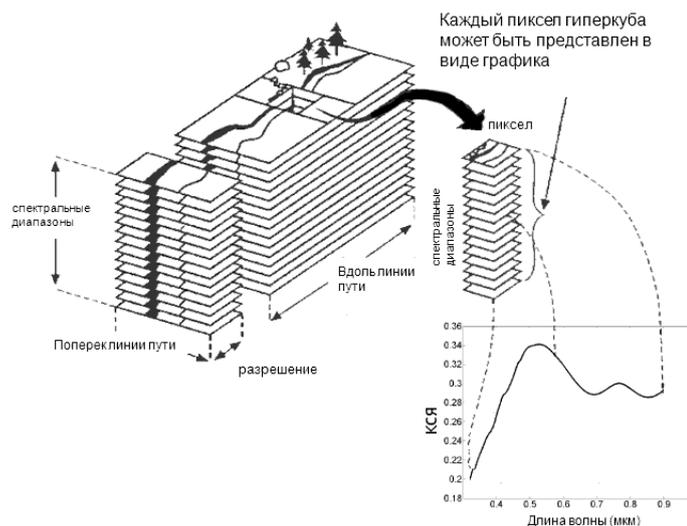


Рис. 1.2 - Представление данных ВСС

Сложность реализации комплекса обработки данных ВСС обусловлена формированием регистрируемых сигналов от местности или объектов наблюдения, во-первых, в результате падающего на них солнечного излучения, прошедшего весь слой атмосферы, обладающий спектрально селективными свойствами в зависимости от его состояния в момент съемки. Во-вторых, сигналы формируются как результат отражения этого излучения элементами поверхности, спектральные свойства которых надо выявить. В-третьих, отраженный поток испытывает влияние спектрально-селективных свойств трассы переноса от объекта к прибору, а также самого прибора. В итоге зарегистрированный сигнал невозможно напрямую сравнивать со спектральными кривыми, полученными в других условиях в качестве эталонов. Для компенсации этой зависимости служит весьма важный этап обработки, представляющий собой калибровку, атмосферную коррекцию и нормировку.

Поскольку результаты ВСС регистрируются в пределах малых спектральных зон, для повышения отношения сигнала к шуму применяются спектральный и пространственный биннинг, состоящие в соответствующем объединении спектральных или пространственных каналов. Кроме того, для этого требуется, в ходе предварительной обработки, применение специальных методов снижения шумовых искажений. Вопросы использования тех или иных мер

первичной и предварительной обработки зависят от конкретных типов решаемых задач и требуют специальных исследований.

Как известно из опыта использования данных ВСС, наиболее инвариантной к условиям наблюдения является сигнатура объекта, определяемая как коэффициент спектральной яркости (КСЯ) [7]. КСЯ – это фотометрическая функция, характеризующая отраженное поверхностью (объектом) солнечное излучение E_λ , как по длинам волн, так и по условиям наблюдения и освещения. Условия наблюдения определяются надирным углом сканирования (наблюдения) γ и азимутальным углом между вертикалами сканирования и источника освещения (Солнца) φ_S , который отсчитывается от направления на источник. Сам термин КСЯ общепринят, в основном, в русскоязычной литературе [7,8,9].

В общем случае КСЯ отражающего элемента $\rho_\lambda(\gamma, \varphi_S, E_\lambda)$, на данной длине волны λ , определено как отношение зарегистрированной прибором спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) исследуемой поверхности $B_\lambda(\gamma, \varphi_S, E_\lambda)$ к спектральной плотности энергетической яркости идеально рассеивающей эталонной поверхности $B_\lambda^{\text{ЭТ}}(E_\lambda)$ [7]:

$$\rho_\lambda(\gamma, \varphi_S, E_\lambda) = \frac{B_\lambda(\gamma, \varphi_S, E_\lambda)}{B_\lambda^{\text{ЭТ}}(E_\lambda)}. \quad (1.1)$$

Определение КСЯ предполагает строгое обеспечение одинаковых условий освещения исследуемой и эталонной поверхностей. СПЭЯ идеального эталона предполагается постоянной для любых значений углов γ , φ_S и зависит только от освещенности E_λ : $B_\lambda^{\text{ЭТ}}(E_\lambda) = E_\lambda/\pi$ [7].

Следует отметить, что как природные объекты, так и эталонные поверхности, применяемые при измерениях КСЯ, даже в лабораторных условиях по своим отражательным свойствам отличаются от диффузных рассеивателей, а учет неортоотропности этих эталонов является проблемой в теории и практике фотометрии. То есть, только при определенных условиях отражательные свойства некоторых поверхностей мало зависят от углов γ , φ_S .

С учетом решения практических задач дистанционных исследований наибольший интерес представляют сведения о КСЯ поверхностей при наблюдении вертикально вниз или при углах вблизи надирного направления визирования. Эти значения КСЯ объекта наблюдения весьма мало зависят от азимутального угла и определяются, в основном, только условиями освещения. По этой причине авиационную съемку проводят, преимущественно, на углах, близких к надирным. Смысл определения «мало зависят» означает, что в реальным ситуациях КСЯ все-таки переменна к конечной величине яркости элементов поверхности, однако эта зависимость во много раз меньше, чем оказываемое влияние условий освещения на собственно исходный принимаемый прибором сигнал яркости. Тем более что, как показывает практика, в значительной части случаев съемка производится в условиях частичной облачности, что характеризуется колебаниями яркости регистрируемых объектов.

Техногенный мусор, обусловленный разбросом элементов ОЧ РН, в общем случае, в силу его происхождения, имеет разнообразную форму (конфигурацию), кроме того, в большинстве случаев, в силу его возможно относительно небольших размеров, он может частично скрываться фоном – например, в высокой траве. Эти факты существенно затрудняют его визуальную идентификацию в ходе поиска по снимкам ОЭА, поскольку выявленные аномалии (по яркости) на общем фоне являются обезличенными (неизвестно, к каким объектам их отнести). При использовании данных ВСС постановка задачи существенно меняется. На рис.1.3 приведены фотоснимки реальных образцов обломков ОЧ, собранных на полигоне проведения пусков РН. Представлены фрагменты типа «шар», «дверь», «тест» - часть перегородки, «обшивка» бака. Как показывают эти снимки, в большинстве случаев их окраска идентична и различается, как правило, лишь степенью загрязненности.



Рис.1.3 – Фотоснимки образцов: «шар», «дверь», «тест», «обшивка бака»

На рис.1.4 представлены, измеренные наземным ручным прибором – спектро радиометром (типа Field Spec), КСЯ этих объектов техногенного мусора. Здесь же приводится КСЯ эталона, используемого в полевых условиях для проведения атмосферной коррекции получаемых данных и КСЯ зеленой травы как основного фона, на котором находятся искомые объекты.

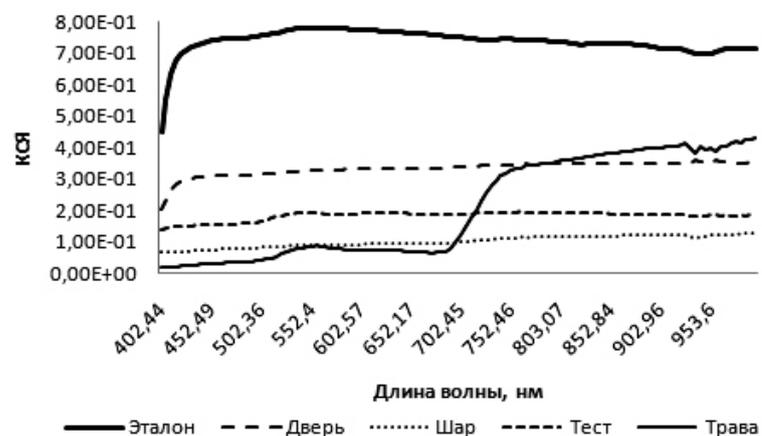


Рис.1.4 – Сигнатуры КСЯ объектов мусора, измеренные наземным прибором.

На рис.1.5 приведен фотоснимок, поясняющий проведение наземных измерений образцов (на примере получения сигнатуры эталона). Как следует из этого снимка, для получения корректных измерений КСЯ поверхностей оператор, помимо получения сигнала от собственно измеряемой поверхности, почти одновременно регистрирует сигнал от калибрующего эталона (находится на

треноге рядом оператором). Такой метод получения данных обусловлен, как это следует из вышеприведенного определения КСЯ и соотношения (1.1), необходимостью проведения атмосферной коррекции получаемого сигнала.



Рис.1.5 – Наземные измерения спектральных сигнатур объектов

После проведения атмосферной коррекции снимков – пересчета в КСЯ, возможно собственно спектральное распознавание. С этой целью используются, для конкретного типа решаемых тематических задач [5,6], различные метрики с целью отнесения каждого зарегистрированного спектрального вектора к тому или иному виду материала из априорного набора эталонов (базы данных (БД) спектральных характеристик).

В итоге можно сделать вывод о возможности применения дистанционного видеоспектрального зондирования для информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора, основой которого является спектральное распознавание поверхностей объектов техногенного мусора с использованием БД эталонных спектральных характеристик КСЯ.

1.2 Особенности построения аппаратуры видеоспектральной съемки, проблемы первичной и предварительной обработки данных

Из самого принципа получения данных ВСС ясно, что наиболее важными параметрами аппаратуры являются ее собственно спектральные свойства. А получаемые ВС аппаратурой сигнатурные кривые должны быть спектрально и радиометрически идентичны или близки к эталонным.

Для калибровки аппаратуры видимого и ближнего спектрального диапазона в области 0,35 – 2,5 мкм известен [10] и эксплуатируется специальный комплекс, позволяющий производить радиометрическую калибровку ВС. На рис.1.6 приведен внешний вид и схема его построения. Представленный рисунок свидетельствует о высокой сложности и стоимости установки. В полевых и воздушных условиях эксплуатации ВС, из-за воздействия среды эксплуатации (вибрации, пыль, перепады давления, температуры и т.д.), даже при отсутствии случайных воздействий, связанных с непреднамеренной тряской и ударами, аппаратуру ВСС необходимо спектрально и радиометрически переаттестовывать, как правило, уже после нескольких натурных съемок[11].

В реальности производители ВС аппаратуры применяют более простые средства внутренней калибровки. Так, образцы ВС аппаратуры, изготовленные на базе НПЦ «Реагент» для Санкт-Петербургского филиала АО «КБ «Луч», калибровались на более простой установке [12], параметры которой не вполне соответствовали требуемому качеству. Отсюда следует, что для текущего контроля основных параметров используемой аппаратуры необходима разработка методики, которая бы компенсировала указанные недостатки отладочного стенда и позволяла контролировать качество средств непосредственно в полевых условиях.



Рис.1.6 - Внешний вид и принципиальная схема измерительного комплекса оценки параметров аппаратуры ВСС

Предпосылки к решению подобного рода задачи можно почерпнуть уже из известных источников. В отечественной [9,10] и в зарубежной [15,16,17] литературе отмечено, что экспериментально-модельный анализ прохождения излучения через атмосферную среду является весьма актуальным в своих прикладных применениях. Значительный практический опыт, имеющийся в КБ «Луч» по эксплуатации и получению данных в ходе авиационной съемки [18], также убедительно свидетельствует о том, что системы ВСС требуют периодического тестового контроля непосредственно в полевых условиях.

После процедур получения, калибровки и атмосферной коррекции следуют этапы предварительной и тематической обработки данных.

При построении аппаратуры ВС с диспергаторами на основе призмы или дифракционной решетки в качестве приемных устройств (сенсоров), при реализации схемы «pushbroom», используются стандартные для обычных ОЭА матрицы приемников. Для ВС приборов часто применяются матрицы сенсоров двух типов: с зарядовой связью (англоязычная аббревиатура CCD) и металл -

оксидные полупроводниковые (CMOS). Технология CMOS построения фотоприемников *работает быстрее при изменении интенсивности света*. В силу этого CMOS технология является более применимой для ВС воздушной съемки и свойства таких матриц необходимо специально учитывать.

Для матричных приемных систем стандартного типа, сопряженных оптическими приборами с диспергаторами, характерным фактором является нелинейная дисперсия входного потока. Отсюда спектральное разрешение прибора существенно изменяется от начала спектрального диапазона к его концу. При этом обычно приборы строятся со спектральной избыточностью по разрешению применительно к большинству практических применений дистанционной съемки, что допускает реализацию нелинейного спектрального биннинга данных. Для повышения отношения сигнала к шуму возникает необходимость, помимо спектрального биннинга, применять еще и пространственный (обычно 2×2 элемента).

Также весьма важным моментом первичной обработки данных ВСС является необходимость непосредственной борьбы с шумовыми помехами. Отметим, что уровень *собственных шумов* современных сенсоров достаточно невелик и, как правило, не превышает значений в диапазоне от 20 до 50e- в пикселе за кадр. Вместе с тем, дробовый шум при этом почти на порядок больше собственного. Кроме того, для аппаратуры со сканированием характерен высокий уровень полосовых строчных (горизонтального направления) и полосовых столбцовых (вертикального направления) искажений [19]. На данных ВСС это особенно сказывается по той причине, что для их компенсации на этапе первичной обработки нельзя напрямую использовать методы, применяемые для панхроматических снимков, поскольку при этом привносятся весьма существенные искажения в спектральные характеристики [18].

Следующим характерной особенностью данных ВСС является наличие геометрических искажений, проявляемых в виде раздергивания строк. Обычно коррекцию таких искажений проводят по сопутствующим телеметрическим данным с борта носителя. Однако, используемые в ходе воздушной съемки GPS-

датчики навигационного класса, как правило, не соответствуют скорости формирования строк ВСС. Отсюда возникает необходимость в компенсации высокочастотного геометрического шума строк (в англоязычной литературе «джиттера»). Компенсация такого рода геометрических искажений совместно с геокодированием данных, является неотъемлемым видом обработки для конечного определения координат объектов поиска техногенного мусора и отображения в ГИС.

1.3 Свойства атмосферы, применение атмосферной модели MODTRAN для использования в моделях обработки данных видеоспектральной съемки

Одним из ключевых моментов при построении моделей и реализации методик обработки данных ВСС данных является учет влияния атмосферы. Роль атмосферы, особенно ее оптические и спектрально-селективные свойства в рассматриваемом диапазоне, описываются с помощью моделей.

Все существующие атмосферные модели построены на основе решения задачи переноса оптического излучения от Солнца на наземную поверхность. Более точно – с высоты верхней границы атмосферного слоя в 100 км. А также для расчета СПЭЯ отраженного от поверхности Земли сигнала, приходящего к прибору наблюдения. Подход, основанный на переносе оптического излучения, с разбиением свойств атмосферы по высотным слоям, положен в основу моделей, принятых в США. Это несколько поколений версий LOWTRAN, MODTRAN, 6S. На их основе разработаны методы собственно атмосферной коррекции данных дистанционного зондирования для конкретной аппаратуры, такие как ATREM, FLAASH, ACORN [20] и др.

Основные физические свойства определения расчетных значений спектральных плотностей энергетической яркости (СПЭЯ) на зрачке прибора таковы, что формирование конечного результата переотражения лучистых потоков от земной поверхности определяется тремя основными, в первом, аддитивном и достаточно хорошем приближении, составляющими. Это – прямое

солнечное излучение, отраженное от поверхности («прямая» составляющая), вторично переотраженное от поверхности, ранее отраженное от окружающего исследуемый участок подстилающей поверхности излучение, рассеянное, в основном, приземным слоем атмосферы («диффузная») и третья составляющая, - направленное в верхнюю полусферу излучение рассеянной составляющей в атмосфере на пути следования лучей («путевая»).

Составляющие суммарной яркости на апертуре прибора схематически представлены на рис.1.7.

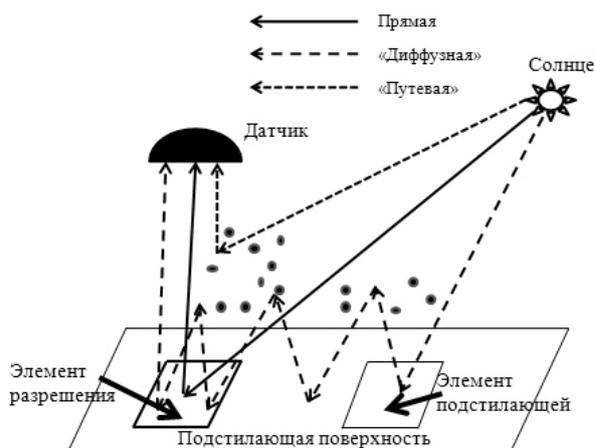


Рис.1.7 - Составляющие суммарной яркости на датчике

Важным достоинством широко используемой атмосферной модели MODTRAN (в последних версиях с индексом «5») является тот факт, что она, как показала практика, с достаточно высокой точностью решает широкий диапазон задач расчета отраженных от поверхности лучистых потоков.

При применении модели атмосферной коррекции к данным авиационной съемки прямое ее использование ограничено условием отсутствия облачности. Для съемки космическими датчиками это является естественным ограничением, в то же время, для широкого диапазона условий съемки, особенно с БЛА, присутствие облачности является естественным фактором. Поэтому для атмосферной коррекции данных авиационной съемки разработан и используется специальный, ниже рассмотренный метод, с применением наземных эталонов, попадающих в зону проведения съемки [21].

В ходе проведения расчета на основе модели в исходные данные закладываются такие параметры, как геометрия условий наблюдения, включающая, помимо отмеченных на рис.1.8 углов взаимной ориентации источника и потребителя, высоту положения датчика.

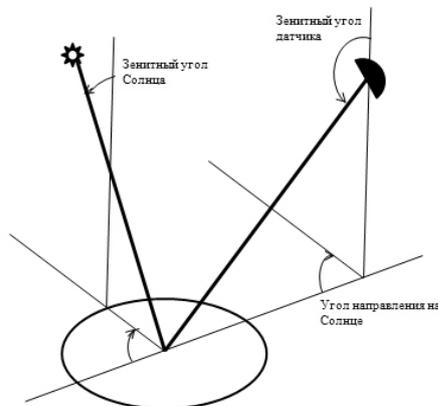


Рис.1.8 - Геометрия условий наблюдения

Солнечная облученность определяется датой, временем, широтой и долготой местности. Атмосфера задается сезоном, типом (среднеширотная, арктическая, зимняя, летняя), типом аэрозоля (континентальный, морской, городской или сельский), а также метеодальностью видимости (МДВ). Задаются режимы расчета – спектральный диапазон, спектральное разрешение и дискретность вывода расчетных данных.

Физика формирования поступающих на датчик составляющих яркостей такова, что они аддитивны и почти линейны относительно КСЯ разрешаемой поверхности. В ходе расчета в стандартном выводе программного пакета MODTRAN предусмотрено форматирование прямой и суммарной СПЭЯ, поступающей на апертуру. Свойства модели позволили разработать один из довольно простых методов расчета зависимостей СПЭЯ на апертуре прибора [20], который поясняется ниже.

Для определения СПЭЯ L на апертуре прибора (на каждой длине волны спектра) используется выражение, с достаточной для заданных целей точностью отражающее формализацию:

$$L = \frac{A\rho}{1-\theta a} + \frac{Ba}{1-\theta a} + L_0, \quad (1.2)$$

$$\text{где } A = Lp1(1 - \theta), \quad B = (L1 - Lp1 - L_0)(1 - \theta), \quad \theta = \frac{L1+L_0-2L05}{L1-L05}, \quad (1.3)$$

a - альbedo окружающей точку наблюдения на земле поверхности (подстилающей), ρ - текущее значение КСЯ пикселя (элемента наблюдаемой сцены на поверхности), θ - сферическое альbedo атмосферы, A, B - коэффициенты, учитывающие влияние «прямой» отраженной и «диффузной» составляющих вклада в суммарную яркость на апертуре датчика, L_0 - «путевая» составляющая. Здесь $Lp1$ - СПЭЯ, полученная на основе атмосферной модели «прямая» составляющая отражения при задании условия $a = \rho = 1$, $L1$ - суммарная составляющая при задании $a = \rho = 1$, $L05$ - суммарная составляющая при задании $a = \rho = 0,5$, L_0 - составляющая для $a = \rho = 0$.

Альbedo a окружающей наблюдаемый элемент поверхности с КСЯ= ρ , отличается тем, что он формируется как отношение всего отраженного в верхнюю полусферу потока к падающему потоку, также из всей верхней полусферы и определяется, в рассматриваемом случае, средним значением суммы КСЯ окружающих элементов подстилающей в некоторой окрестности. Обычно, для получения хорошей точности, достаточно усреднить все КСЯ элементов разрешения подстилающей вблизи точки наблюдения в радиусе не менее 0,5-1 км.

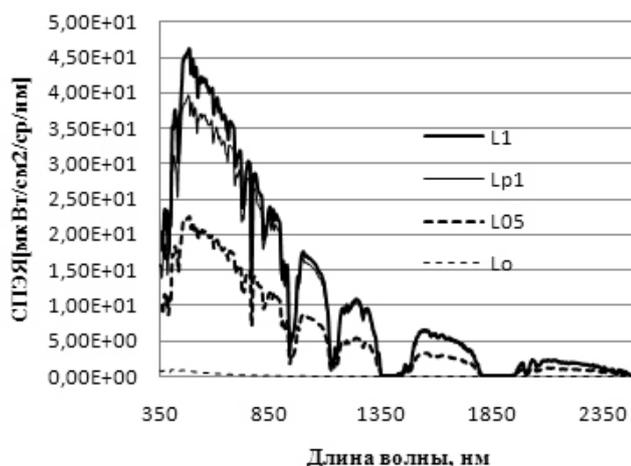


Рис.1.9 - Модельные величины СПЭЯ на апертуре прибора

Этот подход, основанный на вычисления СПЭЯ, отраженной от поверхности земли и дошедшей до апертуры прибора, для трех значений альbedo, позволяет, как отмечено выше в выражениях (1.2) - (1.3), оценить, для конкретных

условий наблюдения и состояния среды, вклад отдельных составляющих в конечную яркость. Пример расчетов представлен на рис.1.9.

В рассматриваемом частном случае, для построения имитационной модели, после вычисления вклада коэффициентов по методу «трех альбедо», путем модификации выражения (1.1), рассчитываются конкретные величины СПЭЯ уже от элементов наблюдаемой сцены на апертуре используемого прибора:

$$L(a_r, r_k) = \frac{A\rho_k}{1-\theta a_r} + \frac{B a_r}{1-\theta a_r} + L_0 . \quad (1.4)$$

Здесь подчеркнуто, что приведенное выражение зависит от альбедо окружения разрешаемого элемента a_r , на данной текущей длине волны, от КСЯ с индексом k . Принимая эту величину, можно, зная измеренное значение $L(a_r, \rho_k)$, получить оценку значения КСЯ разрешаемого элемента сцены ρ_k как решение уравнения (1.3). Именно такого рода процедуру, или близкую к ней, применяют для решения задачи атмосферной коррекции для оценки КСЯ элемента полученного снимка.

1.4 Возможности спектральной идентификации по данным видеоспектральной съемки

В связи с высокой вариабельностью тематических задач, решаемых средствами воздушной ВСС, применительно к каждому типу используемого датчика, условиям наблюдения и решаемой задаче, возможно использование широкого набора метрик спектральной идентификации. Как это было отмечено в [3], большое разнообразие практического применения, приводит к необходимости, в той или иной ситуации, использовать конкретные метрики.

Например, применительно к задачам, где необходимо проведение косвенного оценивания свойств того или иного участка местности на основе эталонных данных, характеризуемых смешением характеристик отдельных спектральных опор, наиболее адекватным методом идентификации, скорее всего, будет субпиксельный метод [21,22,23]. Для задач, связанных с необходимостью

поиска весьма малых объектов, соизмеримых по своим размерам с пространственным разрешением средства съемки (при большом спектральном смешивании), целесообразным будет применение наиболее чувствительных метрик типа разностно-векторной [24] или Теребижа [25], а также ее модификации [26].

При исследовании качества атмосферной коррекции возможно совместное применение декартовой и корреляционной метрик [19,18]. Отсюда следует, что для конкретных условий применения, типа применяемой первичной и предварительной обработки, а также особенностей используемого прибора, имеет смысл предварительно, априорно к применению конкретного построения аппаратуры и выбору рабочей метрики, оценить возможности выбора совокупности методик обработки. Сравнение важно проводить по конечному результату его применения, например, - по вероятности спектральной идентификации требуемых объектов поиска в заданном диапазоне условий наблюдения.

Особо отметим, что в большинстве случаев использование метрики сравнения требует априорного задания порога распознавания (порога отнесения конкретного спектрального вектора к объекту поиска). Такой априорный выбор желательно осуществлять на основе предварительной прогонки функционирования тракта получения и принятых методов обработки данных с помощью модели, адекватно отображающей весь процесс формирования решения. Очевидно, что такая возможность возникает только на основе разработки и создания имитационной модели функционирования средства, в том числе, при ее применении к решению рассматриваемой задачи построения ИО ГИС поиска техногенного мусора.

1.5 Схема оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе данных видеоспектральной съемки и постановка задач проведения исследований

Как заявлено, целью диссертационных исследований является повышение эффективности информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора в оперативном режиме. Для этого используется новый вид информационного обеспечения – на базе ВС аппаратуры наблюдения, работающей в измерительном режиме. Проведенный анализ по применению видеоспектральной съемки, а также особенности ее работы в измерительном режиме позволяют сформировать общую схему оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе данных ВСС, приведенную на рисунке 1.10 и выявить основные задачи, требующие проведения исследований.

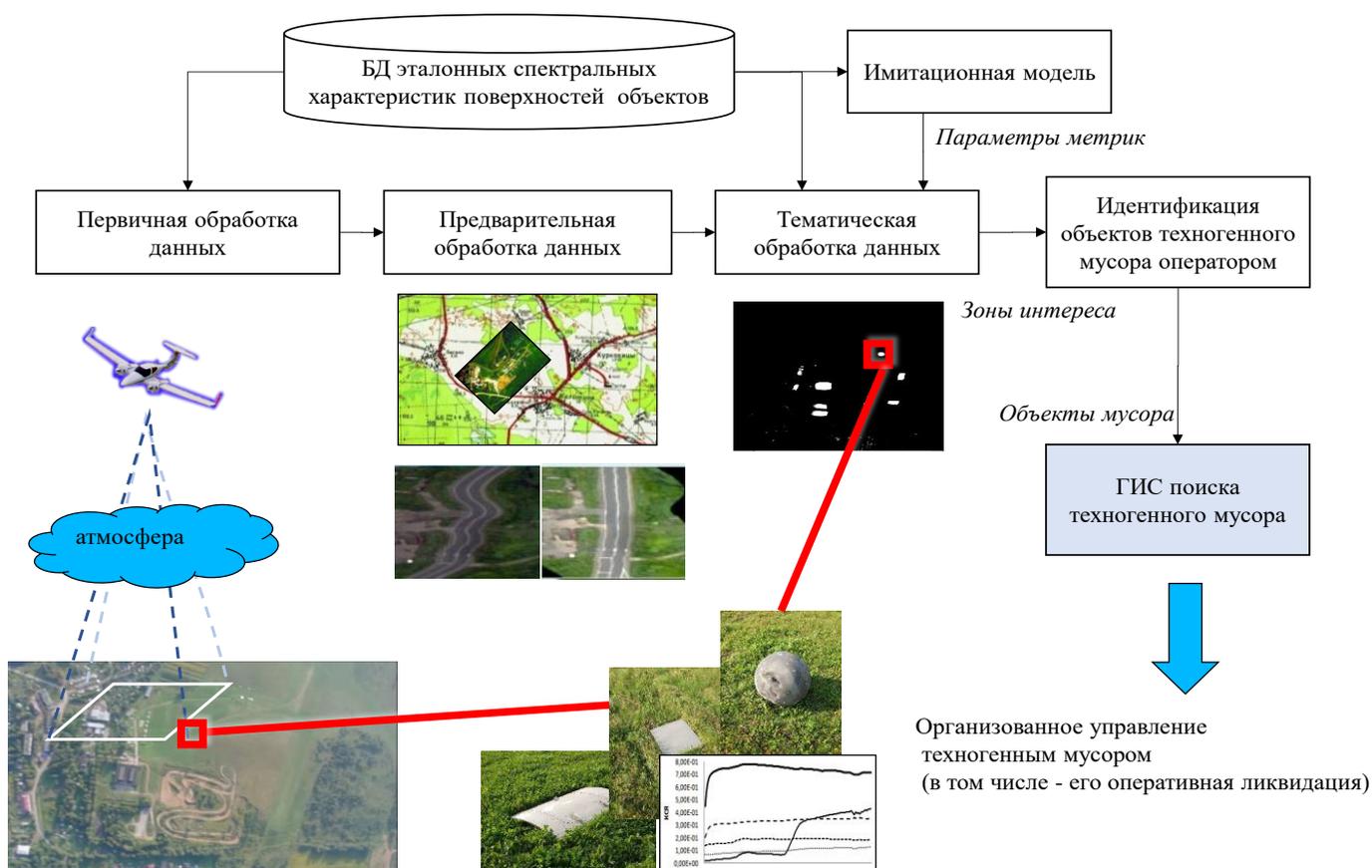


Рис.1.10 - Схема оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе данных ВСС

На схеме представлены следующие основные элементы:

- БД эталонных спектральных характеристик поверхностей объектов. БД формируется заблаговременно на объекты и эталоны, требующие классификации;
- этап первичной обработки данных, задача которого состоит в пересчете сигнальных данных ВСС в КСЯ без искажений;
- этап предварительной обработки данных, задача которого повысить радиометрическое и геометрическое качество исходных данных ВСС.
- этап тематической обработки, задача которого с высокой степенью вероятности обнаружить и выделить зоны интереса с искомыми объектами техногенного мусора;
- имитационная модель – позволяет априорно подобрать метрики и пороги тематической обработки для конкретных объектов техногенного мусора;
- этап идентификации объектов техногенного мусора выполняется оператором. При этом оперативность работы обеспечивается тем, что он просматривает только выделенные автоматически зоны интереса, в которых с большой вероятностью присутствуют объекты техногенного мусора;
- геоинформационная система поиска техногенного мусора, задача которой собирать и предоставлять возможность управления данными об обнаруженном в ходе аэросъёмки техногенном мусоре, в том числе для оперативной ликвидации загрязнений.

Как видно из представленной схемы – обработка данных ВСС является поэтапной и результат каждого этапа влияет на конечное качество решения задачи.

При первичной обработке остаются не решенными следующие вопросы:

- приборная радиометрическая калибровка в полевых условиях;
- атмосферная коррекция данных ВСС в условиях облачности.

При предварительной обработке специфика получения данных ВСС не позволяет использовать стандартные методы и требует адаптации существующих моделей и методик демпфирования шумовых искажений.

Для возможности априорно определять наиболее чувствительные метрики и параметры тематической обработки необходима разработка имитационной модели.

Для устранения ключевых проблемных вопросов оперативного ИО ГИС поиска техногенного мусора на основе ВСС целесообразно сформулировать следующие задачи на исследование:

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

- разработать модели и методики предварительной обработки данных ВСС, обеспечивающие повышение качества исходных данных без искажения спектральных составляющих сигналов;

- 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;

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

Представленные задачи, по главам, определяют основную структуру изложения материала диссертации.

1.6 Выводы

1. Анализ применения видеоспектральной съемки, построения аппаратуры видеоспектрального типа и спектральных характеристик образцов техногенного мусора в виде отделяющихся частей ракетносителей, позволяет предположить возможность эффективного решения задачи информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе ВСС в спектральном диапазоне 0,4 – 1,0 мкм.

2. Возможность эффективного решения задачи идентификации техногенного мусора обеспечивается измерительным режимом работы аппаратуры ВС типа, что в свою очередь требуют разработки специальных методик первичной, предварительной и тематической обработки.

3. Учет влияния атмосферы при моделировании условий наблюдения в процессе разработки методик обработки видеоспектральных данных целесообразно проводить с использованием атмосферной модели MODTRAN 5, которая достаточно доступна и обеспечивает требуемый уровень качества.

4. Для априорной оценки возможности выполнения задачи поиска техногенного мусора, а также выбора наиболее чувствительной метрики спектральной идентификации и ее порога, целесообразно создание имитационной модели функционирования аппаратуры ВСС.

2 Модели и методики первичной обработки данных видеоспектральной съемки

2.1 Радиометрическая калибровка данных аппаратуры с применением атмосферной модели MODTRAN, модель и методика оценки спектрального разрешения данных видеоспектральной съемки

Самым первым и очень важным этапом первичной обработки является приборная радиометрическая калибровка регистрируемых данных. Она состоит в преобразовании получаемых скалярных отсчетов DN, с учетом корректирующих коэффициентов, в метрологически размерные данные. Одновременно эта калибровка, что особенно важно [27], уточняет положение измеряемых спектральных линий, влияющих на конечную идентификацию, поскольку эти линии изначально далеко не всегда корректны (соответствуют эталонным). Кроме того, в ходе эксплуатации ВС аппаратуры возможны «уходы» радиометрии и положений центров спектральных линий. Для корректной радиометрической калибровки необходимо знание спектрального разрешения аппаратуры на всем интервале чувствительности.

В большинстве случаев спектральное разрешение используемых ВС воздушной съемки имеют «плавающее» спектральное разрешение, обычно от долей нанометра в начале шкалы чувствительности, до нескольких нанометров – в конце, поэтому достаточно точное количественное сопоставление результатов экспериментальной съемки, например, с известными приборами, не вполне корректно. Так, в начале шкалы – разрешение прибора существенно выше, чем у обычного серийного спектрорадиометра [11], а в середине и конце шкалы достаточно точное приведение на основе пересчета не позволяет это сделать достоверно из-за грубости его исходных отсчетов.

В связи с потенциальной предпосылкой возможности использования подхода, отмеченного в первой главе, предлагается один из специальных, «модельных» подходов, реализуемый в полевых условиях для текущего контроля качества используемой аппаратуры, который основан на применении

атмосферной модели [28]. Для этого, в качестве тестовой съемки, осуществляется съемка прибором свободного участка неба при известных условиях наблюдения (геометрии наблюдения и состояния атмосферы).

Ниже приведен пример приборной радиометрической калибровки данных видеоспектральной камеры «Реагент» на основе съемки участка неба с применением опорного спектрометра и модели. Съемка проводилась в 2013 году в Санкт-Петербурге, 21 марта, из окна здания, в 11.47 час по Гринвичу. В качестве сравнимого спектрометра применялся американский серийный прибор FieldSpec, функционирующий в диапазоне 325 – 1075 нм, который перекрывает диапазон исследуемого прибора с постоянным спектральным разрешением 3,5 нанометра (по паспорту). Зная условия наблюдения, на основе модели MODTRAN 5 [17] была рассчитана кривая СПЭЯ, соответствующая наблюдению неба вблизи солнечного диска. Результат расчета получен для принятой модели атмосферы – арктическая зимняя, аэрозоль – городской, МДВ= 5 км. Зенитный угол наблюдателя 62,38 гр., азимут луча визирования – 273 град относительно Солнца.

На рис.2.1 приведены кривые СПЭЯ: 1-я «FieldSpec» - получена спектрометрическим прибором, 2-я «ВСС 3.5нм» – результат съемки прибором, приведенный, на большей части спектральной характеристики, к разрешению 3.5 нм, 3-я «Модель 3.5 нм» - модельная кривая, рассчитанная с параметрами, отмеченными выше, применительно к разрешению 3.5нм.

Для сопоставимости данных результаты ВСС на основе кубического сплайна [29] были интерполированы на целые значения длин волн в нанометрах. Как выяснил сравнительный анализ на линиях поглощения, центры спектральных линий прибора были сдвинуты на 1 нм в сторону меньших значений длин волн, в то время как центры спектрометра сдвинуты около 2 нм в сторону больших значений (по паспорту прибора средний допустимый сдвиг 1,6 нм). В соответствии с проведенным исследованием реализована коррекция данных, в результате которой спектральные ходы фраунгоферовых линий поглощения приборов практически совпали с модельными значениями.

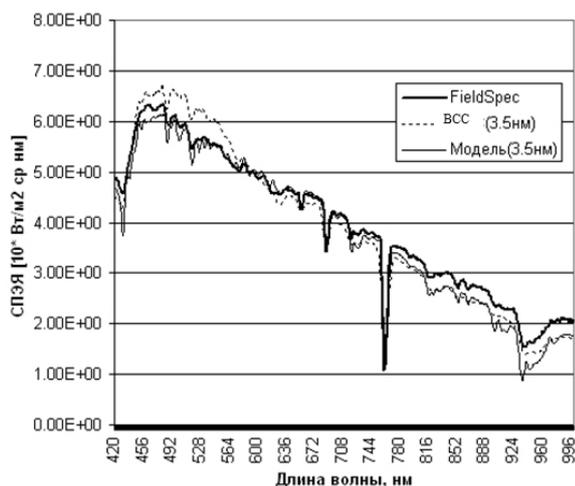


Рис.2.1 - Метрические сигналы, полученные в ходе тестовой съемки

Как это следует из представленного примера, в целом радиометрическое качество исследуемого видеоспектрометра удовлетворительное, за исключением начального участка в пределах 420-600 нм, где его данные могут быть легко скорректированы с учетом проведенных тестовых измерений. При этом модельное значение лежит между кривыми, полученными ВС и измерениями спектрометриком.

В качестве примера коррекции положений линий ВС на рис.2.2 приведены корректирующие значения сдвигов ВС, полученные путем сравнения, на этих линиях, приборных измерений с модельными. Как это следует из рисунка, коррекция сдвигов в диапазоне от 5 до 14 нм преимущественно начинается с 700 нм и носит пилообразный характер.

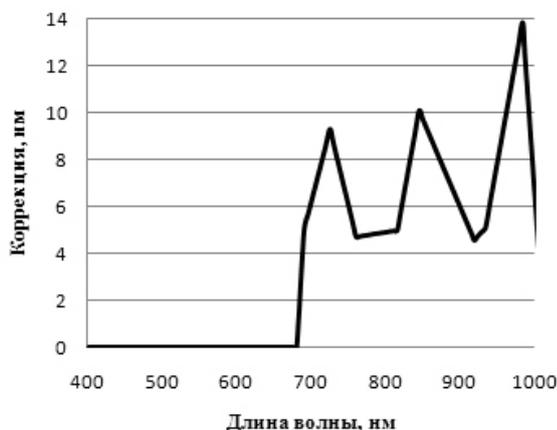


Рис.2.2 – Измеренные данные коррекции сдвигов спектра ВС

Коррекция сдвигов программно реализуется путем сглаживающей сплайновой интерполяции точек коррекции на узловые линии спектральной чувствительности прибора.

Помимо калибровки положения спектральных линий, специально была разработана описанная ниже методика *модельной оценки спектрального разрешения прибора* [28], необходимая для проведения достоверного сравнения спектрорадиометрических кривых (сравнивать кривые можно лишь при совпадении спектральных разрешений приборов и модели).

СР прибора в общем случае определяется возможностью разделения пучка света на входной щели на элементы изображения таким образом, чтобы размытый образ объекта с длиной волны λ_2 попадал на центр соседнего пикселя приемной матрицы образа с длиной волны λ_1 (критерий Релея). При этом обеспечивается СР (на данной длине волны) величиной в $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, ($\lambda_2 > \lambda_1$). Если доступ к полномасштабной стационарной установке затруднен или исключен, вместо уместного в ходе контрольных измерений монохроматического источника приходится регистрировать поток достаточно широкого спектра [12,36]. Так, для натриевой лампы – это 1 нм (на отдельных линиях в начале интервала чувствительности), а для используемого в НПЦ «Реагент» монохроматора – это 2,5 нм (на половинном уровне сигнала) [36]. Отсюда - значительные ошибки в получении конечных оценок характеристик прибора, особенно в тех случаях, когда исходная измеряемая величина существенно точнее.

Отметим, что в известных источниках не удается найти описание способа, который удовлетворяет отмеченным требованиям. Исходя из принципиальных свойств селективного поглощения воздушных масс, а также благодаря наличию в настоящее время атмосферной модели MODTRAN требуемого спектрального разрешения, представляется целесообразным использовать для калибровки приборов свойства фраунгоферовых линий на пути прохождения излучения от Солнца к поверхности Земли. Для этого регистрируются, в натуральных условиях, их оптические яркости путем углового сканирования (например, с помощью астроябии) ВС участка безоблачного неба (в отличие от радиометрической

калибровки, где более целесообразно регистрировать тестовый экран) с последующим сравнением спектральных свойств полученных сигналов с модельными данными.

Предлагаемый способ реализуется посредством сравнения результатов регистрации прибором формы спектра солнечного излучения на отдельных участках фраунгоферовых линий (с зафиксированными условиями наблюдения), с рядом модельных реализаций этой формы, полученных на основе модели. То есть, результат свертки дисперсионной аппаратной функции прибора с образом фраунгоферовой картины селективных поглощений атмосферы должен быть аналогичен модельному результату этой свертки для заданного СР. В итоге модельные результаты расчетов для каждого возможного уровня разрешения сравниваются с текущей приборной реализацией СПЭЯ на отдельном, характерном участке. Близость кривых может оцениваться либо на основе рассчитанных коэффициентов корреляции, либо по критерию их разностно-векторного минимума на этих участках.

Методическая реализация предлагаемого способа рассмотрена на примере обработки тестовых данных, полученных ВС НПЦ «Реагент» в 2013 году. Для объективного сравнения применимости предлагаемого подхода параллельно рассматриваются оценки спектрального разрешения серийно выпускаемого прибора – ручного спектрорадиометра FieldSpec (FS) (образец номер 1007964, изготовлен фирмой ASD в США в 2010г., диапазон 0,375 – 1,075 мкм) применительно к данным точечной съемки того же тестового участка. Спектрорадиометр FS обеспечивает, судя по паспортным данным, (его характеристика СР определена только для линии 700 нм) заведомо известное спектральное разрешение в 3,5 нм. Учтем, что, как это оговорено, точность центров регистрируемых линий выдержана с допустимой погрешностью ± 1 нм. Измерительная дискретность отсчетов – 1,6 нм, что вносит некоторые ошибки при пересчете на шаг в 1 нм (таков формат выдачи данных прибора) [11].

Рассматриваемый в данном случае сравниваемый прибор ВСС, по данным изготовителя, обеспечивает плавающее СР в диапазоне 420 – 1000 нм от 0,4 нм

(на линии 435 нм) в начале шкалы, до 5 нм (на линии 900 нм) – в конце, всего регистрируется 1002 канала. Для определения СР рассматриваемых приборов, в соответствии с предлагаемым подходом, были проведены параллельные (одновременные) натурные измерения спектра атмосферы (азимут Солнца 208 градусов) 21 марта в Санкт-Петербурге, в 11 часов 47 минут (по Гринвичу) по одному участку неба.

На основе атмосферной модели MODTRAN 5 [17] рассчитаны кривые СПЭЯ, соответствующие широте и долготе места в Санкт-Петербурге, дате и времени наблюдения. Принятая модель атмосферы – арктическая зимняя, аэрозоль – городской, МДВ – 5 км, зенитный угол наблюдателя – 62 градуса. Азимут наблюдателя соответствовал 273 градусам, высота Солнца – около 40 градусов. Рассчитанная на основе модели оптическая толщина атмосферы [28] на линии 550 нм составила величину 2,4.

Модельные расчеты были проведены для СР из ряда от 0,5 до 10 нм.

Для сопоставимости данных результаты ВСС на основе кубического сплайна были интерполированы на целые значения длин волн в нанометрах (то есть, приведены к равномерным узлам шкалы данных спектрорадиометра).

Подчеркнем, что только в ограниченных случаях удается получить высокое качество совпадения между используемой атмосферной моделью и данными реальных измерений аппаратурой (спектрорадиометром или ВС) [30]. Однако, как это также показано в [15,16], следует учесть, что при близости СР сравниваемых кривых, их высокочастотные составляющие практически совпадают. То есть, если одновременно вычестить из сравниваемых кривых низкочастотный тренд, обусловленный радиометрической разностью, близость между собой высокочастотных составляющих можно количественно оценить. Поэтому, как это было установлено экспериментально, для получения низкочастотной (сглаженной) составляющей каждой кривой, достаточно вычестить из нее значение (на участке анализа), аппроксимированное полиномом второй степени. Отсюда, для реализации методики, каждая кривая – приборная и модельная (последняя - применительно к каждому заданному СР),

предварительно подвергались выделению высокочастотного тренда на тестируемом участке как разности между исходными и сглаженными значениями кривых, полученных по методу наименьших квадратов в ходе аппроксимации. 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:

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i. \quad (2.1)$$

Математическая модель расчета низкочастотной составляющей \bar{x} , при аппроксимации данных полиномом $P - 1$ -го порядка по методу наименьших квадратов [31] (вариант фильтра Савицкого-Голая):

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j, \quad (2.2)$$

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 $P = 3$):

$$A = (B^T B)^{-1} B^T = \left\{ \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{array} \right\}, \quad B^T = \left\{ \begin{array}{cccc} 1 & 1 & \dots & 1 \\ t_1 & t_2 & \dots & t_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{t_1^{P-1}}{(P-1)!} & \frac{t_2^{P-1}}{(P-1)!} & \dots & \frac{t_N^{P-1}}{(P-1)!} \end{array} \right\}. \quad (2.3)$$

Как отмечено выше, на основе кубического сплайна приборная кривая предварительно была приведена к сетке спектральных линий с постоянным шагом в 1 нм, интервалы между положениями отсчетов взяты равномерные, то есть $t_i = -(i - 1)$. Кривая измерений спектрорадиометра, в исходном варианте, соответствует именно такой сетке (шаг 1 нм). Модельные расчеты строятся для единичного шага путем задания соответствующего параметра в модели MODTRAN 5.

Как показала практика, для успешной реализации способа целесообразно принять размер интервала $N = 60$ точек спектральных линий. В этом случае выборка формируется, для заранее заданной опорной спектральной точки, с

центром на этом интервале, заданном (2.2), – по 30 отсчетов вправо и влево от него.

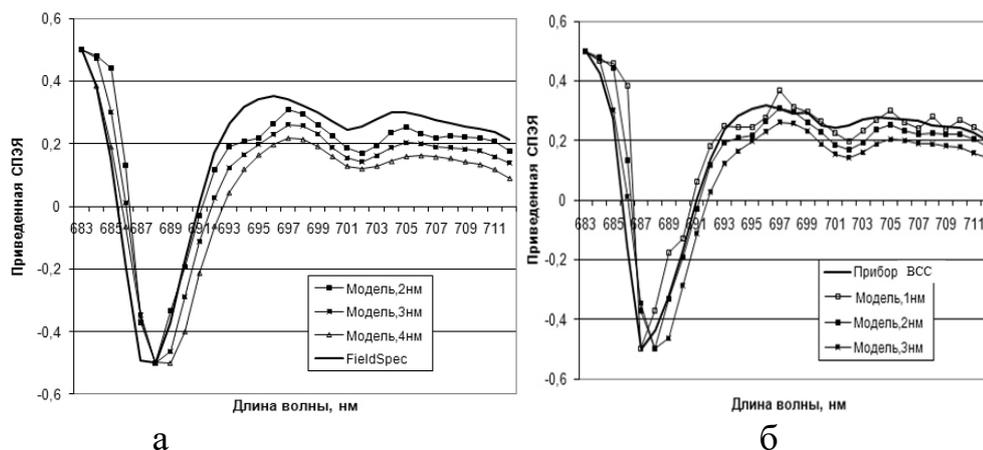


Рис.2.3 - Приведенные СПЭЯ исследуемых приборов и сопутствующих модельных разрешений на опорной линии 700 нм: а – применительно к FieldSpec, б – для прибора ВСС

После выделения высокочастотных трендов каждой кривой в соответствии с (2.1), они сравниваются между собой на участке оценки разрешения, как это показано на рис.2.3, в окрестности центральной точки 700 нм. При этом модельные данные для спектрорадиометра FieldSpec представлены ближайшими значениями СР к априорно известному паспортному значению в 3,5 нм (ряд из СР в 2, 3, 4 нм).

В ходе сравнения приборных измерений с модельными данными используется критерий корреляционной близости. В итоге вычисленные значения коэффициентов корреляции между измерениями и кривыми из модельного набора приведены на рис.2.4. Расчет проводится на основе выражения

$$\text{КОР}_j = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{x}_i^p - E^p)(\tilde{x}_{ij}^m - E_j^m)}{\sigma_p \sigma_{mj}}, \quad (2.4)$$

где $E^p = 1/N \sum_{i=1}^N \tilde{x}_i^p$ - среднее на интервале анализа высокочастотной составляющей измерений прибора (верхний индекс «р» - соответствует выбору приборов FS или ГСС), $E_j^m = 1/N \sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ij}^m$ - среднее высокочастотной составляющей на интервале анализа j-й модели и среднеквадратические

отклонения (СКО) высокочастотных выборок по каждой j -й модели: $\sigma_p = [1/(N - 1) \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_i^p - E^p)^2]^{1/2}$, $\sigma_{mj} = [1/(N - 1) \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_{ij}^m - E_j^m)^2]^{1/2}$.

Еще для одного критерия, - минимума СКО невязок между измеренными и модельными данными, оценка рассчитывалась в соответствии с выражением:

$$CKO_j = 1/(N - 1) \sqrt{\sum_{i=1}^N [(\tilde{x}_i^p - E^p) - (\tilde{x}_{ij}^m - E_j^m)]^2}. \quad (2.5)$$

Зависимости вычисленных коэффициентов корреляции и СКО невязок по выражениям (2.4) и (2.5) между приборными и модельными высокочастотными составляющими, на этой центральной линии, приведены ниже на рис.2.6 «а». При этом максимум коэффициента корреляции соответствует, для прибора FS, величине СР, близкой к 3 нм, в то время как минимум СКО невязок в этом случае лежит в промежутке между 3 и 3,5 нм. То есть, с максимальной ошибкой в 0,5 нм можно утверждать, что используемый подход позволяет определить величину СР спектрометра как совпадающую с заданным паспортным значением на линии 700 нм [32].

Применительно к прибору ВСС рассчитанные критериальные показатели почти такие же, что позволяет утверждать, что приборное СР ВС почти совпадает, на этой центральной линии, со СР используемого спектрометра.

Рассмотрим оценки СР для этих же приборов применительно к другой спектральной линии, - 587 нм. Близость измеренных и модельных кривых демонстрируется на рис.2.4.

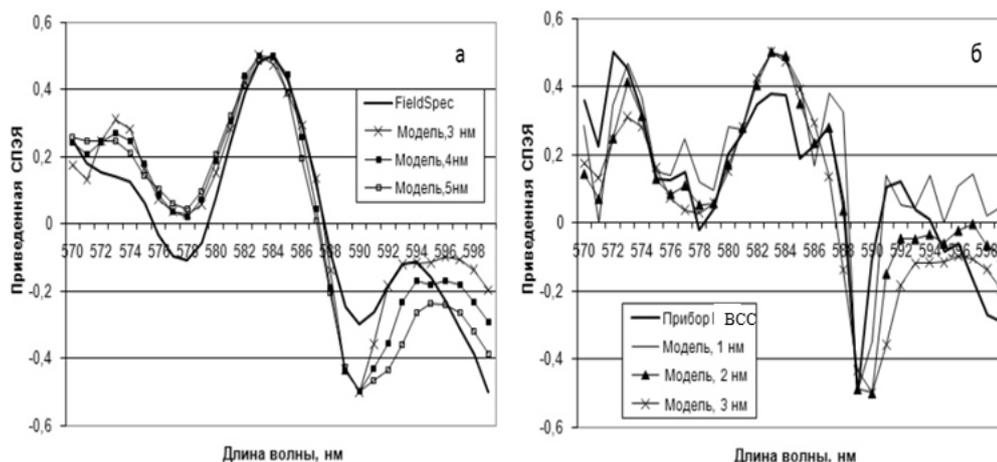


Рис.2.4 - Приведенные СПЭЯ исследуемых приборов и сопутствующих модельных разрешений на опорной линии 587 нм: а – применительно к FieldSpec, б – для прибора ВСС

Здесь, для данных ВСС, в отличие от результатов измерений спектрорадиометром, характерна существенно большая изрезанность на линиях поглощения, что, очевидно, свидетельствует о более высокой величине СР аппаратуры. Аналогичные вышерассмотренному случаю расчеты, представленные на рис.2.5 «б», подтверждают визуальный анализ.

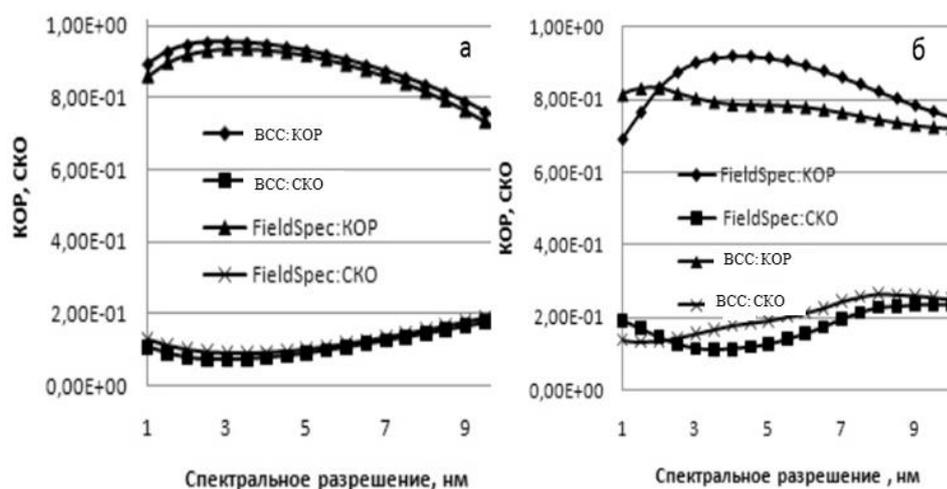


Рис.2.5 - Критериальные показатели по коэффициенту корреляции «КОР» и «СКО» схожести между данными в зависимости от спектральных разрешений модельных кривых: а – на центральной линии 700 нм, б – на центральной линии 583 нм

Здесь максимум коэффициента корреляции для аппаратуры FS лежит между модельными значениями СР 3,5 и 4 нм, а минимум СКО невязок – ближе к величине 3,5 нм. В то же время, максимум показателя корреляции для видеоспектрометра соответствует величине около 2 нм, а минимум СКО невязок – значению около 1,5 нм. Отсюда на основании полученных расчетов можно утверждать, что оценка СР ВС на линии 587 нм соответствует среднему значению 1,75 нм с ошибкой не более 0,5 нм.

Номинальная величина спектрального разрешения прибора FS, по паспортным данным, составляет около 3,5 нм во всем диапазоне чувствительности аппаратуры. То есть, с точностью до 0,5 нм, результат на этой спектральной линии, полученный рассмотренным методом, совпадает со значением, указанным в паспорте прибора. Отсюда также следует оценка точности используемого способа $\pm 0,5$ нм (сравнение оценок на основе двух критериев).

Номинальная величина СР ВС, измеренная в лабораторных условиях, составляет величину 2 нм, то есть, с невязкой в 0,25 нм, оценка предложенным способом совпадает со значением, измеренной изготовителем.

Принятая методика модельной оценки, описанная на вышеприведенном примере, использовалась и для оценки СР другой аппаратуры, также разработанной НПЦ «Реагент» (образец на призмном диспергаторе). СР этого ВС (расчетное значение) варьировалось от 1,6 нм (на линии около 400 нм) до 16 нм (на линии около 900 нм). В силу вышеозначенных выше проблем с эталонным монохроматором, как это было выяснено изготовителем [33], измеряемые величины СР на отдельных линиях шкалы сопровождалась существенными ошибками смещения относительно расчетных (при проектировании) значений. В 2014 –м году, с применением этой аппаратуры, был получен снимок участка безоблачного неба вблизи солнечного диска при высоте Солнца около 60 градусов, под Москвой. Подобранная по данным об условиях наблюдения модель расчета на основе MODTRAN 5 позволила получить близкие к условиям наблюдения результаты (максимальное различие между кривыми составило

величину около 20%). Принятая величина МДВ (на линии 550 нм) составила 23 км, рассчитанная на основе модели оптическая толщина атмосферы на этой линии – 0,92. На основе этих данных, с помощью приведенной методики, были получены оценочные значения СР прибора ВСС. Результаты расчетов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Сравнительные данные по оценке спектрального разрешения прибора (в нанометрах)

| Спектральная линия | Расчетная | Измеренная | Оценка методом | Невязка измерений | Невязка оценки |
|--------------------|-----------|------------|----------------|-------------------|----------------|
| 505 | 2,0 | 2,2 | 2,0 | 20% | 0% |
| 665 | 4,4 | 5,4 | 4,5 | 23% | 2,3% |
| 820 | 8,2 | 9,3 | 8,5 | 13% | 3,7% |
| 855 | 10,0 | 10,6 | 10,5 | 6% | 5% |

Как это следует из анализа представленных результатов, невязки измерений относительно расчетных значений (графа «расчетная») *при проектировании аппаратуры* достигают 20% и все смещенные величины направлены в одну сторону. Невязки оценок, полученные при расчетах предложенным способом (анализ проводился при сравнении с модельными кривыми, рассчитанными с шагом 0,5 нм), оказались существенно меньшими относительно невязок измерений. При этом на одной спектральной линии – около 515 нм, у изготовителя в качестве дополнительного источника имелась натриевая лампа со спектральным дублетом ширины не более 1 нм. Измеренные данные на этой длине волны соответствовали невязке, по отношению к расчетной величине, около 10%. Это и свидетельствует о смещенности оценок полученных значений из-за спектральной ширины тестового луча монохроматора.

В ходе измерений на основе принятой методики было получено, как это следует из таблицы, снижение невязки измерений относительно расчетного значения до 2%. Этот факт свидетельствует о том, что использование предложенного способа модельной оценки на основе тестовой съемки существенно ближе к реальным значениям. То есть, вышеприведенные оценки СР прибора, полученные в ходе применения предложенной методики, позволили

изготовителям утверждать, что оцененные таким образом значения параметров совпадают с ошибкой, по крайней мере, в 0,5 нм, с расчетными величинами, полученными при проектировании (на оцениваемых спектральных участках). Используемое параллельное сравнение применения предложенной методики к данным синхронной съемки аттестованным спектрорадиометром Field Spec и практически полное совпадение этих оценок с его паспортными данными, вполне объективно подтверждают обоснованность применения способа и возможность его использования в аппаратуре ВСС.

Зная СР на всем интервале чувствительности, возможно провести собственно расчет коррекционной кривой первичной радиометрической калибровки, которая состоит в расчете коэффициента отношения спектральных величин модельных данных к данным ВСС.

Таким образом, в целом методика радиометрической калибровки данных ВСС состоит из следующих этапов:

1. Осуществляется тестовая съемка безоблачного участка неба аппаратурой ВСС;

2. Рассчитываются модельные данные по атмосферной модели MODTRAN для соответствующих условий наблюдения;

3. Оценивается СР данных ВСС по предложенной выше методике;

4. Проводится расчет коррекционной кривой смещений центров линий, определяемых на основе сравнения тестовой съемки и модельных данных для соответствующих рассчитанных СР;

5. Проводится расчет коррекционной кривой первичной радиометрической калибровки, которая определяется коэффициентом отношения радиометрических величин модельных данных для соответствующих рассчитанных СР к данным ВСС;

6. Применяется коррекционная кривая смещений центров линий и калибровочной кривой к данным ВСС, получаемым непосредственно в результате дальнейшей воздушной съемки.

Обычно, одновременно, для контроля, проводится съемка того же участка с помощью калиброванного спектрорадиометра. В настоящее время используется прибор типа SR-3500 [11]. Как показывает практика, для «попадания в модель» достаточно, чтобы модельная кривая проходила достаточно близко к спектральным кривым, полученным спектрорадиометром, как это отмечено на рис.2.1. При этом модельные данные рассчитываются для спектрального разрешения, соответствующего данным применяемого спектрорадиометра.

На рис.2.6 приведены усредненная спектральная кривая ВСС по тестовой области, результаты модельного расчета и коррекционная кривая радиометрической калибровки.

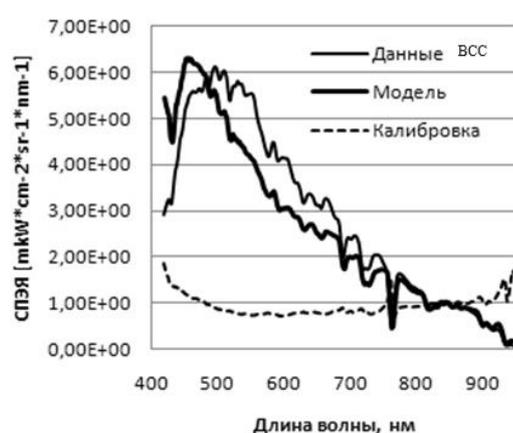


Рис.2.6 – Кривая ВСС по тестовой области, результаты модельного расчета и коррекционная кривая радиометрической калибровки

Рассчитанная кривая калибровки полностью приводит данные к модельным значениям.

Отметим, что, как это было установлено для решаемых задач поиска техногенного мусора, как правило, для успешной идентификации искомым объектов наблюдения достаточным является СР используемых данных в 5 нм [18]. По этой причине целесообразно, зная реальные параметры аппаратуры наблюдения, привести «плавающую» величину СР к значению 5 нм на всей шкале чувствительности. Такая процедура обычно называется спектральным «биннингом». Он состоит в скользящем по шкале чувствительности объединении спектральных каналов ВС с вычислением средней величины каждой

спектральной линии. Соответственно, для этого биннинга необходимо знание СР на всем интервале чувствительности прибора, а его реализацию целесообразно выполнять сразу после радиометрической калибровки.

2.2 Модель и методика атмосферной коррекции данных видеоспектральной съемки

После аппаратурной радиометрической калибровки данных, на наземном комплексе проводится атмосферная коррекция данных ВСС. Атмосферная коррекция результатов воздушной спектральной разведки в общем случае может проводиться как модельным способом, так и на основе опорного эталона. На основе модельного подхода методика чаще применяется при обработке космических данных [20,34,35], но его существенными недостатками является, во-первых, невозможность функционировать в присутствии облачности, во-вторых, существенной трудностью является «попадание в модель».

В большинстве случаев применения воздушной съемки с авиационных носителей, в том числе, с БЛА, целесообразно использовать атмосферную коррекцию по опорному эталону [19,21,22]. Этот подход, несмотря на свою несколько специфическую реализуемость, не ограничен сложностями использования модельного подхода. Однако он также связан с необходимостью преодоления отмеченного ниже недостатка.

Обозначим за ρ_{ij} - вычисляемую оценку КСЯ текущего ij пикселя снимка, за L_{ij} - СПЭЯ текущего пикселя, L_e - СПЭЯ калибрующего эталона, L_0 - СПЭЯ смещения, ρ_e - КСЯ калибрующего эталона, измеренное на земле, например, ручным спектрорадиометром. Здесь $i \in \{1, I\}$, $j \in \{1, J\}$, I, J - размеры спектральных образов «куба» по двум координатам в пикселях. Отметим, что, как уже оговаривалось выше, исходные текущие отсчеты DN снимка предварительно, на основе внутренней радиометрической калибровки, преобразуются в метрические значения СПЭЯ.

Атмосферная коррекция текущего пикселя полученного снимка на основе эталона строится на основе выражения [21,22]:

$$\rho_{ij} = \rho_e(L_{ij} - L_0) / (L_e - L_0). \quad (2.7)$$

Здесь зависимость участвующих величин от длины волны в (2.7) опущена, поскольку предполагается, что выражение записано для конкретной спектральной линии прибора.

Как это следует из (2.7), КСЯ корректирующего эталона должно быть заранее известно, а СПЭЯ эталона – взято из полученного снимка. То есть, эталонная поверхность должна непосредственно находиться в зоне проведения съемки, желательно, в непосредственной близости этой зоны.

Особо следует обратить внимание на СПЭЯ смещения L_0 . В общем случае [19] его значение определяет уровень сигнала, соответствующего нулевой величине КСЯ на каждой линии спектра. В идеальном варианте, для его определения, следует на полученном снимке выбрать некоторую поверхность, удовлетворяющую этому условию [19]. На практике такая поверхность на снимке крайне редко присутствует и в большинстве практических случаев [19,22] предлагается использовать для оценки L_0 - минимальную величину сигнала на каждой линии спектра, найденную по элементам зарегистрированного «куба» в зоне расположения эталона [22]:

$$L_0(\lambda) = \min_{ij}\{L_{ij}(\lambda)\}. \quad (2.8)$$

То есть, целесообразно, чтобы такого рода минимизация проводилась по пространственной области, не очень далеко (желательно, не далее 1000-1500 метров) отстоящей от объекта калибровки (более строго – в пределах неизменной величины альбедо).

Для определения КСЯ калибрующего эталона, как правило, используются наземные ручные спектро радиометры - приборы, измеряющие локальные спектры исследуемых поверхностей. В настоящей работе использовались данные спектро радиометров производства США трех типов: FieldSpec, FieldSpec-4, SR-3500. Поскольку измеренные значения КСЯ зависят от состояния атмосферы, их

измерения должны быть, по возможности, приближены к моменту проведения съемки. В этом случае вносимая погрешность в определение КСЯ элементов снимка минимальна.

Отметим, что использованный выбор эталонной поверхности сопряжен с выполнением некоторых условий. Так, для эталонной ткани должно быть отсутствие зеркалящей составляющей (поверхность не должна бликовать). Кроме того, поскольку направление визирования тестовой поверхности в процессе полета может быть произвольным по отношению к солнечной освещенности, ее рассеяние должно быть близким к ортотропному. Размеры эталона должны обеспечивать, по данным воздушной съемки, выборку измерений достаточного размера с учетом пространственного разрешения снимка (желательно хотя бы десятков пикселей, не смешанных с фоном). Целесообразно также, чтобы КСЯ этой поверхности был бы довольно большой величины (не ниже 0,6 - 0,8) и, желательно, близким к постоянному значению в пределах спектрального диапазона используемого прибора. В идеале, поскольку некоторая нелинейная зависимость от уровня освещенности для любого эталона всегда присутствует, следовало бы использовать не один, а несколько спектральных эталонов с разными уровнями КСЯ (от двух до шести).



Рис.2.7 - Расположение тестовых мир на асфальте (а) и фрагмент авиационного кадра ВСС на средней спектральной линии - (б).

Однако, как показала практика, в условиях реальной воздушной ВС съемки часто приходится ограничиться одним правильно выбранным эталоном [23]. Пример применения такого эталона демонстрируется на рис.2.7,

использованного в ходе проведения воздушной ВСС Санкт-Петербургским филиалом АО «КБ «Луч» в летний период, ВС типа «Реагент-3.0».

Для проведения атмосферной коррекции данных и ее тестирования на плоской асфальтовой площадке вблизи аэродрома были расстелены четыре спектральные миры. Это - эталонная мира (большая белая) и три дополнительные - «темная», «серая» и «светлая». Размер основной - эталонной, составлял 3*4 метра. Для других - контрольных мир, использовались окрашенные материалы из брезентовой ткани обычного типа. Все тестовые поверхности измерялись на земле спектрометриком типа Field Spec в совокупности точек по полю эталонов с шагом около 0,3 метра с последующим усреднением.

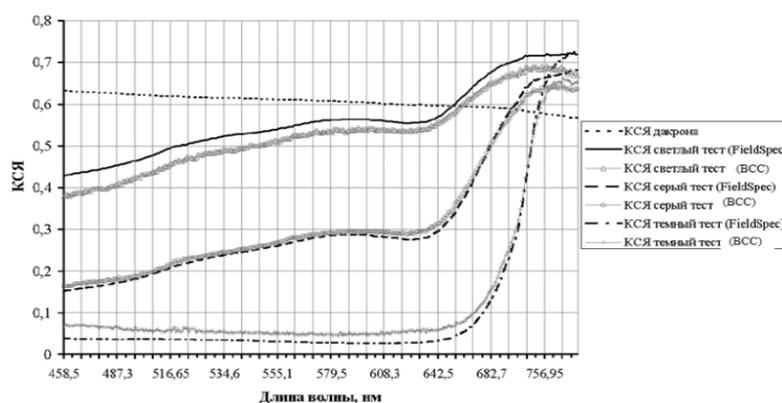


Рис.2.8 - КСЯ тестовых эталонов, измеренные наземным спектрометром Field Spec, совместно с пересчитанными кривыми калибровки данных ВСС

Собственно атмосферная коррекция полученного кадра проводилась по большому дакроновому эталону в соответствии с выражениями (2.7) - (2.8), а контроль ее правильности - по дополнительным мирам. На рис.2.8 приведены КСЯ тестовых эталонов («светлый», «серый» и «темный» тесты), измеренные как наземным спектрометриком Field Spec, так и полученные в ходе калибровки данных ВСС. Здесь же представлен спектральный ход калибрующего белого эталона (КСЯ дакрона), который, естественно, полностью совпадает с данными по наземному прибору.

Поскольку в ходе коррекции использовалась только одна эталонная мира и время наземных измерений (кривые Field Spec) несколько отличалось от времени проведения воздушной съемки, а также использовалось не вполне

идеальное смещение, полученное на основе (2.8), полного совпадения между этими измерениями нет. Тем не менее, что более важно, визуально можно констатировать, что формы измеренных двумя методами кривых весьма близки, что позволяет проводить спектральное различение элементов данных ВСС по опорам из базы данных (в ходе идентификации с нормировкой - путем сравнения формы).

Значительным достоинством используемой методики является ее универсальность: практически для любых условий (в облачную, безоблачную погоду), при любом состоянии атмосферы, что особенно важно для его применения, особенно, например, для комплексов с БЛА. К недостаткам следует отнести необходимость попадания в область съемки зоны расположения эталона, а также необходимость проведения периодических промеров этого эталона спектрорадиометром.

Следует особо отметить, что перед поступлением скорректированных данных на собственно идентификацию, то есть на сравнение каждого текущего измеренного спектра с набором опор из базы, каждый зарегистрированный спектр проходит нормировку. Условие нормировки (для рассматриваемого случая) [36]:

$$\sum_{i=0}^{m-1} \rho(\lambda_i) \Delta\lambda_i = 1, \quad (2.9)$$

где $\rho(\lambda_i), i = 0, \dots, m - 1$ – векторные элементы КСЯ для длин волн прибора в диапазоне от начальной линии λ_0 до λ_{m-1} - максимальной.

Применение предложенной методики атмосферной коррекции на основе эталона позволяет, как показывает рис.2.8, с ошибкой, не превышающей 5-10% (на всем спектральном участке) проводить атмосферную коррекцию данных ВСС без ограничений на состояние трассы переноса сигнала и освещенности.

Таким образом, предлагаемая методика атмосферной коррекции ВС данных состоит из следующих этапов:

1. Перед проведением аэросъемки на местности разворачивается эталон (эталонная поверхность), удовлетворяющий приведенным выше требованиям;

2. На начальном этапе полета осуществляется аэросъемка местности с захватом в поле зрения эталона и его окружения;

3. На данных ВСС выделяется область с присутствующим на ней эталоном в пределах окружения около 1,5-2 км и по области рассчитывается минимальный спектральный вектор L_o по выражению (2.7);

4. По образу эталона рассчитывается средний спектральный сигнал L_e ;

5. Для всех последующих данных воздушной ВСС по выражению (2.8) проводится пересчет каждого спектрального вектора снимка в КСЯ с учетом заранее известного значения КСЯ эталона ρ_e .

2.3 Выводы

1. Разработанная новая методика оперативной оценки спектрального разрешения аппаратуры обеспечивает точность 0,5 нм во всем диапазоне чувствительности, что позволяет реализовать радиометрическую калибровку данных ВСС с качеством, обеспечиваемым атмосферной моделью MODTRAN 5. Как показывают последующие экспериментальные результаты, такая точность вполне удовлетворяет решению конечной задачи поиска техногенного мусора.

2. Выбранная и предложенная для использования методика атмосферной коррекции ВС данных на основе внешнего эталона со специальным расчетом смещения обеспечивает, в пределах ошибки в 5-10% на всем спектральном участке, атмосферную коррекцию результатов съемки, что приводит, в конечном итоге, к успешному решению конечной задачи поиска техногенного мусора на основе ВС съемки.

3 Модели и методики предварительной обработки данных видеоспектральной съемки

3.1 Эмпирико-математическая модель формирования сигналов в видеоспектрометре и методика оценки случайных и полосовых шумовых искажений

Эмпирико - математическая модель формирования сигналов в тракте получения и обработки данных, а также моделирование случайных и полосовых искажений служит, во-первых, для использования в общей имитационной модели (ИМ) с целью исследования влияния возможных помех на снимках на конечные результаты решения тематических задач обнаружения техногенного мусора по данным ВСС. Во-вторых, она требуется для реализации методики оценки случайных и полосовых шумовых искажений по данным тестовой ВСС.

Для построения модели и оценки потенциальных возможностей разрабатываемой методики использовались реальные данные тестовой съёмки, приведенные на рис.3.1. Из условий проведения съемки известно, что она проходила под углом около 300 градусов к Солнцу (отсчет на Восток) и при зенитном угле положения прибора 80 градусов. На рисунке также показана тестовая область, использующаяся в оценке шумов, однородность которой позволяет с высокой уверенностью считать полезные сигналы по всей ее площади однородными (пространственно постоянными).

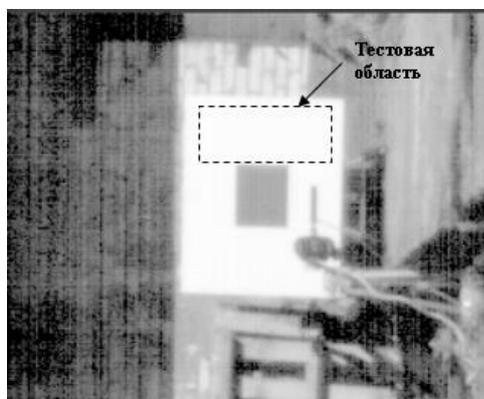


Рис.3.1 - Используемый тестовый фрагмент участка ВСС

Сигнал (в виде числа сигнальных зарядов) по каждому «элементарному» пространственно разрешаемому элементу прибора, на данной спектральной линии λ , численно определяется в соответствии с выражением [33,37]:

$$N(\lambda) = \frac{\tau_p \mu_m p t_n \delta^2}{h c} \sum_{k=1}^K \tau_o(\lambda_k) \mu(\lambda_k) L(\lambda_k) \Delta(\lambda_k), \quad (3.1)$$

где $h = 6.63 * 10^{-34}$ [Дж * сек] - постоянная Планка, $c = 3 * 10^8$ [м/сек] - скорость света, $p = \pi d^2 / 4 f_o^2$ [ср.], d – диаметр приемной апертуры, f_o - фокусное расстояние прибора, τ_p – коэффициент ограничения потока в отверстии коллимирующего объектива (на щели прибора), μ_m – квантовая эффективность приемной матрицы в максимуме характеристики, t_n [с] – время экспонирования, δ [м] – размер элемента приемной матрицы, $\tau_o(\lambda_k)$ – абсолютное пропускание оптики на длине волны разбиения каждого k -го спектрального интервала (по общему числу K его разбиений), $\mu(\lambda_k)$ – относительная спектральная квантовая эффективность приемной матрицы, λ_k – длина волны текущего спектрального разбиения, $\Delta(\lambda_k)$ – спектральный интервал текущего разбиения, $L(\lambda_k)$ – спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) элемента зондируемой поверхности (для модели – объекта или фона или их смеси) на длине волны текущего спектрального разбиения, - ниже, как правило, в единицах $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ср. нм.}}$.

Традиционно под термином «шум» понимают сигнал, не несущий полезной информации, который при этом искажает полезный сигнал. В рассматриваемом случае шум – это случайное отклонение яркости изображения от ее истинной величины [19].

Как и для любого другого оптико-электронного прибора с ФПУ видимого диапазона, выходной шум формируется совокупностью значительного количества факторов, достаточно подробно рассмотренных, например, в [38]. Однако, на практике, значительную часть его составляющих сложно рассчитать из-за отсутствия априорных данных о ряде специфических параметров функционирования аппаратуры. По этой причине используемую для априорной оценки качества средства ВСС модель будем строить комбинированным

(теоретико-эмпирическим) методом. Используется следующая общепринятая в мировой практике априорная оценка отношения сигнала к случайному шуму в оптико-электронной аппаратуре с приемными матрицами такого типа приборов, вида [33,39,40]:

$$\xi(\lambda) = \frac{N(\lambda)}{\sqrt{N(\lambda) + t_n * u_n + \sigma_{sh}^2}}, \quad (3.2)$$

где σ_{sh} - СКО собственного шума матрицы (как правило, оно известно по техническому паспорту матричного приемника), u_n – скорость образования темновых электронов $e^-/с$, t_n - время накопления в сек. В том случае, когда имеет место аппаратный пространственный биннинг, обычно, $2*2$, отношение сигнала к шуму возрастает в 2 раза.

Для используемой матрицы CMOSIS скорость образования темновых электронов является паспортной величиной и составляет $125 e^-/с$. Произведение этой величины на принятое в ходе получения данных на рис.3.1 время экспонирования в $0,02с$, составляет значение в 5 электрон. Выражение (3.2) является теоретическим и фактически уточняет для практического использования в реальной аппаратуре предельно достижимый предел. В идеале этот предел [41,42], задает максимально достижимое качество (отношение сигнала к шуму) любого фотоприемного устройства (ФПУ) используемого типа, как $\sqrt{N(\lambda)}$. Рассмотрим теперь расчет отношения сигнала к шуму в рассматриваемом варианте проведения теста для существующего прибора с известными параметрами и сравним его результаты с оценками на тесте.

Используемая в приборе приемная матрица типа CMOSIS CMV2000 имеет размер приемника $5,5*5,5$ мкм и глубину потенциальной ямы – 13500 электрон, темновой ток (по параметру «RMS») – 13 электрон [43]. Для расчетов сигнальных электронов, по выражению (3.1), необходимо знание пропускания всей оптической схемы прибора, в том числе, с учетом двух объективов – приемного и коллимирующего. Эта характеристика была измерена в производственных условиях [36]. В относительных единицах пропускание оптической части гиперспектрометра приведено на рис.3.2«а». Для получения абсолютного

пропускания $\tau_o(\lambda_k)$ следует эту зависимость умножить на измеренную величину в максимуме.

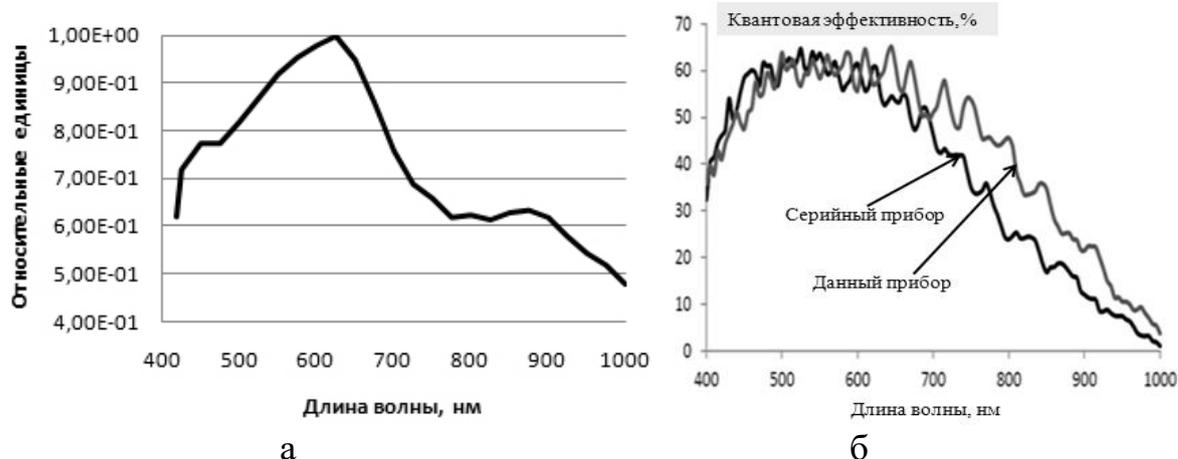


Рис.3.2 - Пропускание оптической части гиперспектрометра - а и абсолютная квантовая эффективность матрицы – б

Для расчетов также необходимо знание $\mu(\lambda_k)$ – относительной спектральной квантовой эффективности приемной матрицы и μ_m – квантовой эффективности приемной матрицы в максимуме характеристики. Абсолютная квантовая эффективность используемой приемной матрицы представлена [18] на рис.3.2«б». То есть, квантовая эффективность элементов каждой конкретной матрицы может отличаться на 20-25% в зависимости от длины волны.

В качестве оценки величины общих шумовых искажений на одной спектральной линии используем оценку среднеквадратического отклонения данных:

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{N*M-1} \sum_{i,j=1}^{N*M} (x_{i,j} - E)^2}, \quad (3.3)$$

где $x_{i,j}$ - текущее значение яркости на данной спектральной линии, а

$$E = \frac{1}{N*M} \sum_{i,j=1}^{N*M} x_{i,j} \quad (3.4)$$

– оценка математического ожидания - среднее значение яркостей пикселей на области размером $N * M$ (число строк на число столбцов), i, j – текущий номер строки и столбца (пикселя) этой области. Таким образом, оценка величины общих шумовых искажений на снимке, для данной спектральной линии, позволяет рассчитать зависимость $\sigma_o(\lambda_k)$, где λ_k - текущее значение длины волны

спектральной линии ВС из области чувствительности прибора. Как это следует из эксперимента, оценка математического ожидания $E(\lambda)$ на этой области по (3.3) является величиной постоянной на каждой спектральной линии. Оцененное значение этой величины в отчетах DN приведено на рис.3.3.

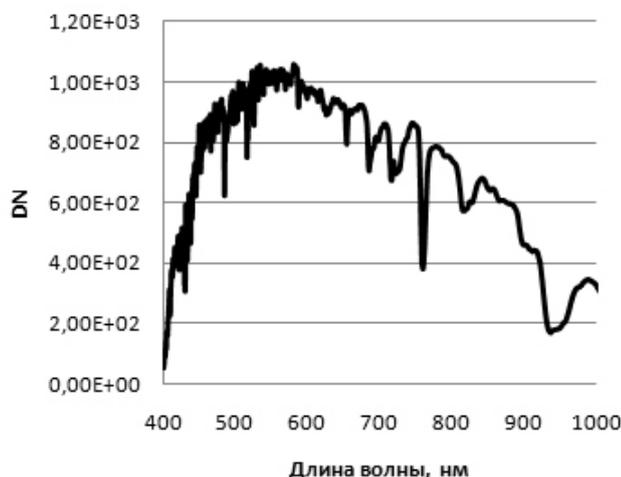


Рис.3.3- Рассчитанная оценка $E(\lambda)$

Подчеркнем, что оценка СКО сигнала яркости $\sigma_o(\lambda)$ по (3.3) представляет собой оценку общих шумовых искажений на тесте, равно как и характеристика отношения сигнала к шуму.

Как это следует из визуального анализа вышеприведенного рис.3.1, полосовые искажения сигналов («полосовые шумы» в соответствии с определением [19]) могут составлять весьма значительные уровни. По этой причине модель полосовых искажений является одной из обязательных частей общего формирования модели датчика ВСС и требует специального исследования.

Используя отмеченную однородность по яркости области на рассмотренном выше тесте, можно, без особой ошибки, рассчитать уровни полосовых искажений, присутствующих на рассматриваемой области. Эти величины могут быть оценены в соответствии с выражениями

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{i,j} - E_i)^2}, \quad \sigma_g = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (x_{i,j} - E_j)^2}, \quad (3.5)$$

$$\text{где } E_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i,j} - E), \quad E_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (x_{i,j} - E). \quad (3.6)$$

Выражения (3.5) определяют оценки СКО вертикального (v) и горизонтального (g) полосовых искажений соответственно, а выражения (3.6) определяют оценки МО вертикального (v) и горизонтального (g) полосовых искажений данных на тестовой области.

Используя вышеозначенные данные по приемной матрице и прибору, и учитывая условия проведения эксперимента, а также соответствующий расчет облученности тестового объекта на основе атмосферной модели, получим теоретически рассчитанные данные оценок сигнала к шуму (ОСШ) (более точно – это отношение оценки сигнала к оценке СКО шума) на основе (3.2). Тогда (теоретическая) оценка СКО случайного шума на выделенной области составит величину (на каждой спектральной линии прибора):

$$\sigma_e = E/\xi. \quad (3.7)$$

Если составляющие шумовых помех независимы, тогда вычисленное на основе измерений (и теоретического расчета случайного) СКО общих шумовых искажений (σ_r) определится как корень из суммы квадратов его составляющих:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_g^2 + \sigma_e^2}. \quad (3.8)$$

Сравним вычисленные таким образом значения на каждой спектральной линии с величиной оценки измеренного общих шумовых искажений на тестовом вырезе. На рис.3.4«а» приведены сопоставительные графики оценок вертикального, горизонтального, случайного (теоретическая оценка) и общего вида искажений σ_r . На рис.3.4«б» - приведены рассчитанная на основе (3.8) «теоретическая» оценка значений общего шума σ_r (тонкая линия) и «прямая» оценка общего уровня шумовых искажений σ_o на основе прямых измерений.

Наибольшая невязка между ними соответствует лишь левой части спектрального интервала чувствительности датчика (от 400 до 430 нм), что, скорее всего, обусловлено особо аномально низким отношением сигнала к шуму на этом участке (уровень сигнала особенно низкий).

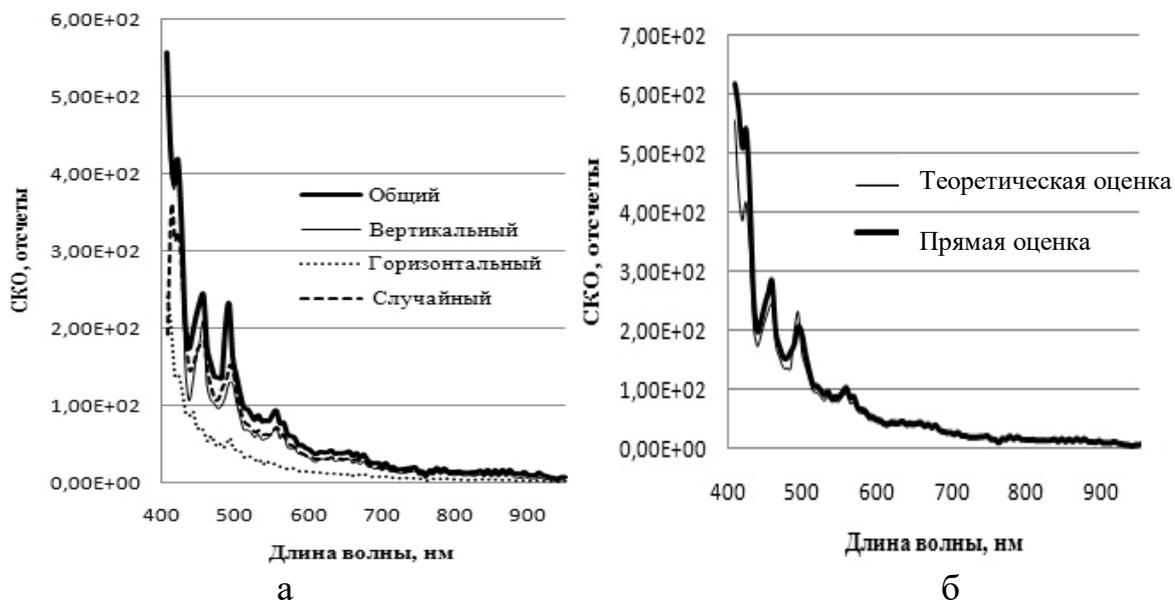


Рис.3.4 – Рассчитанные SKO составляющих шумовых искажений – (а) и сравнение «прямой» оценки SKO общего уровня шумовых искажений с его «теоретической» оценкой по совокупности составляющих – (б)

Приведенное на рисунке сравнение показывает близкое совпадение этих кривых со средней по спектру ошибкой около 5% и максимальной (на выбросах) в пределах 10%. Такого рода ошибка является статистически обусловленной. То есть, в первом приближении, в пределах допустимых ошибок, можно считать формирование вертикальных, горизонтальных искажений и случайных шумов статистически независимыми. Отсюда следует возможность их моделирования на основе независимых случайных распределений с учетом аддитивности отдельных составляющих.

Используем важную особенность системы обработки, состоящую в том, что атмосферная коррекция на каждой спектральной линии, в соответствии с выражением (2.7), почти линейна относительно исходных сигналов (с точностью до смещения). Используем это приближенное свойство для оценки SKO шумовых искажений, тогда соотношение (3.8), с точностью до возможной ошибки, можно считать выполняемым в пространстве КСЯ. При этом составляющие оценок шумовых искажений будут несколько смещенными в большую сторону на малых значениях сигналов.

Для численной оценки составляющих шумовых искажений используем отмеченное приближение (рассчитаем величины в пространстве КСЯ), тогда рассчитанные соотношения отношений сигнала к шуму по каждой составляющей на тестовом фрагменте будут соответствовать рис.3.5.

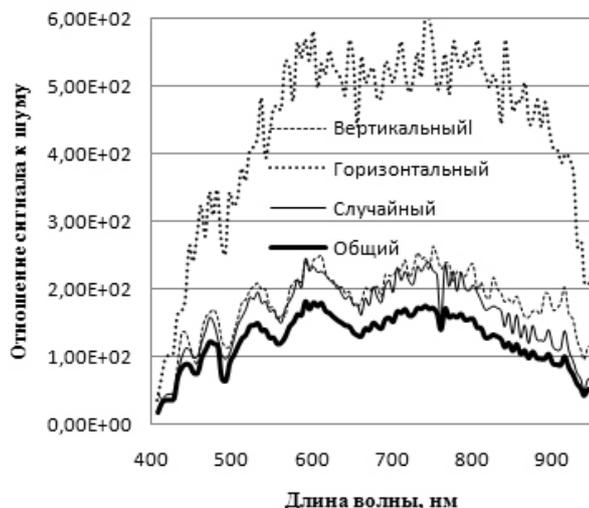


Рис.3.5 – Рассчитанные отношения сигнала к шуму для трех составляющих шумовых искажений в пространстве КСЯ

Из сравнения полученных результатов с чисто теоретической оценкой сигнала к случайному шуму, рассчитываемой на основе выражения (3.2) можно сделать следующие предположения. Полосовое искажение, в данном случае, в вертикальном направлении (обусловленные, в основном, неравномерностью рассасывания носителей заряда от строки к строке приемной матрицы в связи с экспонируемым сюжетом) можно, в первом приближении, считать совпадающим с уровнем дробового (фотонного) шума. Величину СКО, в данном случае, горизонтальной составляющей полосовых искажений, как это следует из рис.3.5, также отнесем к значению СКО случайного шума:

$$\sigma_v \cong \sigma_e, \sigma_g \cong 0,4\sigma_e. \quad (3.9)$$

Соотношения (3.9) можно использовать, в первом приближении, для генерации шумовых искажений в разрабатываемой ниже имитационной модели при формировании выходного образа снимка датчиком. При этом, соответственно, моделируется именно тот тип датчика и влияние того сюжета, на основе которого был получен тестовый снимок. Поэтому, в общем случае,

полностью адекватное воспроизведение полосовых искажений, в переносе на другой сюжет, невозможно. Можно лишь в первом приближении считать полученную модель соответствующей конкретным условиям наблюдения. Тем не менее, за отсутствием другого подхода, в настоящее время, может использоваться описанное приближение.

Это приближение замечательно тем, что для формирования всех типов, действующих в тракте получения данных, может быть использовано соотношение (3.9), где случайная составляющая шума может быть оценена с применением выражений (3.2) и (3.7). При этом особенно важно, что оценки сигнала в каждом элементе образа снимка моделируются с учетом конкретных значений освещенности, генерируемого, в свою очередь, на основе принятой атмосферной модели.

Собственно сама методика оценки уровней шумовых искажений сводится к выполнению вычислений на основе выражений (3.3)-(3.8) по однородному участку тестовой съемки эталона.

3.2 Модель и методика компенсации шумовых искажений данных видеоспектральной съемки

Известно [19], что применение традиционных методов борьбы с полосовыми искажениями, возникающими в связи с принципиальным использованием сканирования в ходе их формирования, часто приводит к значительным, неприемлемым для дальнейшей их обработки, искажениям. В связи с этим разработан специальный подход, позволяющий обеспечить решение задачи, не изменяя информационные свойства регистрируемых спектральных кривых. Он описан в [31,42,44] и его суть состоит в предварительном частотном пространственном разделении обрабатываемых данных, что не приводит в конечном итоге, к снижению их качества.

Широко известен традиционно и наиболее часто используемый для коррекции полосовых искажений способ «глобального линейного согласования детекторов» [19]. Он заключается в пересчете каждого значения яркости таким

образом, чтобы оценки двух первых случайных моментов каждой j -й «полосы» e_j, σ_j , которой принадлежит текущий элемент f_{ij} исходного скалярного снимка (на одной спектральной линии), «приводились» к желаемым значениям e_g, σ_g , например, рассчитанным для всего снимка в целом. Применительно к коррекции этот способ сводится к пересчету каждого исходного значения разрешаемого элемента яркости в соответствии с выражением:

$$s_{ij} = e_g + \sigma_g(f_{ij} - e_j) / \sigma_j, \quad (3.10)$$

где s_{ij}, f_{ij} - скорректированное и исходное значения яркости текущих элементов снимка. Тогда, если полученное изображение высокого качества и уровень модуляции «полосовым» шумом составляет величины до 10-20% шкалы, применение коррекции по выражению (3.10) приводит к снижению линейного разрешения [18].

Рассмотрим полученное изображение (на 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 «срезающего» параметра τ преобразование сглаживания (выделения низкочастотной составляющей) изображения, построенное на основе ранее приведенных выражений (2.1-2.3) так, что вторая, высокочастотная часть снимка, может быть представлена в виде

$$f_{ij}^v = f_{ij} - F[\tau^*, f_{ij}], \quad (3.11)$$

где $\tau = \tau^*$ - такое значение параметра фильтрующего скольжения, которое обеспечивает рациональный, в смысле, означенном ниже, выбор уровня среза, а в качестве F - модель фильтра (2.1-2.3) для двумерного случая. Тогда, используя (3.11), рассматриваемый алгоритм коррекции полосовых (в данном случае - строчных) искажений строится на основе выражения:

$$f_{ij}^{KOR} = F[\tau^*, f_{ij}] + \sigma_g^v(f_{ij}^v - e_j^v) / \sigma_j^v, \quad (3.12)$$

где, аналогично тому, что было принято выше, e_g^v, σ_g^v - желаемые среднее и оценка второго центрального момента, рассчитанные по его высокочастотной части, e_j^v, σ_j^v - те же величины, но рассчитанные для строк высокочастотного образа. То есть, преобразование (3.12) аналогично (3.10), но выполнено для коррекции только высокочастотного среза, содержащего большую часть модуляции регистрируемого сюжета полосовыми искажениями. Для конечного решения задачи коррекции необходимо определить параметр сглаживания, который, как правило, подбирается эмпирическим путем оператором и лежит для приборов рассматриваемого типа в интервале 5-9.

Использование практически любого оптимизированного известными подходами, фильтра (например, [45]) построено, как правило, на основе компромисса между случайной и динамической ошибками. В рассматриваемом случае такой подход не годится, поскольку наличие динамических ошибок, привносимых в ходе обработки по каждой спектральной составляющей «куба» данных ВСС, в конечном итоге приводит к потере основных соотношений в спектрах, что недопустимо. Отсюда следует эмпирический выбор используемого сглаживающего параметра таким образом, чтобы он обеспечивал практически полное отсутствие «сюжета» на отфильтрованных данных. При этом используется его минимальное значение на всех обрабатываемых линиях.

В рассматриваемом случае, исходя из практики применения фильтра [18], примем наиболее подходящее значение $\tau^* = 7$ (обеспечивает практическое отсутствие сюжета на отфильтрованном снимке на всех линиях). На его основе алгоритмом (3.12) проводилась обработка используемого выше тестового фрагмента (после его предварительного спектрального биннингования на интервал в 5 нм и атмосферной коррекции).

После демпфирования полосовых помех по «кубу» данных в КСЯ проводится фильтрация спектрального шума. Суть этой фильтрации состоит в сглаживании сигнатур по каждому спектральному вектору. Это сглаживание реализуется все тем же фильтром Савицкого-Голая (2.1-2.3). Параметр

скольжения по обрабатываемой последовательности выбирается тот же, что и при коррекции полосовых искажений.

Расчет отношений сигнала к шуму на снимке как результата последовательности выполнения спектрального биннинга на 5 нм, коррекции полосовых искажений и результата сглаживания спектрального шума приведен на рис.3.6. Здесь результирующая верхняя кривая показывает, что в ходе коррекции полосовых искажений отношение сигнала к шуму растет, на рассматриваемом тесте, примерно в 1,5 раза по отношению к предварительно биннингованным и атмосферно скорректированным данным. Дополнительная фильтрация спектрального шума позволяет повысить это отношение еще на 10-15 %. То есть, *потенциальные возможности* используемой методики обработки по снижению шумовых искажений сигнала (на рассматриваемом тесте) составляют величины от 1,5 до 1,8 раз.

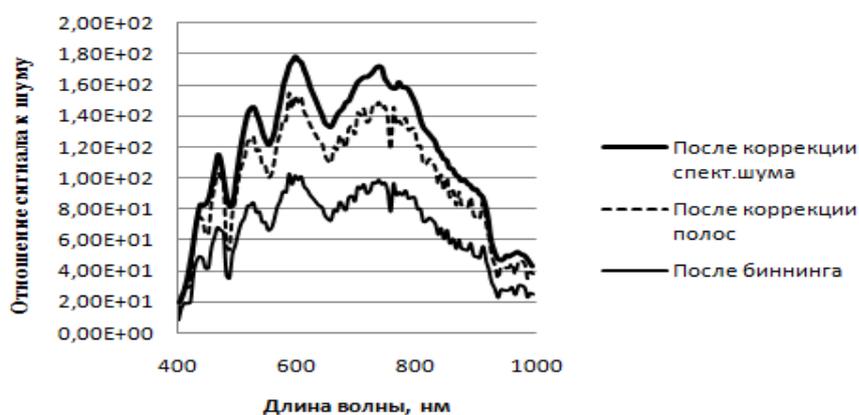


Рис.3.6 – Рассчитанные значения отношений сигнала к шуму на последовательных стадиях обработки данных ВСС применительно к тестовой области

При этом необходимо особо подчеркнуть, что представленный результат был получен именно по равномерно засвеченной области, обладающей, к тому же, весьма равномерной спектральной характеристикой (сигнатура эталона была приведена ранее на рис.1.4). В реальности получить столь высокое качество обработки на произвольном снимке, не всегда удастся.

Рассмотрим теперь непосредственное применение методики компенсации шумовых искажений для последующего решения, на полученных результатах, тематической задачи спектральной идентификации техногенного мусора.

На практике часто встречаются случаи объекты мусора, раскрашенные зеленой краской «под траву» в зелено-грязный цвет. Тогда спектральный контраст такого объекта с травяным покровом минимален. Чтобы оценить возможности разрабатываемых подходов к обработке, был проведен эксперимент по съемке такого рода объекта. Предельные сигнатуры разброса по измеренным значениям КСЯ по объекту и фону (травы), ручным спектрорадиометром, на данных исследуемой сцены приведены на рис.3.7.

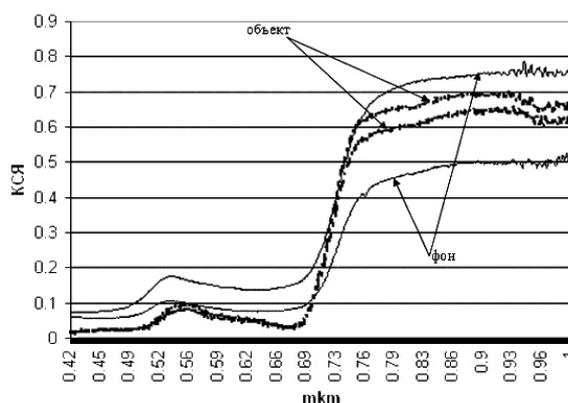


Рис.3.7 – Предельные характеристики КСЯ объекта и окружающего фона

Принятый уровень высокочастотного среза для обработки полосовых искажений на снимке соответствовал параметру $\tau=9$ (снимок отличался высоким уровнем полосовых помех). После проведения демпфирования полосовых помех в двух направлениях (при одном параметре), было использовано дополнительно сглаживание спектрального шума при значении параметра $\tau=7$. Для сравнения результатов совместного (последовательного) применения предложенных способов обработки на рис.3.8 приведены образы на 15-й спектральной линии снимка. Образы были получены как разности между исходными и обработанными данными.

Визуальный анализ показывает, во-первых, что демпфирование полосовых искажений, равно как и сглаживание спектральных шумов, практически не

затрагивает полезные сигналы (отсутствует сюжет на выделенных искажениях), во-вторых, используемая обработка не приводит к снижению пространственного разрешения данных. Эффективность используемых подходов к обработке подтверждается в ходе их применения к результатам тематической обработки, решающей главную задачу обнаружения техногенных загрязнений, что наглядно демонстрируется в следующей главе.

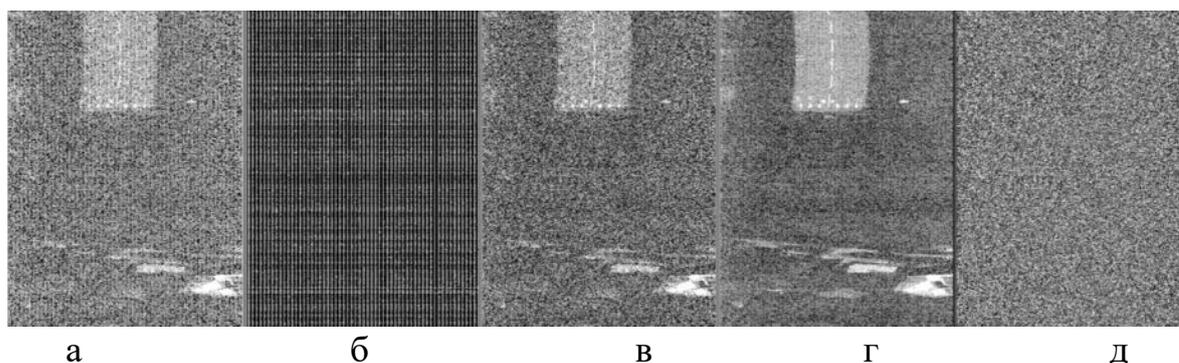


Рис.3.8 - Пример последовательной обработки на 15-й спектральной линии: а - исходный фрагмент, б - выделенные полосовые искажения, в - результат демпфирования полосовых искажений, г - результат демпфирования полосовых искажений и случайных шумов, д - выделенный случайный спектральный шум

Для иллюстрации возможностей применения предварительной обработки данных ВСС применительно к воздушной съемке объектов техногенного мусора типа ОЧ РН (фотообразы и сигнатуры образцов мусора и фона приведены в первой главе), на рис.3.9 приведен результат коррекции строчных и случайных искажений. Исходные данные были получены с воздушного носителя АН-2 по полигону «Кстово» (Ярославская область) в 2017 г. Использованный параметр сглаживающего скользящего фильтра в этом случае был принят равным $\tau=7$, как для коррекции полосовых искажений, так в ходе коррекции спектрального шума.

Анализ представленных результатов показывает, во-первых, что исходный снимок, по визуальному впечатлению, оказался почти «очищен» от полосовых искажений и случайных шумов, во-вторых, на выделенном образе искажений сюжет практически не просматривается. Исключение составляют лишь случайные сигналы вблизи границ присутствующих на сцене эталона и

нескольких особо ярких объектов. Как и в предыдущем случае, конечная оценка качества применения методики предварительной обработки объективно может быть определена только в ходе решения конечной задачи – спектральной идентификации образцов техногенного мусора, представленной в следующей главе.

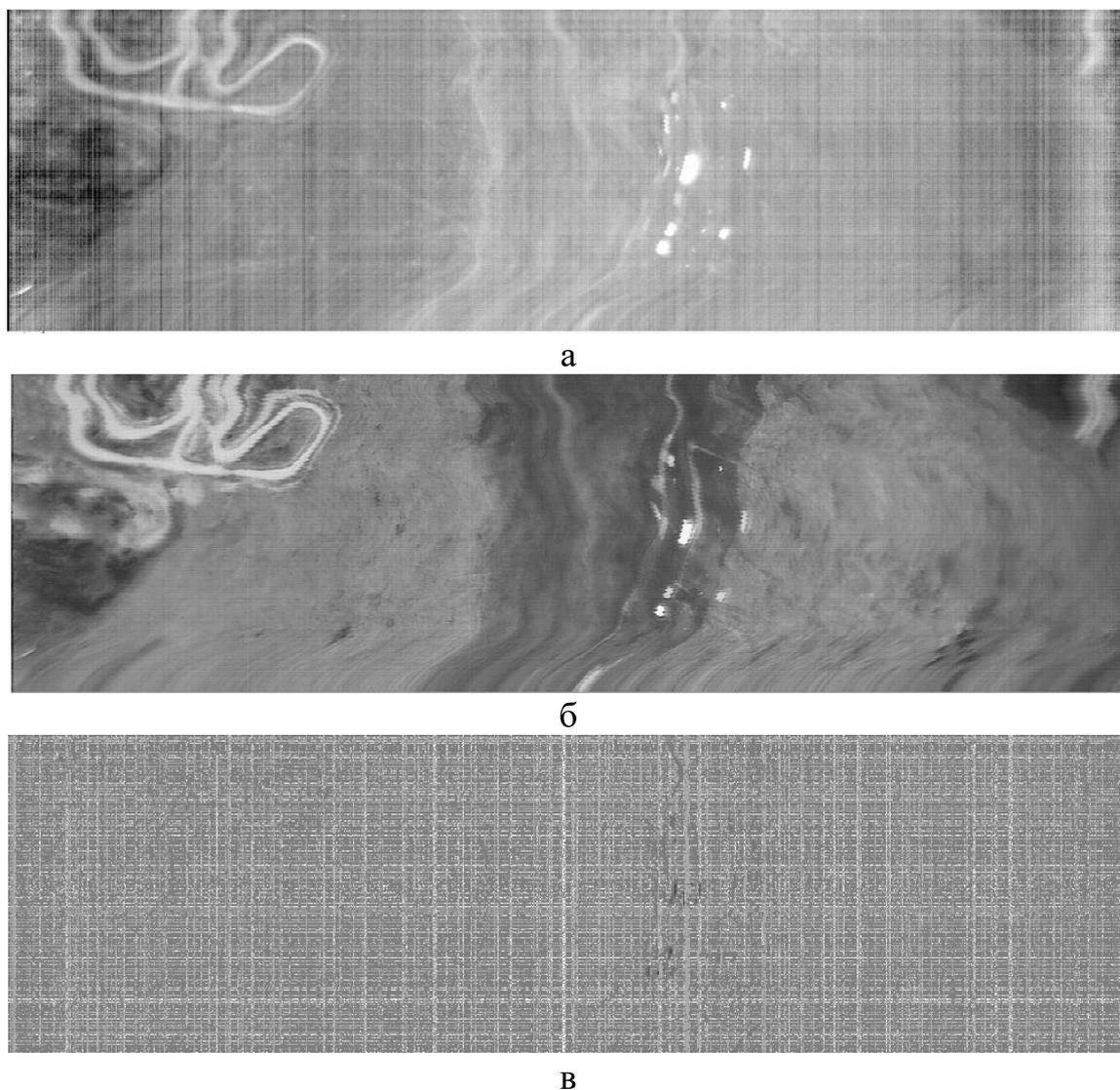


Рис.3.9 – Синтезированные цветные образы, в серых тонах, как результаты обработки данных по тестовому полигону с мусором: а - исходный снимок, б – образ после коррекции полосовых искажений и случайного шума, в – образ выделенных искажений в ходе обработки

Таким образом, методика компенсации шумовых искажений данных ВСС, отраженная в разработанном ПО, сводится к следующей последовательности:

1. Выделяется высокочастотная составляющая сигнала снимка на каждой спектральной линии на основе модифицированного фильтра Савицкого-Голая с заранее выбранным уровнем «среза».

2. На основе выражения (3.12) на каждой спектральной линии «куба» проводится демпфирование полосовых искажений, сначала в одном, а затем во поперечном направлении.

3. Скорректированный «куб» после компенсации полосовых искажений подвергается сглаживанию случайных шумов по каждому спектральному вектору фильтром Савицкого-Голая с заранее выбранным параметром сглаживания.

3.3 Методика комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных видеоспектральной съемки

Одним из основных этапов ИО ГИС поиска техногенного мусора является получение географических координат искомых объектов. Расчет обеспечивается общим геокодированием получаемых данных воздушной съемки и построен на фотограмметрических моделях зависимости координат отсчетов снимка с координатами на местности [46,47]. Однако из-за специфики получения данных ВСС стандартного подхода к задаче геокодирования в данном случае недостаточно, поэтому здесь рассматривается вариант геокодирования данных совместно с задачей геометрической коррекции.

Как уже отмечалось, для данных ВСС, получаемых с воздушных носителей аппаратурой сканирующего типа, характерным является наличие геометрических искажений. Они обусловлены, во-первых, тем, что не всегда аппаратура съемки установлена на гиросtabilизированную платформу, что приводит к появлению низкочастотных колебаний при формировании снимка (особенно на БЛА). Во-вторых, на регистрирующий прибор воздействуют вибрации корпуса носителя. Эти воздействия проявляются в виде высокочастотных сдвигов строк полученного снимка, не компенсируемых даже гиросtabilизатором. В работе [48] для коррекции таких искажений предлагается методика с использованием опорных линий, которые задаются оператором

вручную на основе эталона, что в нашем случае не приемлемо ввиду оперативного режима работы.

На рис.3.10 приведен пример данных ВСС для задачи поиска техногенного мусора с геометрическими искажениями и эталонного RGB-изображения того же участка местности, взятого со спутникового покрытия в ГИС. На снимке ВСС присутствуют геометрические искажения, хотя в процессе съемки почти отсутствовал ветер.

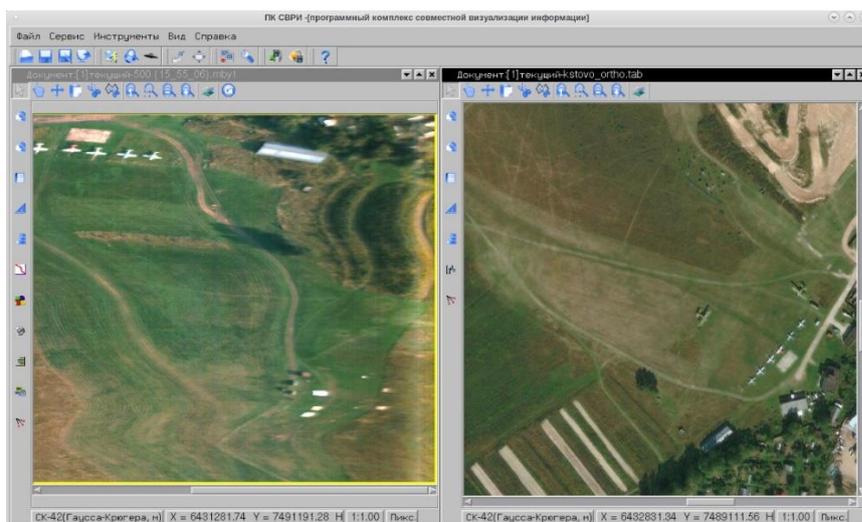


Рис.3.10 - Пример данных ВСС с геометрическими искажениями и эталонного RGB-изображения того же участка местности, взятого со спутникового покрытия в ГИС

Другим характерным примером влияния геометрических искажений является съемка при сильном воздействии ветра. На рис.3.11 - объект «дорога» в сравнении с эталонным RGB-изображением.

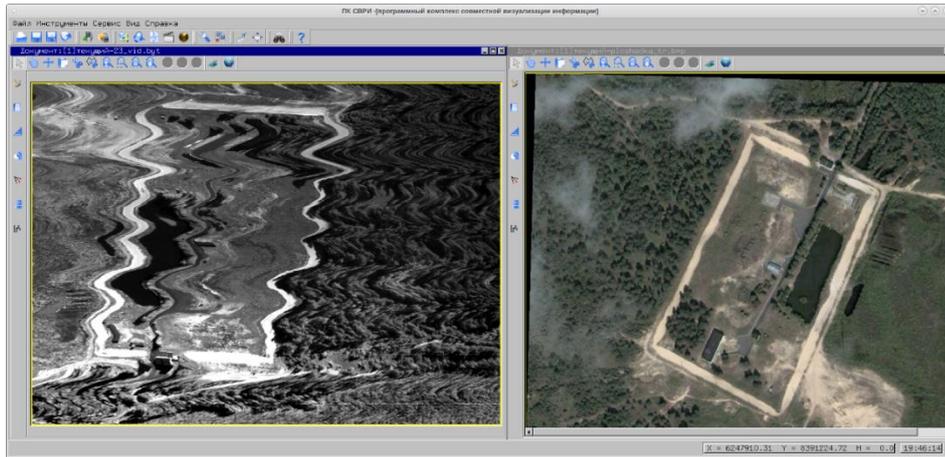


Рис.3.11 - Результат съемки объекта «дорога» при сильном ветре (слева) в сравнении с эталонным RGB-изображением (справа)

Стандартная коррекция по крену исходного снимка $f(i, j)$ ($i = 1, \dots, I$, I - размер по горизонтали, $j = 1, \dots, J$, J - размер по вертикали) на основе измерений сводится к получению преобразованного образа с помощью выражения:

$$g^N(i, j) = f(i - v^N(j), j), \quad (3.13)$$

где $v^N(j)$ - пересчитанное в сдвиг строк зарегистрированное угловое смещение (на каждой j –й строке) носителя по крену.

Однако средства, регистрирующие угловые колебания, не позволяют фиксировать данные на каждый элемент формируемой строки снимка, поскольку частота строк сканирующего прибора обычно существенно (в десятки раз) выше частоты регистрации. В результате, в ходе последующей корректировки на основе навигационных данных, остаточные некомпенсированные искажения не позволяют реализовать высокое качество конечного дешифрирования (объект «рассыпается»).

В научной литературе, посвященной борьбе с такого рода эффектом, именуемым «джиттером», используется межстроковый корреляционный анализ [49]. В обычном его варианте для каждой, начиная со второй, текущей строки j снимка вычисляется сумма квадрата разностей, сдвинутых на интервал $s = -S, S - 1, \dots, 0, 1, \dots, S$, (S –максимальная величина сдвига) значений яркости, принадлежащих соседним строкам $j - 1$ и j :

$$w(s, j) = \sum_{k=1}^K [f(k, j - 1) - f(k + s, j)]^2, \quad (3.14)$$

где K - априорно выбранный объем числа элементов разностно-корреляционной выборки на сроке (в пределах 200-400 элементов).

По вычисленной для каждой строки совокупности $w(s, j)$ определяется текущий сдвиг, соответствующий минимальному на этой совокупности значению:

$$v^K(j) = \min_s \{w(s, j)\}. \quad (3.15)$$

В ходе коррекции возмущений исходного снимка генерируется новый образ, каждая строка которого сдвинута на взятый с обратным знаком индекс, определяемый в ходе расчетной процедуры:

$$g^K(i, j) = f(i - v^K(j), j), \quad (3.16)$$

где число строк скорректированного образа осталось исходным, а число столбцов изменилось: $i = 1, \dots, I + v^K(-S) + v^K(+S)$, где $v^K(-S), v^K(+S)$ - максимальные, вычисленные на основе (3.16), значения сдвигов на снимке, отсчитываемые влево и вправо соответственно полученному знаку смещения.

В явном виде такой подход позволяет корректировать сравнительно небольшие сдвиги между строками, обычно в пределах единиц элементов разрешения. Если же, как в рассматриваемом случае, попытаться использовать этот аппарат для коррекции больших искажений, тем более при значительной длине снимка (тысячи строк), корреляционный анализ сдвигов между соседними строками приводит к достаточно быстрому «уходу» корректирующих индексов от их реального положения в ту или иную сторону, зависящую от типа регистрируемого сюжета. Такой систематический «уход» (вычисленные $v^K(-S), v^K(+S)$) может, в отдельных случаях, составлять величины до половины и более значений ширины зарегистрированного снимка. Отсюда такая компенсация «джиттера» для коррекции возмущений, вызванными колебаниями носителя по крену, как правило, не приводит к успешному результату (за исключением частных случаев).

Вместе с тем, его применение возможно путем совместной коррекции на основе зарегистрированной информации по углу, с данными корреляционного анализа [49]. Суть подхода состоит в комбинации информации о высокочастотной

составляющей коррекции, получаемой на основе корреляционного анализа взаимных сдвигов строк, с низкочастотной составляющей, вычисленной по зарегистрированным данным о крене. Для принципиальной возможности реализации этой процедуры необходимо синтезировать адаптивный механизм частотного, близкого к оптимальному варианту, взаимодействия результатов двух типов коррекции.

Применим к фигурирующим в выражении (3.16) поправкам, полученным путем пересчета навигационных данных, выделение низкочастотной составляющей фильтром, степень подавления высоких частот которым регулируется параметром P :

$$\bar{v}^N(j) = F[P, v^N(j)]. \quad (3.17)$$

Аналогично представим такое же преобразование к рассчитанным корреляционным поправкам, выделяя, в этом случае, их высокочастотную часть:

$$\bar{v}^K(j) = v^K(j) - F[P, v^K(j)]. \quad (3.18)$$

Используя (3.17) и (3.18), получим, в соответствии с предложенным подходом, результат:

$$v^B(j) = v^K(j) - F[P, v^K(j)] + F(P, v^N(j)). \quad (3.19)$$

Отсюда собственно коррекция, то есть получение образа, соответствующего предложенному комбинированному методу, принимает вид

$$g^B(i, j) = f(i - v^B(j), j). \quad (3.20)$$

Выражения (3.17)-(3.20) определяют решение задачи при принятом преобразовании сглаживания $F[P, *]$ и известном значении $P = P^*$, где величина этого параметра, как отмечалось выше, задает оптимальное (или близкое к нему) соотношение между высокочастотной составляющей индексов корреляционной поправки и низкочастотной составляющей индексов навигационной поправки. Для оценки этого параметра выбирается критерий оптимизации.

Поиск решения осуществляется исходя из логико-алгебраического подхода к получению описаний сложных моделей процессов [51], для чего

сформулируем, сначала, целевое предназначение модели. В данном случае, как это следует из физического смысла выражения (3.19), искомое значение $P = P^*$ соответствует выбору оптимального «уровня» низкочастотной части индексов навигационной коррекции, которые отвечают за среднее, наиболее точное координатное положение каждой точки исходного снимка. Исходя из конкретного вида фиксируемой измерителем информации по крену, пересчитанной в корректирующие индексы сдвига строк, известно, что наиболее точные значения углов крена соответствуют «вершинам» ступенек исходных навигационных данных, поскольку промежуточные значения обычно представляют собой лишь размноженные индексы строк (нулевой порядок интерполяции). «Вершины» ступенек такой последовательности данных легко выделить программно-логическим путем. Обозначим выборку таких «правильных» точек на полной $v^N(j)$ совокупности навигационных индексов как $v_Q^N(j)$. Здесь Q – размер "проверочной" выборки, до половины размера исходной.

Из физического смысла решаемой задачи следует, что для рационального выбора «уровня» сглаживания индексы низкочастотной части навигационных измерений должны быть как можно ближе к выделенным наиболее точным значениям выборки. Тогда формальная постановка задачи равносильна получению оценки искомого параметра, который бы доставлял минимум суммы квадратов невязок аппроксимации исходной выборки на области отобранных индексов:

$$P^* = \min_P (\sum_{q=1}^Q \{F[P, v^N] - v_Q^N(q)\}^2). \quad (3.21)$$

То есть, выбирается такое значение параметра P , при котором его результат, определенный на исходной выборке индексов навигационных данных, достигает минимума в узлах «контрольных» индексов. Критерий (3.21) является «внешним» по отношению к обычной постановке задачи сглаживания [51]. В качестве неопределенного выше в явном виде функционала сглаживания $F[P, *]$,

как выборки навигационных данных, так и выборки корреляционного анализа, для выделения ее высокочастотной части, может быть использован рассмотренный выше скользящий фильтр модификации Савицкого – Голая вида (2.1-2.3) (в этом случае параметр P – скользящий интервал).

На рис.3.12 представлен результат применения геометрической коррекции данных экспериментальной съемки для задачи поиска техногенного мусора: стандартным подходом по углу крена – (а), предложенным способом - (б). На рис.3.13 - результаты коррекции в виде зависимости смещения строк снимка в пикселях от номера строки.

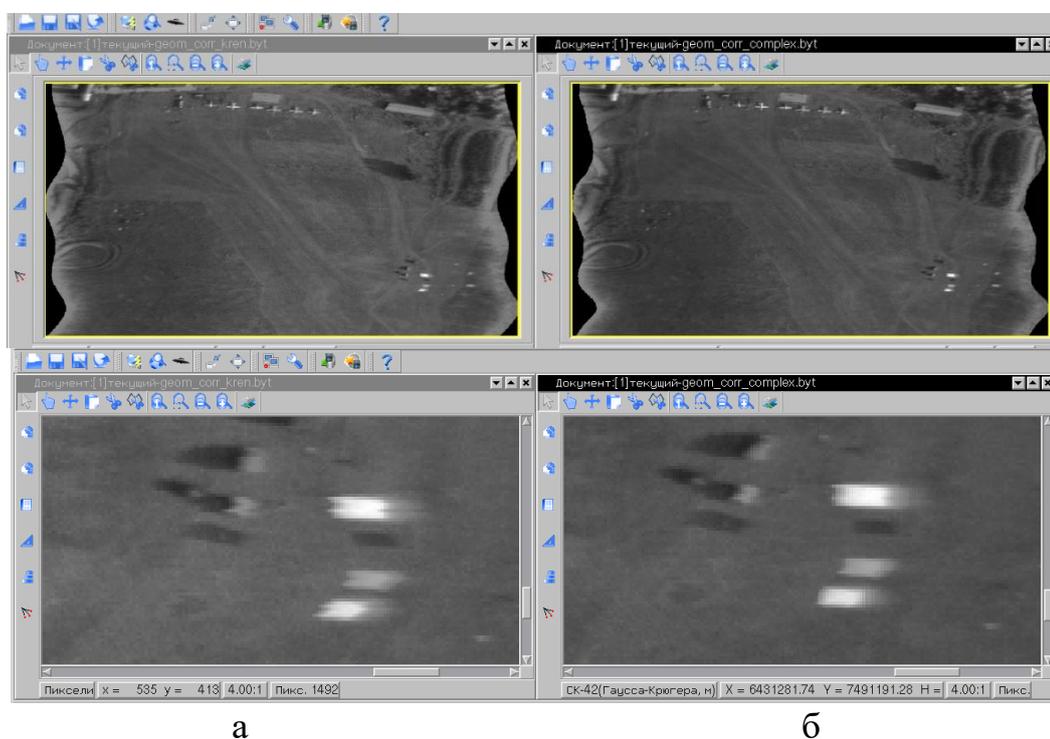


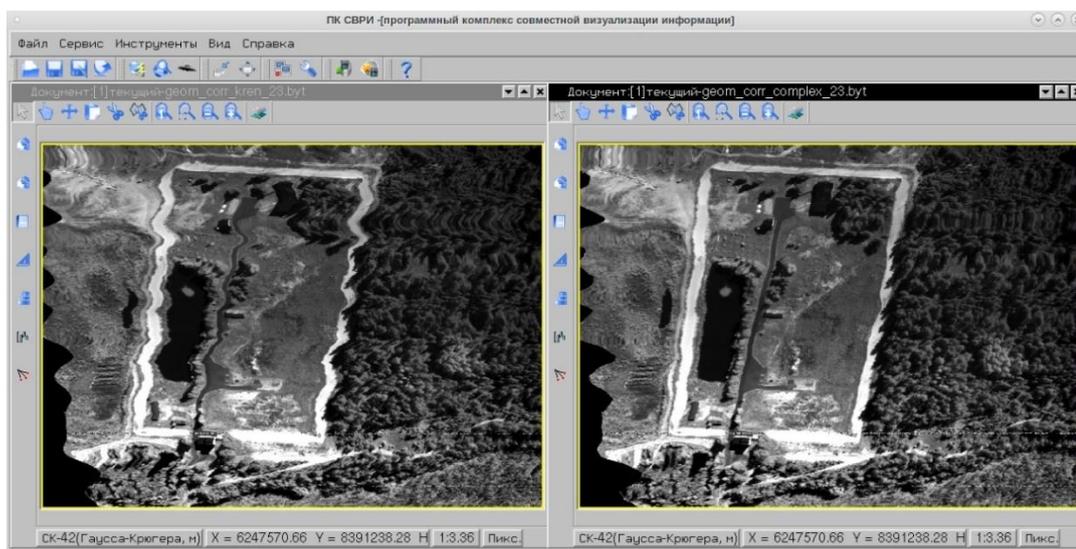
Рис.3.12 - Результат применения геометрической коррекции данных экспериментальной съемки для задачи поиска техногенного мусора: стандартным подходом по углу крена – (а), предложенным способом - (б) (нижняя линейка образов – детальные вырезы из верхней линейки)



Рис.3.13 - Результаты геометрической коррекции данных экспериментальной съемки для задачи поиска техногенного мусора в виде зависимости смещения строк снимка в пикселях от номера строки

Из их анализа можно сделать вывод о том, что в целом оба подхода показывают хорошие результаты, однако комбинированная геометрическая коррекция позволяет также демпфировать высокочастотный «джиттер». Средняя ошибка между предложенными вариантами коррекции составила 1,65 пикселя, что в свою очередь при геометрическом разрешении съемки в 0,35 м может говорить о возможном повышении точности определения координат по приведенному снимку, обработанному способом комбинированной геометрической коррекции на 0,6 м.

Более наглядно преимущества комбинированной геометрической коррекции видны при аэросъемки в сложных условиях ветровой обстановки. На рис.3.14 представлен результат применения геометрической коррекции данных съемки объекта «дорога» при сильном ветре: стандартным подходом по углу крена – (а), предложенным вариантом - (б). На рис.3.15 представлены результаты коррекции в виде зависимости смещения строк снимка в пикселях от номера строки.



а

б

Рис.3.14 - Результат применения геометрической коррекции данных экспериментальной съемки характерного инфраструктурного объекта «дорога» в относительно сложных условиях ветровой обстановки: стандартным подходом по углу крена – (а), предложенным вариантом - (б)

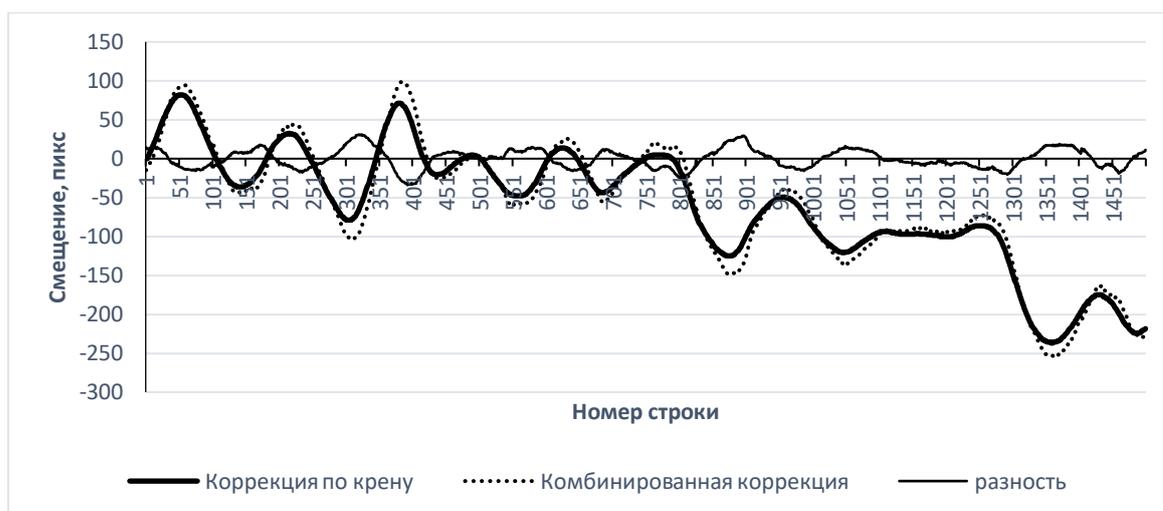


Рис.3.15 - Результаты геометрической коррекции съемки объекта «дорога» при сильном ветре в виде смещения строк снимка в пикселях от номера строки

Сравнение показывает более высокое качество демпфирования геометрических искажений предложенным вариантом комбинированной коррекции. Средняя ошибка между предложенными вариантами коррекции составила 10,3 пикселя, что при геометрическом разрешении в 0,25 м, говорит о возможном повышении точности определения координат, в рассматриваемом

случае, на 2,6 м. Однако, главным преимуществом применения предложенного подхода является существенный рост визуального качества поиска объектов техногенного мусора.

Далее для осуществления геокодирования данных ВСС используется фотограмметрическая модель формирования изображений аппаратурой сканерного типа [50]. Необходимые для геокодирования изображения координаты местоположение датчика и элементы его внешнего ориентирования могут быть получены из телеметрической информации, поступающей от пилотажно-навигационного. Если в телеметрической информации нет данных о каждой строке, то проводится восстановление телеметрических данных методами интерполяции. Для этого рассчитываются коэффициенты сплайнов телеметрических параметров.

Результаты процедуры трансформирования [47, 50] исходных данных ВСС по модели геокодирования изображений сканерного типа на фоне растровой и векторной подложки в ГИС приведены на рисунке 3.15. Следует заметить, что в процессе обработки данных для поиска техногенного мусора обычно трансформирование не выполняется и приводится здесь только для визуальной оценки результата геокодирования.

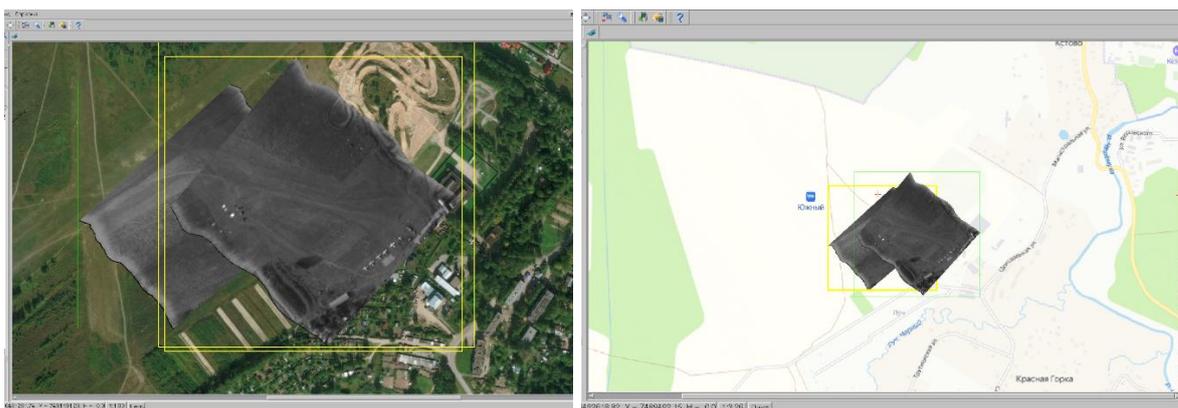


Рисунок 3.16 - Результаты трансформирования исходных данных ВСС по модели геокодирования изображений сканерного типа

Для оценки конечной точности геокодирования с помощью предложенной методики может быть использована оценка по контрольным точкам [46]. Для этого были найдены характерные точки наземным ориентиров на

обрабатываемых снимках экспериментальной съемки характерного инфраструктурного объекта «дорога», рассчитаны их координаты и сравнены с координатами этих точек растрового покрытия ГИС. Пример расстановки точек и рассчитанные ошибки в них для данных, обработанных комбинированным способом коррекции приведены на рисунке 3.16. Такие же точки были расставлены на снимке, обработанном стандартной коррекцией.

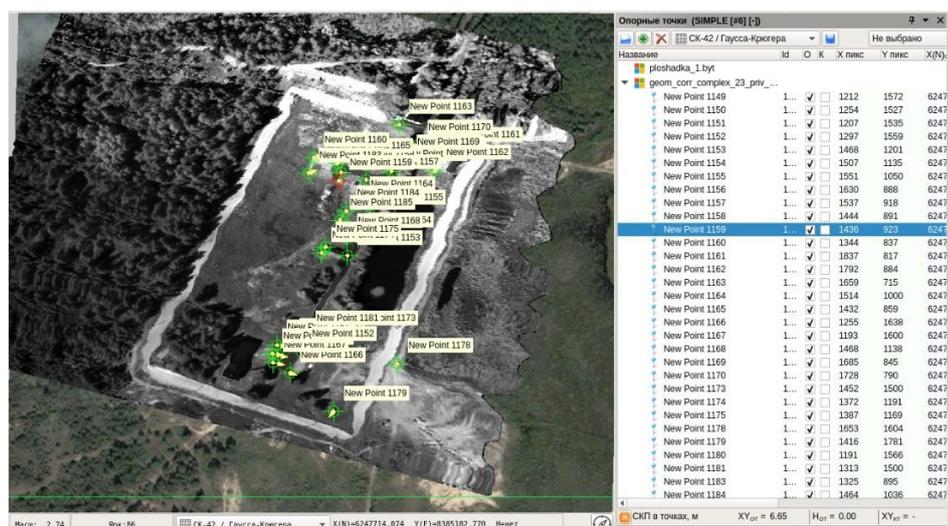


Рисунок 3.17 - Пример расстановки точек и рассчитанные ошибки в них для данных, обработанных комбинированным способом коррекции

Рассчитанная точность координат в контрольных точках в виде среднеквадратической ошибки [46] для данных, скорректированных комбинированной геометрической коррекцией, оказалась равна 6,23 м, а для данных, скорректированных стандартным способом - 7,47 м. Таким образом, повышение точности, определенной по внешним контрольным данным, хорошо согласуется с приведенными выше рассчитанными точностями, оценёнными по смещениям линий, что позволяет говорить о повышении точности геокодирования в среднем на 15-20%. Однако, что более важно – предложенная методика повышает визуальное качество данных, что в свою очередь повышает качество решения задачи поиска техногенного мусора.

Таким образом, предлагается следующая специальная методика геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС, отраженная в разработанном ПО:

1. Рассчитывается кривая геометрического сдвига строк на основе выражения по параметрам угла крена телеметрии и выделяется низкочастотная составляющая сигнала с использованием модифицированного фильтра Савицкого-Голая с заранее определенным оптимально по (3.21) уровнем «среза».

2. Рассчитывается кривая сдвига строк на основе корреляционного анализа по выражению (3.14-3.15) и выделяется высокочастотная составляющая сигнала с использованием модифицированного фильтра Савицкого-Голая с определенным оптимально по (3.21) уровнем «среза».

3. Вычисляется комбинированная кривая сдвига строк по выражению (3.19).

4. Осуществляется коррекция данных ВСС на основе выражения (3.20).

5. Выполняется геокодирование скорректированных данных ВСС на основе фотограмметрической модели формирования снимков аппаратурой сканерного типа.

3.4 Выводы

1. Предложенная эмпирико-математическая модель формирования сигналов в видеоспектрометре позволяет моделировать сигнал с шумовыми искажениями, что используется в разрабатываемой ниже, в главе 4, имитационной модели геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных видеоспектральной съемки.

2. Предложенная к использованию и доработанная методика компенсации случайных и полосовых шумовых искажений ВС данных позволяет, как показали результаты тестовой съемки, повысить отношение сигнала к шуму в 1,5 – 1,8 раза.

3. Разработанная новая методика комбинированной геометрической коррекции и геокодирования данных ВСС позволяет повысить точность координатной привязки до 15-20% и, главное, существенно повышает визуальную дешифрируемость данных благодаря демпфированию высокочастотных геометрических искажений образов объектов.

4 Методика тематической обработки данных видеоспектральной съемки с использованием имитационной модели

4.1 Имитационная модель геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных видеоспектральной съемки

Вопросы моделирования тракта получения и обработки ВС данных находят свое отражение в зарубежных и отечественных источниках [52], [53]-[61]. Практически во всех случаях эти публикации посвящены оценке возможностей конкретных образцов разрабатываемой и перспективной аппаратуры, а также построения на их основе ГИС решения практических задач, по отдельным показателям, с учетом их особых свойств.

Необходимость синтеза имитационной модели (ИМ) вызвана, в первую очередь, высокой сложностью реализации измерительного режима функционирования средства ВС воздушной съемки. Проявляется существенная зависимость качества решения конечной задачи от свойств исходной фоно - объектовой обстановки (ФОО), от спектральных свойств объектов наблюдения и фона, от условий наблюдения (освещенности и атмосферного слоя прохождения оптических сигналов), от тракта формирования яркости на входном зрачке фото - приемного устройства (ФПУ). С другой стороны, весьма значительную роль играют применяемые методы первичной, предварительной обработки, метрик спектральной идентификации (в том числе – выбор порогов распознавания). То есть, успешное создание и применение разрабатываемой системы ГИС решения конкретной практической задачи возможно лишь при предварительной модельной прогонке всего тракта получения и формирования данных с оценкой по конечному показателю качества.

Совершенно очевидно, что точное воспроизведение возможной ФОО во всех случаях нереально, поэтому целесообразно решать подобного рода задачу для «критических» условий. Для этого, во-первых, в качестве исходной ФОО используется пространственное распределение объект - фон модельного шаблона

на наивысшей пространственной частоте (определяется размером элемента пространственного разрешения). Во-вторых, модельная прогонка осуществляется применительно к «критическому» варианту ФОО - то есть для максимально близких сочетаний спектральных свойств объекта и фона, в-третьих, желательно оценки строить как для средних, так и наиболее «тяжелых» условий наблюдения – освещенности и состояния атмосферы. Кроме того, особую роль играет зависимость влияющих имитируемых полосовых искажений от пространственного чередования тестовых элементов «объект-фон».

Функционирование имитационной модели (ИМ) геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных видеоспектральной съемки можно представить в виде схемы на рис.4.1.



Рис.4.1 – Структурно-функциональная схема имитационной модели

Имитационная модель геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных ВСС включает следующие модели:

– модель геопространственного и спектрального представления данных ФОО – позволяет моделировать пространственно-спектральный сюжет с данными объекта поиска и фона;

– модель формирования сигнала на входе в аппаратуру ВСС на основе атмосферной модели MODTRAN, рассмотренная в пункте 1.3. Здесь, для формирования освещенности и учета свойств трассы преобразования сигнала принят наиболее удобный в использовании (и проверенный практическим применением) программный пакет MODTRAN, на основе которого, как это было подробно описано, строится расчет преобразований оптических потоков вплоть до значений сигналов на апертуре прибора;

– модель формирования сигнала в аппаратуре ВСС, рассмотренная в пункте 3.1 – позволяет на основе заданных параметров оптического блока и приемной матрицы аппаратуры ВСС, сформировать сигнал с учетом искажающих свойства датчика;

– модель первичной обработки данных, подробно рассмотрена в главе 2. В отличие от реализации методики реальной первичной обработки данных, в ИМ нет необходимости использования первичной радиометрической калибровки;

– модель предварительной обработки данных, подробно рассмотрена в главе 3. В отличие от реализации методики реальной предварительной обработки данных, в ИМ не используется методика геометрической коррекции и геокодирования, т.к. геометрические искажения не искажают спектральные вектора обрабатываемого «куба» и соответственно никак не влияют на конечную задачу попиксельного спектрального различения;

– модель тематической обработки (бинарного отнесения элементов к объекту или фону) замыкает общую модель имитации обработки. Данная модель опирается на сравнение спектральных векторов обрабатываемых данных и спектральных опор из БД с помощью специальных метрик оценки: субпиксельной, Теребижа, разностно-векторной и корреляционной, модели которых будут рассмотрены в пункте 4.3.

В конечном итоге модель бинарного разделения и прогонка нескольких типов метрик спектрального сравнения реализуются в непосредственных математических вариантах применения при анализе влияния тех или иных факторов на конечные результаты решения практической задачи идентификации объектов - вероятности спектрального различения объект - фон.

Отметим, что используемая в ходе имитационного моделирования БД эталонных спектральных характеристик поверхностей объектов имеет особое (в отличие от непосредственно используемой базы усредненных характеристик в ходе прямой идентификации) свойство. Она содержит также максимальные и минимальные значения КСЯ по каждому типу объектов и фона, а также учет их распределений для обеспечения возможности моделирования их variability. Тем самым имитационная модель максимально приближена к спектральным свойствам реальных сценических данных.

Используемые модели являются, в данном случае, эмпирико - математическими по той причине, что реальное, в наибольшей степени приближенное к действительности, моделирование тракта наблюдения и обработки данных ВСС возможно при предварительном учете и оценивании конкретных свойств аппаратуры. Эти свойства выявляются, как это предлагается в настоящей работе, на основе отдельной тестовой съемки, в ходе обработки данных которой определяются все основные, необходимые в ходе моделирования параметры отдельных элементов тракта получения и преобразования оптической информации.

Как отмечено выше, пространственное построение имитационной модели исходит из «критического» варианта ее реализации, то есть на максимальной пространственной частоте взаимного присутствия объектов и фона. Кроме того, для «критического» варианта учета возможных воздействий полосовых и случайных искажений на результаты имитации получаемых данных, используется равновероятное присутствие «объекта» и «фона» в строках и столбцах имитируемого снимка, что усугубляет влияние имитируемых полосовых искажений.

При построении модели имеется в виду, что в конечном итоге рассчитывается вероятность спектральной идентификации объектов на заданном фоне (с учетом их вариабельности) на наивысшей (максимально возможной) пространственной частоте. Отсюда следует ожидать, что в реальной ситуации, на меньших пространственных частотах (при существенном увеличении размеров объектов), искомые объекты тем более будут успешно распознаваться. Максимальная пространственная частота соответствует, в пересчете на высоту и угол наблюдения моделируемой сцены, элементу геометрического разрешения аппаратуры наблюдения (с учетом последующего пространственного биннинга). Отсюда, исходя из сделанных замечаний, в качестве пространственного распределения спектральных векторов тестируемой сцены выбран вариант попиксельно - шахматного расположения элементов объектов и фонов (шаблона сцены). Это вариант формирования ФОО позволяет равновероятно по присутствию объектов и фона в каждой строке и столбце генерировать случайные и полосовые помехи, кроме того, он позволяет достаточно наглядно оценивать конечные результаты моделирования и обработки (при сохранении равновероятности статистической обусловленности оценок по объекту и фону).

На рис.4.2 приведен пример формирования пространственных шаблонов для случая общего размера имитируемой сцены 16*16. Там, где элементы (пиксели) помечены светлыми пятнами, - они условно соответствуют типу «объект». Темные - типу «фон». В каждом пикселе «объекта» светлые пятна в общем случае не полностью заполняют ячейку разрешения, что предполагает модельное пространственно-спектральное смешивание исследуемого объекта с фоном. То есть, задавая определенные отношения этого смешивания, имитационная модель в общем случае имеет дело с распознаванием не спектрально «чистых» объектов, а более приближенном к реальной обстановке случаев - их смешиванием с фоном. Это позволяет моделировать возможность реальной аппаратуры попадать элементом разрешения на элемент местности, где частично присутствует объект и фон (попадание на пространственную границу искомого объекта).

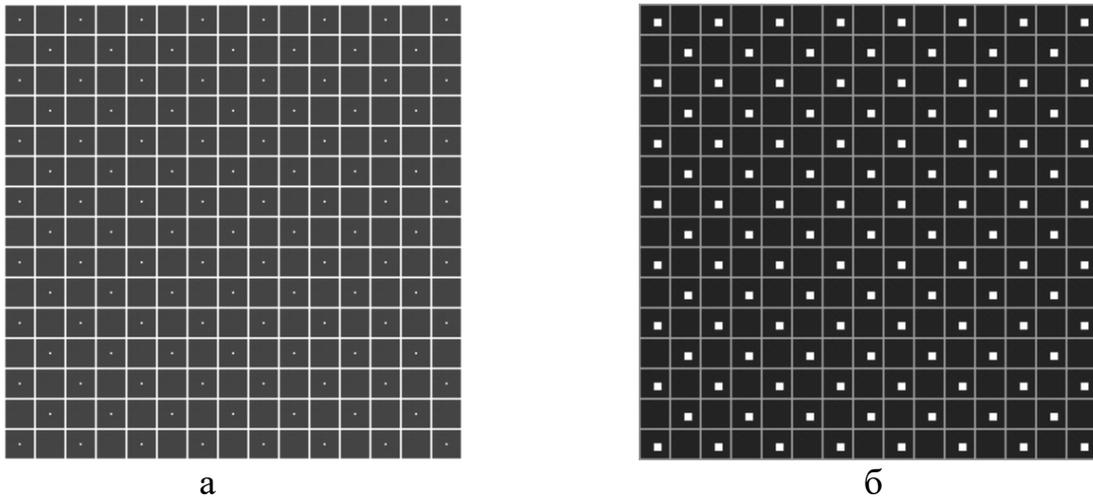


Рис.4.2 - Формирование пространственного шаблона для двух значений коэффициентов заполнения моделируемого «объекта»

Учет статистической вариабельности каждой выбранной спектральной пары осуществляется путем формирования стохастической выборки спектра объекта или фона для каждого элемента шаблона моделируемой сцены, при этом генерируется случайное число, одно для каждого моделируемого спектрального вектора. Это число задает положение этого вектора среди заведомо измеренной в наземных или других условиях совокупности КСЯ, которая, в свою очередь, характеризуется максимальной и минимальной границами. Граничные векторы по объекту и фону вводятся в ИМ в качестве входных данных. Таким образом, каждый элементарный шаблон, соответствующий наличию в синтезируемом поле зрения заданного размера частей разрешаемого элемента сцены, заполненных объектами, участвует в формировании общего тестового шаблона. 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 (для примера на рис.4.2 - 16 на 16) в элементах разрешения прибора на общем тестовом шаблоне. Обозначим априорно известные функции распределения $F_{o,f}(\xi_{ij})$ (для имитируемого объекта «o» или фона «f»), преобразующие

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

$$\rho_{ij}(\lambda) = \begin{cases} \rho_{Go}(\lambda) \cdot F_o(\xi_{ij}) + [1 - F_o(\xi_{ij})] \cdot \rho_{Mo}(\lambda), & ij \in o \\ \rho_{Gf}(\lambda) \cdot F_f(\xi_{ij}) + [1 - F_f(\xi_{ij})] \cdot \rho_{Mf}(\lambda), & ij \in f \end{cases}, \quad (4.1)$$

где ρ_{Go}, ρ_{Mo} и ρ_{Gf}, ρ_{Mf} - соответственно верхняя и нижняя границы экспериментально измеренных кривых, ограничивающих распределения КСЯ по объекту и фону. Пример граничных спектральных ходов по объекту и фону приведен на рис.4.3«а» для варианта проведения расчетов спектральной идентификации рассмотренного выше тестового объекта – элемента обшивки, раскрашенной зеленой краской «под траву».

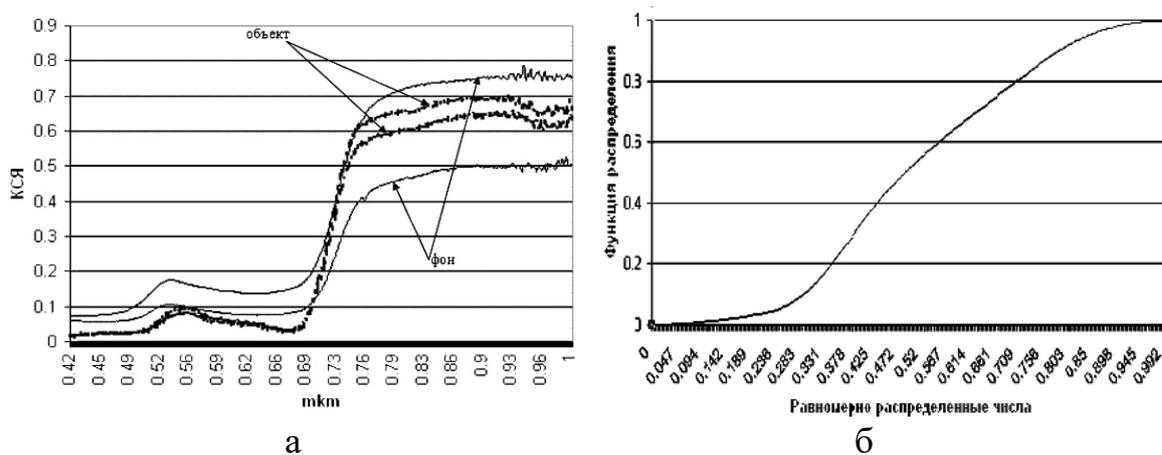


Рис.4.3 - Граничные спектральные ходы по объекту и фону – (а) и полученная экспериментально функция распределения КСЯ по объекту на заданной длине волны – (б)

Как видно из этого рисунка, в данном случае спектральные ходы КСЯ по объекту существенно менее вариабельны, чем по фону. Наибольшие отличия ходов присутствуют до 0,7 мкм, далее которого распределения по объекту укладываются в пределы вариабельности фона и близки по форме.

Пример полученной экспериментально функции распределения КСЯ по объекту, на средней части спектрального диапазона от 0,4 до 1,0 мкм, приведен на рис.4.3«б». Это распределение по форме близко, в данном случае, к нормальному закону и близко к нему для других спектральных линий.

Синтезированный спектральный «куб» в КСЯ $\rho_{ij}(\lambda)$, в соответствии с моделью (4.1) и с учетом вышерассмотренных данных по пространственному смешиванию объекта с фоном, является сформированной исходной информацией и используется в качестве входных данных в ИМ. Аналогично рассмотренному примеру строятся генерируемые случайные векторы и для других бинарных сочетаний объект-фон.

Используем полученные выше оценки относительных шумов для генерации сигнала с аддитивными составляющими случайного шума и полосовых искажений в виде:

$$s_{ij} = g_{ij} + g_{ij} \left\{ \frac{Norm(ij)}{\xi_n} + \frac{Norm(i)}{\xi_s} + \frac{Norm(j)}{\xi_c} \right\}, \quad (4.2)$$

где $Norm(ij), Norm(i), Norm(j)$ - соответственно, датчики случайных чисел, распределенных по нормальному закону с нулевым средним и единичным СКО для элементов i, j моделируемой матрицы пространственного поля. ξ_n, ξ_s, ξ_c - соответствующие отношения сигнала по случайному шуму, полосовым помехам по строкам и по столбцам, g_{ij} - исходный, не зашумленный сигнал, обусловленный трактом формирования.

Представленная ИМ верифицирована в результате экспериментов по воздушной съемке объектов техногенного мусора. Результаты верификации модели приведены в пунктах 4.3.1 и 4.3.2.

4.2 Рекомендации по применению имитационной модели для задачи оценки влияния спектрального разрешения данных видеоспектральной съемки на решение тематической задачи

Рассмотрим использование ИМ для оценки влияния выбранного спектрального разрешения аппаратуры на вероятности различения близких по свойствам спектральных пар. В качестве исходной пары и ее варибельности взят вариант спектрально близкой пары «тестовый образец - трава» (тестовый образец представляет собой элемент обшивки, раскрашенный зеленой краской «под траву»), его характеристики КСЯ представлены на рис.4.3. В качестве дискриминатора выбран бинарный вариант реализации субпиксельного метода (аналитика подробно рассмотрена для более общего случая ниже). Вариант функционировал, соответственно, по двум опорным векторам (средние кривые по объекту и фону среди измеренных характеристик на рисунке). Моделировалась высота ВСС в 1000 метров, в надир, время экспонирования - 1 мс. Параметры прибора соответствовали аппаратуре с фокусным расстоянием 8 мм, относительное отверстие 1:2,3, размер элементарного приемника 11 мкм с учетом пространственного биннинга 2*2. ИМ была настроена применительно к пространственному шаблону 16*16. Рассматривались модели летней атмосферы, рассчитанные для условий наблюдения на широте Москвы, сельский аэрозоль. Все варианты проведенных расчетов соответствовали полному применению принятой в ИМ первичной и предварительной обработки – атмосферной коррекции, снижению полосовых помех и случайных шумов.

На рис.4.4 приведены оценки, полученные на основе ИМ, вероятностей правильного различения тестового «объекта» на фоне травы применительно к трем величинам спектрального разрешения аппаратуры – 5, 7 и 10 нм для двух типов атмосферы – с МДВ=23 и 10 км при одной высоте Солнца – 16 градусов.

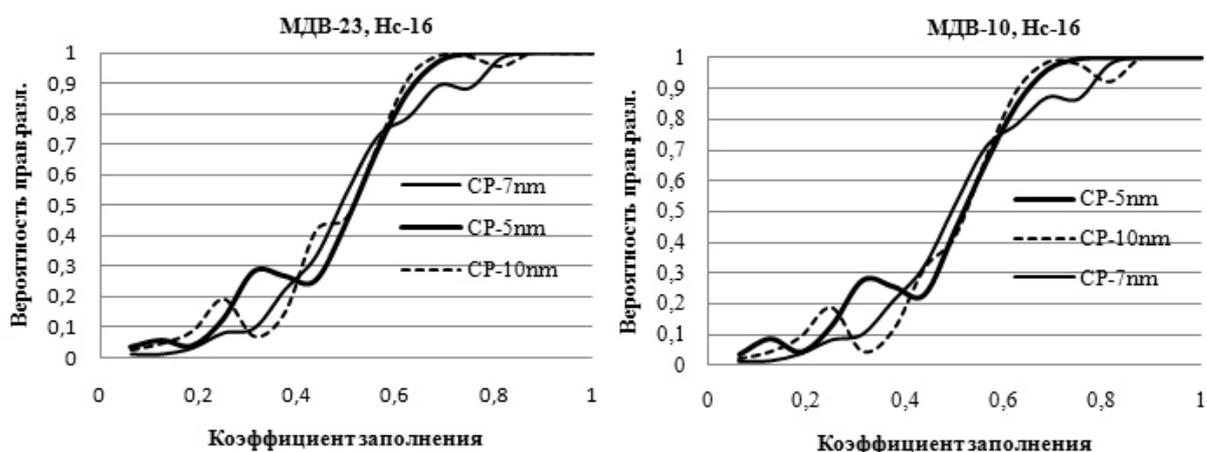


Рис.4.4 – Вероятности правильного различения для атмосферы двух типов: с МДВ=23 км при высоте Солнца $H_c=16$ градусов (слева) и с МДВ=10 км при высоте Солнца 16 градусов

Сравнение показывает, что в обоих рассматриваемых случаях наиболее устойчивые результаты соответствуют СР прибора величиной 5 нм при единичной вероятности различения уже при коэффициенте 0,65-0,7 смешивания объекта с фоном. Вместе с тем, при необходимости снижения СР обрабатываемых данных в 2 раза возможно решение задачи при допустимом удельном смешивании, в данном случае, фона с искомым «объектом» в пределах 0,2.

На рис.4.5 представлены результаты расчетов вероятностей правильного различения спектральной пары для третьего типа атмосферы – с МДВ=23 км при высоте Солнца 53 градуса.

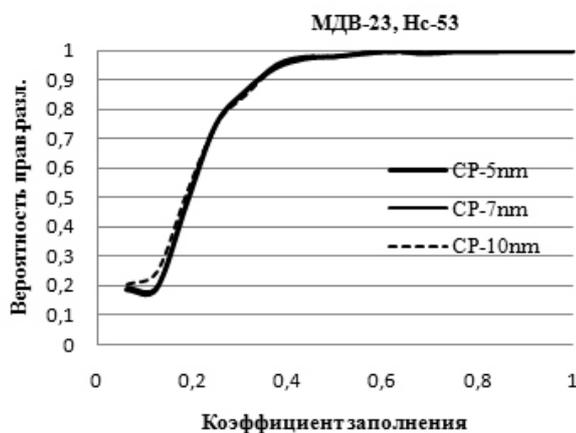


Рис.4.5 – Вероятности правильного различения для атмосферы с МДВ=23 км при высоте Солнца H_c - 53 градуса

Судя по представленному графику, большая высота Солнца, при «хорошем» состоянии атмосферы (МДВ-23 км), позволяет решать уверенно задачу уже при условии попадания элемента разрешения прибора на середину границы пары «объект-фон».

На рис.4.6 совместно приведены рассчитанные вероятности как правильного различения (слева), так и вероятности ложных тревог (справа) для всех трех рассматриваемых выше типов атмосферы при принятом СР аппаратуры в 5 нм. Из рисунка следует, что вероятности ложных тревог при максимальной из рассмотренных вариантов высоте Солнца (53 градуса) практически нулевые уже начиная с коэффициента заполнения элемента разрешения объектом и фоном в соотношении 0,2 к 0,8. То есть, уже занятие 20% площади искомым объектом в элементе разрешения позволяет системе обработки обнаруживать, как это показано на левом графике, «объект» с вероятностью не ниже 0,5. При существенно меньшей высоте Солнца, - 16 градусов, рассмотренное снижение МДВ с 23 км до 10 км, в рассмотренном варианте, не оказывает существенного влияния как на наличие ложных тревог, так и на вероятность правильного различения «объекта».

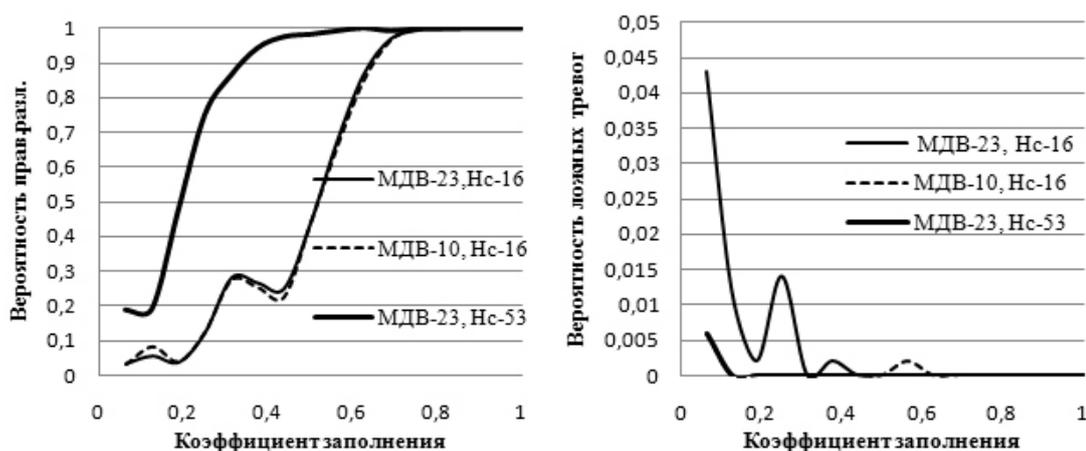


Рис.4.6 – Вероятности правильного различения (слева) и ложных тревог (справа) для трех типов атмосферы

В целом представленные результаты расчетов на основе ИМ позволяют сделать вывод о том, что при наилучших условиях наблюдения влияние СР прибора в пределах величин от 5 до 10 нм весьма мало влияет на конечные

результаты решения рассматриваемой задачи. При ухудшении условий наблюдения наиболее устойчивое распознавание «объекта» соответствует СР аппаратуры в 5 нм.

4.3 Разработка и апробация методики тематической обработки данных на реальных результатах воздушной видеоспектральной съемки объектов техногенного мусора

4.3.1 Экспериментально-модельная оценка возможностей тематической обработки данных видеоспектральной съемки объектов техногенного мусора в сложных условиях фоно - объектовой обстановки

Рассматривается обнаружение по данным ВСС искусственного объекта, представляющего собой образец, имитирующий техногенный мусор, раскрашенный «под травяной покров», расположенный на фоне травы в апреле вблизи аэродрома - вертолетной площадки Министерства чрезвычайных ситуаций (поселок Манушкино Ленинградской области). Съемка сопровождалась достаточно «тяжелыми» условиями проведения. В соответствии с данными метеостанции Воейково, в период эксперимента МДВ соответствовала 10 км, наблюдалась почти сплошная облачность слоисто-кучевого типа, температура воздуха 13-14 градусов. Высота Солнца составляла около 30 градусов.

Экспериментальная воздушная съемка с вертолета проводилась с целью объективного анализа возможности функционирования в целом разработанного комплекса получения и обработки видеоспектров по весьма сложному варианту спектрального сочетания объекта с фоном. Как это описывалось выше, в ходе эксперимента был реализован метод атмосферной коррекции на основе наземного эталона. Наземная съемка по эталону, а также по тестовому объекту и прилегающему травяному фону проводилась с помощью спектрорадиометра FieldSpec (с пространственным разрешением около 0,3 метра, что примерно соответствует геометрическому разрешению ВС с высоты съемки) непосредственно перед проведением полета. Тестовый образец объекта, размером

3 на 4 метра, раскрашенный «под траву» (зеленая краска с загрязнением) расположен рядом со взлетно-посадочной площадкой вдоль ее торца.

Воздушная съемка осуществлялась с помощью ВС НПО «Лептон». Диапазон функционирования 0,4-1,0 мкм, всего 290 каналов, спектральное разрешение от 2 до 25 нм. Полученные результаты ВСС характеризовались высоким уровнем случайных шумов и значительными строчными искажениями. Присутствовали также геометрические искажения в результате вибраций корпуса вертолета, на котором находилась аппаратура. Спектральные «кубы» прошли, помимо атмосферной коррекции, предварительную обработку по снижению уровня строчно-полосовых помех и спектральных шумов. Результаты этой обработки были рассмотрены выше и наглядно представлены на рис.3.6 применительно к данным именно этого эксперимента.

На рис.4.3 «а» были приведены также границы вариабельности КСЯ спектральных кривых, соответствующих опорной совокупности наземных измерений объекта и окружающего травяного фона. Как это следует из рисунка, вариабельность КСЯ фона существенно выше вариабельности КСЯ объекта в области выше 0,7 мкм. В диапазоне чувствительности аппаратуры от 0,4 до 0,7 мкм кривые спектральных ходов достаточно близкие при весьма малых значениях сигналов.

Помимо опорных кривых по тестовому объекту и фону (средние значения вариабельности) в качестве анализируемого набора в ходе спектрального анализа использовались также аналогичным образом измеренные и усредненные КСЯ по элементам снимка. Это – «грунтовая дорога», «асфальт ВПП», «укатанная земля», «вспаханная земля». Следует особо отметить, что, как правило [18], сформированная БД по спектральным сигнатурам различного рода поверхностей, используемая и полученная в ходе проведения совокупности натуральных экспериментов, характеризуется хорошей статистической устойчивостью.

В качестве спектрального анализатора для распознавания тестового объекта исследовалось применение дискриминанта Теребижа [62]. Для

двухальтернативного варианта формальное решение задачи на основе этого подхода можно представить в следующем виде.

Для каждого текущего измеренного векторного спектра $\xi_i(k)$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$ (общая размерность спектральной матрицы снимка) и двух опорных средних векторов альтернативных классов $\xi^{(0)}(k)$, $\xi^{(1)}(k)$, при $k = 0, 1, \dots, L - 1$, рассчитывается статистика

$$\tau_i^t(0,1) = \sum_{k=0}^{L-1} C_k [\xi(k) - \xi^{(0)}(k)] / \sqrt{\sum_{k=0}^{L-1} C_k^2 \xi^{(0)}(k)},$$

при $C_k = \ln[\xi^{(1)}(k)/\xi^{(0)}(k)]$, (4.3)

она, в общем случае, сравнивается с некоторым пороговым значением, при этом, при превышении этого порога ($\tau_i^t(0,1) > t_p$), текущий вектор ξ_i относится классу, заданному опорным вектором $\xi^{(1)}$, в противном случае алгоритм его относит классу, заданному опорным вектором $\xi^{(0)}$.

Ниже представлено его видоизменение [42]: вместо (4.3) для каждого текущего значения спектрального вектора ξ и каждого опорного вектора ξ^i , из БД спектральных опор, рассчитывается выражение

$$\tau^i = \sum_{k=1}^L \frac{(\xi(k) - \xi^i(k))^2}{\xi^i(k)} \quad (4.4)$$

Следует отметить, что значения τ^i могут быть использованы для селекции БД спектральных кривых в случае, если в БД содержится статистически достаточное количество наблюдений. В частности, для каждого наблюдения данного типа рассчитывается значение τ , где в качестве ξ^i используется среднее для данного типа, а в качестве ξ используется данное наблюдение. Ищется максимум такого расстояния (по всем наблюдениям). После чего производится расчет расстояний от данного типа до других типов из БД. И если найдется тип, расстояние до которого меньше найденного максимума по наблюдениям, то считается, что в рамках данного подхода эти два типа являются неразличимыми. Наблюдения по ним объединяются и процедура продолжается. Такая процедура происходит до тех пор, пока в БД все типы будут отделимы друг от друга по данному критерию. Такого рода селекция способствует как сокращению типов в

БД, так и способствует большей адекватности результата классификации и устранению «двойников».

Результаты применения модифицированного дискриминанта Теребижа вида (4.4) к полученным данным ВСС для двух случаев – до применения предварительной обработки и после нее, приведены на рис.4.7. На приведенных вырезках сплошными квадратными контурами отмечены области, где используемый дискриминант обнаружил тестовый объект наблюдения. При этом, на левом образе, ложно обнаружены, помимо искомого, еще 11 соразмерных искомому объектов (по совокупности обнаруженных пикселей). Эти ложные объекты полностью находятся в зоне окружающего фона.

В то же время, после предварительной обработки классификация приводит, в рассмотренном случае, к возможности однозначного распознавания тестового объекта.

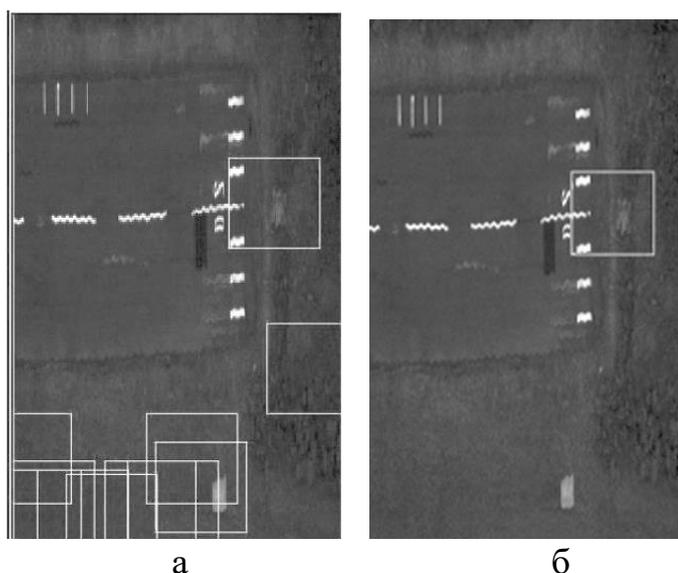


Рис. 4.7 - Результаты принятия решений о наличии искомого объекта применительно к исходному и предварительно обработанному «кубу» данных до коррекции искажений (а) и после нее (б)

На рис.4.8 приведен вырезы из результата распознавания тестового образа на основе дискриминанта Теребижа.

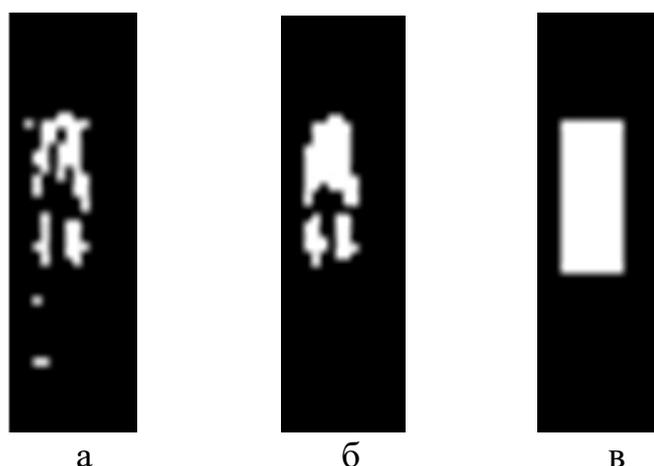


Рис.4.8 – Образы искомого объекта, полученные в ходе распознавания на основе дискриминанта (4.4): а – по исходным данным, б – после фильтрации шумов и коррекции полосовых искажений, в – истинное положение искомого объекта

Отсюда следуют вывод, во-первых, о хорошем качестве предварительной обработки данных и правильности используемого способа предварительной обработки. Во-вторых, о корректности применения общей схемы построения комплекса, включая использование атмосферной коррекции на основе тестового эталона, нормировки данных и наземных измерений опор спектрорадиометром.

На втором этапе обработки рассматриваемых данных ВСС проводилось решение задачи на основе ИМ в воспроизводимых условиях с применением той же адаптированной метрики Теребижа вида (4.4) при использовании спектральных опор, аналогичных обработке данных реальной ВСС.

В качестве примера расчета на рис.4.9 приведено сравнение измеренной на основе ВСС кривой яркости с моделью. То есть, расчет яркостей элементов шаблона, в ИМ, практически совпадал с данными по условиям наблюдения, соответствующими реальной съемке.

В конечном итоге рассчитывались величины вероятностей спектрального распознавания искомого тестового объекта на фоне травяного покрова с используемым фоно - объектовым шаблоном и описанной выше ИМ.

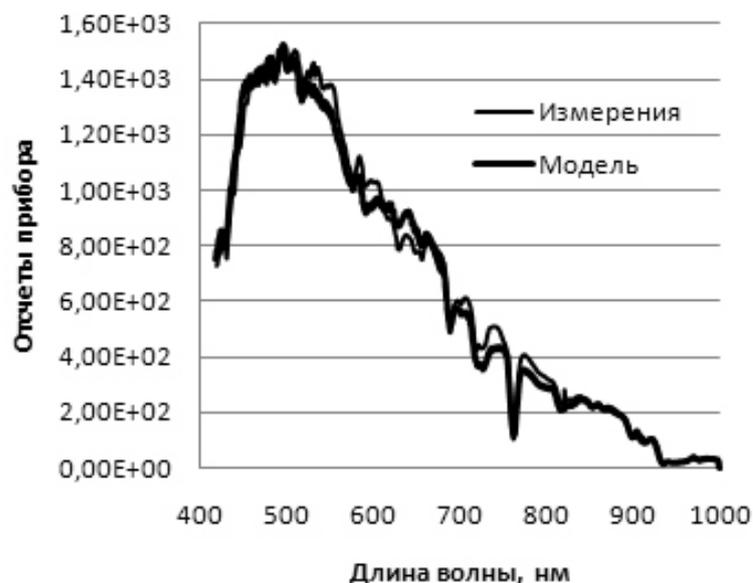


Рис.4.9 – Сравнение яркости, полученной усреднением по тестовому объекту на данных ВСС - «измерения», с яркостью теста, полученной пересчетом измеренной освещенности - «модель»

Расчет производился для двух случаев – по «исходной» сформированной модели с заданными уровнями присутствующих помех, а также для второго случая, - когда помехи купировались моделью предварительной обработки. Результаты рассчитанных вероятностей представлены на рис.4.10.

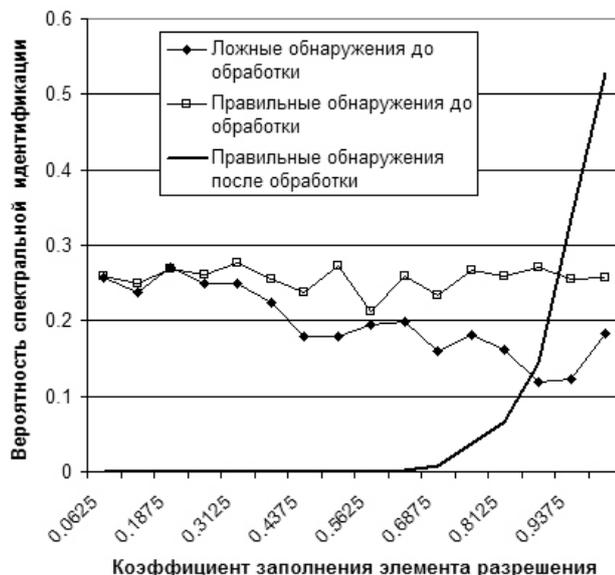


Рис.4.10 – Результаты расчетов на основе ИМ

Как показывают эти результаты, применение спектральной классификации используемого типа к модельному варианту бинарного

распознавания («объект-фон»), без предварительной обработки данных, приводит к достаточно низким уровням вероятностей правильного обнаружения при соизмеримых значениях ложных тревог. Этот факт вполне соответствует результатам обработки данных реальной ВСС, описанной выше. При этом следует иметь в виду, как отмечалось, что расчеты на основе ИМ строились для случая, когда «объекты» смешивались с фоном. То есть, другими словами, расчеты на основе ИМ проводились, когда все «объекты» представляли собой точечные разрешаемые элементы наблюдаемой сцены.

По этой причине на рис.4.10 вероятности распознавания, даже при «полном» заполнении объекта разрешения присущей ему сигнатурой и применением предварительной обработки, не превышают величины 0,5. То есть, это «гарантированная» расчетная величина вероятности классификации рассматриваемой сцены.

Вместе с тем, сравнение результатов спектральной классификации с использованием предварительной обработки и без оной, показывают хорошее согласование результатов расчетов на основе ИМ с данными обработки реальной сцены. При этом ИМ позволяет количественно априорно оценивать возможности используемого ВС конкретного типа (заданного совокупностью своих параметров), как при полном соответствии имитируемых условий наблюдений реальным условиям, так и при их существенном отличии.

4.3.2 Методика тематической обработки данных воздушной видеоспектральной съемки для решения экологической задачи поиска техногенного мусора в виде отделяемых частей ракетносителей

Поиск объектов техногенного мусора, как было отмечено выше, имитировался на основе реальных фрагментов ОЧ РН. С этой целью образцы помещались на естественном травяном фоне, который на общей наблюдаемой сцене включал в себя, помимо эталонов, крупные объекты типа автомобильной техники.

Экспериментальная съемка производилась в диапазоне 0,4-1,0 мкм, ВС, имеющим, в исходном варианте, 1066 спектральных каналов, с самолета АН-2 на минимально возможной скорости полета. Регистрирующий прибор с призменным диспергатором характеризовался «плавающим» спектральным разрешением «куба» от 0,2 нм (в начале) до 6 нм - в конце интервала чувствительности. Время экспонирования соответствовало скорости движения и составляло 14 мс. Экспедиция проводилась в ходе осенью (сентябрь 2017г.) в центральной зоне России. Условия наблюдения – МДВ - 10 км, высота Солнца 16 градусов, безоблачно. Для создания ФОО использовались помещенные непосредственно на травяной покров средней высоты реальные фрагменты ОЧ РН. Размеры образцов составляли от значительных (1,2 м на 1,5 м) до уменьшающихся величин, вплоть до их соизмеримого значения с реализуемым пространственным разрешением аппаратуры - около 0,5 м с высоты в 1 км. Физически они представляли собой обгоревшие дюралевые элементы ОЧ РН различной конфигурации.

Поскольку ВС размещался на борту самолета без гиросtabilизированной платформы, на носитель, в процессе регистрации, воздействовал ряд возмущающих факторов, вызывающих геометрические искажения получаемого снимка. Кроме того, так как сканирование поля зрения производится путевой скоростью линейной (1024 элемента в пространственном направлении) матрицей, на результатах съемки присутствует значительный уровень полосовых искажений. Представление о качестве зарегистрированных данных дает приведенное на рис.4.11 полутоновое изображение. Образ синтезирован из исходного гиперспектрального куба на RGB-спектральных линиях, вблизи, соответственно, 650, 550 и 450 нм, после чего преобразован в градации серого.

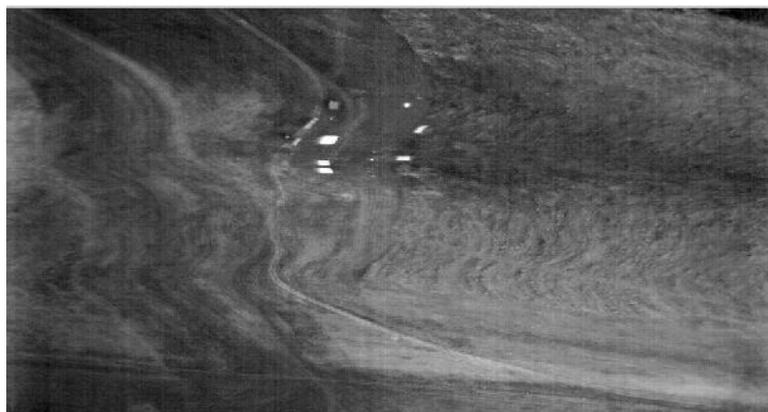


Рис.4.11 – Полутоновый синтезированный RGB-спектральный образ исходного снимка (уменьшено)

На начальном этапе проводилась первичная обработка данных в соответствии с разработанными методиками, включая радиометрическую калибровку, нелинейное биннингование к примерно постоянному интервалу в 5 нм и атмосферную коррекцию.

На втором этапе проводилась предварительная обработка, в соответствии с разработанными методиками, включая демпфирование полосовых шумовых искажений, спектральных шумов, а также геометрическую коррекцию с геокодированием.

Для наглядности на рис.4.12 приведены, в единичном масштабе, сравнительные, в градациях серого, образы RGB-синтезированных вырезов, размерами 286×202 , исходного снимка, в области нахождения искомым объектов мусора. Левый образ – по исходному кадру. Правый – после применения компенсации полосовых искажений, случайного шума и комбинированной геометрической коррекции. Белыми рамками выделены зоны с расположенными на них объектами наблюдения. Кроме того, на правом образе показано местоположение используемого в ходе последующей обработки калибрующего эталона для атмосферной коррекции данных.

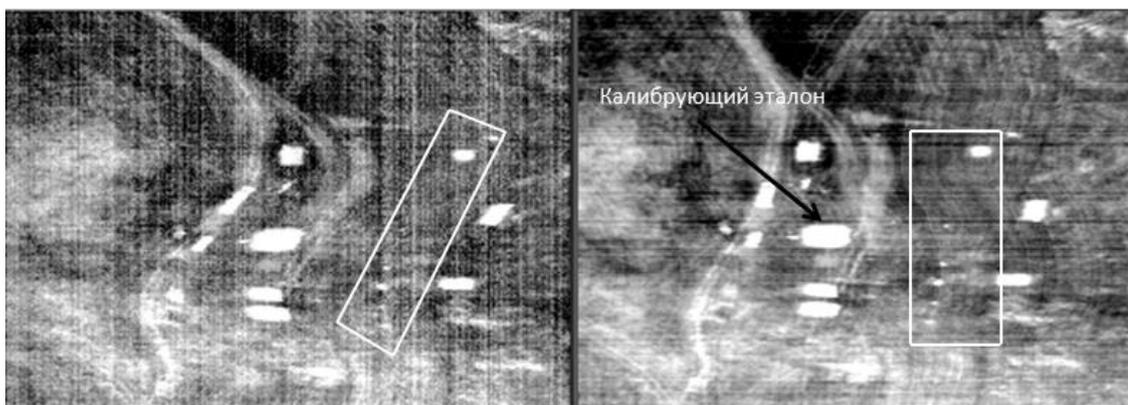


Рис.4.12 – Вырезы на зону внимания из исходного спектрального куба - слева и после реализации его предварительной обработки – справа

Сравнение образов демонстрирует весьма существенное визуальное повышение качества данных после проведения используемой обработки – существенно скомпенсированы геометрические искажения, значительно снижены полосовые и случайные помехи.

Означенные вырезы для получения конечных оценок качества идентификации были сегментированы с применением эквализации (гистограммного преобразования) визуальным подбором порогов [63]. Из полученных образов, для последующего анализа, выделены собственно объекты поиска. Их совместное представление, вместе с фрагментами фотоснимков искомых объектов, приведено на рис.4.13, контрасты образов вырезов инвертированы для повышения качества отображения. Размеры указаны в метрах.

В качестве верхнего на рисунке (наибольшего) тестового объекта использовался мусорный обломок типа «дверь». Ниже – типа «шар», остальные четыре объекта – куски обшивки («тест»). Они спектрально идентичны, как это было показано выше, и различаются лишь размерами.

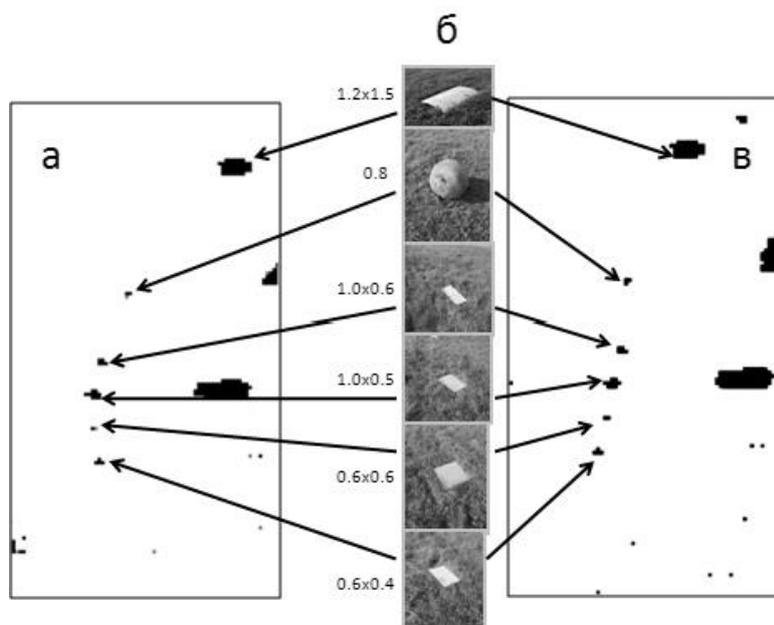


Рис.4.13 - Объекты поиска: а – на сегментированном вырезе из исходного «куба», б – фотографические образы, в - на сегментированном вырезе из геометрически скорректированного «куба»

По каждому тестовому объекту наблюдения, на земле, предварительно измерялись КСЯ с помощью полевого спектродиометра SR-3500. Измерения проводились таким образом, чтобы «пятно» наблюдения максимально охватывало каждый объект в пределах его размера. По объектам «дверь» и «шар», в силу их некоторого отличия, брались результаты, каждый из которых усреднялся по совокупности 5-ти реализаций. По остальным объектам усреднялись все измеренные данные.

Опорные спектры искомых объектов техногенного мусора были помещены в базу опорных сигнатур в виде трех оригинальных образов под названиями «дверь», «шар» и «тест». Все кривые были приведены к биннингованному спектру авиационного прибора путем нелинейной интерполяции – рис.4.14. Здесь же представлен спектр измеренного спектродиометром калибрующего «эталоны». Кроме того, сюда добавлена спектральная сигнатура травы как основного окружающего объекты фона на рассматриваемой сцене.

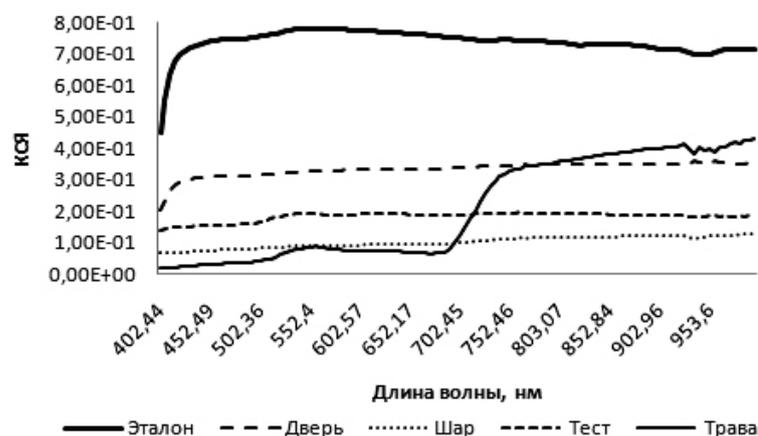


Рис.4.14 - Сигнатуры искомых объектов, опорного эталона и сопутствующего фона

Как это видно из рисунка, все три опорные сигнатуры объектов имеют близкую по форме характеристику, что, в сочетании с используемым типом нормировки, в конечном итоге приводит к спектральной близости искомых опор по форме.

Как это следует из опыта проведения спектральной идентификации применительно к различным практическим применениям [64,65,30], ее конечные результаты значительно зависят от используемого метрики сравнения элементов снимка с эталонными опорами и, следовательно, от выбранной меры близости. В качестве мер сравнения (каждого текущего спектрального вектора с заданными опорами) часто используются такие, как корреляционная, разностно-векторная, модифицированная Теребижа. Кроме того, в некоторых случаях применяется субпиксельный метод. Ниже, формализовано, описаны использованные в рассматриваемом случае метрики сравнения для последующей оценки их качества по конечным результатам решения поставленной задачи.

Суть применения субпиксельной метрики состоит в проецировании текущего пиксельного вектора $\rho_{ij}(\lambda)$ на априорно заданные опорные спектральные векторы $\rho_n(\lambda), n = 1, 2, \dots, N$. Здесь $ij \in [I, J]$, где $I \times J$ – размерность двумерной области снимка.

Примем, что $k = 1, 2, \dots, K$ - число спектральных каналов используемого прибора. Процедура субпиксельного проецирования на принятые опоры может быть записана [23], как

$$[r_{ij}^{(1)} r_{ij}^{(2)} \dots r_{ij}^{(N)}]^T = (R^T R)^{-1} R^T \rho_{ij}(\lambda_k), \quad (4.5)$$

где матрица проецирования строится по заранее выбранным N векторам:

$$R^T = \begin{bmatrix} \rho_1(\lambda_k) \\ \rho_2(\lambda_k) \\ \dots \\ \rho_N(\lambda_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1^{(1)} & \rho_1^{(2)} & \dots & \rho_1^{(K)} \\ \rho_2^{(1)} & \rho_2^{(2)} & \dots & \rho_2^{(K)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_N^{(1)} & \rho_N^{(2)} & \dots & \rho_N^{(K)} \end{bmatrix}.$$

Текущий результат получения решения - $r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(N)}$ - проекции на векторы N типов опор соответственно.

Для получения конечной идентификации следует сопоставить вычисленные величины проекций. При этом отнесение того или иного ij – пикселя к классу «объект» определяется наибольшей величиной проекции, из всех рассчитываемых N величин. В рассматриваемом случае, - к первым трем опорам («дверь», «шар», «тест»): $r_{ij}^{(l)} = \max_n \{r_{ij}^{(n)}\}$, если $l = 1, 2, 3$, и к классу «фон», - если $l > 3$. Например, для четвертой спектральной опоры – «трава», в ходе достижения максимума при $l = 4$ результат означает, что текущий пиксель относится к фону.

Модифицированная метрика Теребижа (4.4), является оценкой расстояния между текущим вектором $\rho_{ij}(\lambda)$ и опорным вектором $\rho_n(\lambda)$:

$$\tau_{ij}^{(n)}(\rho_{ij}(\lambda), \rho_n(\lambda)) = \sum_{k=1}^K [(\rho_{ij}(\lambda_k) - \rho_n(\lambda_k))^2 / \rho_n(\lambda_k)]. \quad (4.6)$$

Здесь объединение пикселей, относящихся к классу «объект», будет характеризоваться выполнением соотношения $\tau_{ij}^{(l)} = \min_n \{\tau_{ij}^{(n)}\}$, если $l = 1, 2, 3$ и к классу «фон», - если $l > 3$.

Специальная метрика «разностно-векторная» построена по аналогии с мерой Кульбака, однако, в отличие от оценки расстояния между распределениями

(как в исходном варианте), здесь рассчитывается расстояние между собственно векторами:

$$u_{ij}^{(n)}(\rho_{ij}(\lambda), \rho_n(\lambda)) = \sum_{k=1}^K \{ [a_{ij}(\lambda_k) - b_n(\lambda_k)] \log [a_{ij}(\lambda_k)/b_n(\lambda_k)] \}, \quad (4.7)$$

где $a_{ij}(\lambda_k) = \frac{\rho_{ij}(\lambda_k)}{\sum_{k=1}^K \rho_{ij}(\lambda_k)}$, $b_n(\lambda_k) = \frac{\rho_n(\lambda_k)}{\sum_{k=1}^K \rho_n(\lambda_k)}$.

Аналогично использованию модифицированной меры Теребижа, для объединения пикселей, относящихся к классу «объект», рассчитывается

$$u_{ij}^{(l)} = \min_n \{ u_{ij}^{(n)} \}, \text{ если } l = 1, 2, 3, \text{ и к классу «фон», - если } l > 3.$$

Метрика корреляционного сравнения (коэффициент корреляции):

$$C_{ij}^{(n)}(\rho_{ij}(\lambda), \rho_n(\lambda)) = \frac{1}{d_{ij}d_n} \sum_{k=1}^K [\rho_{ij}(\lambda_k) - E(\rho_{ij})][\rho_n(\lambda_k) - E(\rho_n)], \quad (4.8)$$

где $d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^K [\rho_{ij}(\lambda_k) - E(\rho_{ij})]^2}$, $d_n = \sqrt{\sum_{k=1}^K [\rho_n(\lambda_k) - E(\rho_n)]^2}$,

$$E(\rho_{ij}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \rho_{ij}(\lambda_k), \quad E(\rho_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \rho_n(\lambda_k).$$

Аналогично применению субпиксельной метрики, здесь для объединения пикселей, относящихся к классу «объект», определяется

$$C_{ij}^{(l)} = \max_n \{ C_{ij}^{(n)} \}, \text{ если } l = 1, 2, 3, \text{ и к классу «фон», - если } l > 3.$$

Существенной особенностью рассматриваемого случая решения задачи является тот факт, что в поле зрения прибора попадает большое количество других искусственных объектов, находящихся в спектральной близости к опорам. Такого рода особенность приводит к тому, что используемые меры спектральной близости сигнатур обломков к опорам, особенно с учетом неизбежного частичного спектрального смешивания обнаруживаемых объектов с фоном, благодаря их относительно малым размерам, в некоторых случаях оказываются несколько меньше тех значений, которые соответствуют окружающим объектам сцены. В итоге уровни ложных тревог в ходе распознавания могут оказаться значимыми и влиять на конечное качество применения средства спектрального обнаружения.

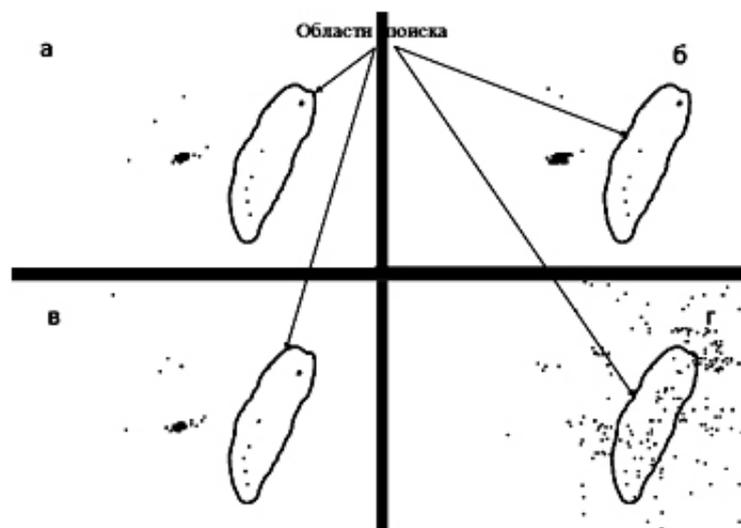


Рис.4.15 - Результаты выделения объектов поиска по исходному снимку (без предварительной обработки): а – субпиксельной мерой, б – разностно-векторной, в – модифицированной метрикой Теребижа, г – по корреляции

Последовательно применяя выбранные меры близости (4.6) - (4.8) к исходным данным (сначала без использования предварительной обработки), получаем результаты спектральной идентификации для каждого варианта решения задачи – рис.4.15. На рисунке выделены области поиска объектов, контрасты образов также инвертированы для наилучшего отображения. По полученным результатам рассчитываются оценки качества распознавания объектов поиска, приведенные в таблице 4.1. Вероятности определяются отношением числа правильно идентифицированных *пикселей* объектов, к числу *пикселей*, истинно относящихся к искомым объектам поиска, задаваемых их положением на рис.4.13«а». Ложные тревоги определяются числом выделенных пикселей, не относящихся к объектам поиска на выделенном фрагменте.

Таблица 4.1. Вероятности обнаружения по исходному снимку

| Метрика близости | Вероятность обнаружения | Число ложных тревог |
|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Субпиксельная | 0,53 | 59 |
| Разностно-векторная | 0,59 | 105 |
| Теребижа | 0,53 | 62 |
| Корреляционная | 0,23 | 4068 |

Отметим, что в большинстве случаев (кроме корреляционной метрики сравнения) наблюдается частичное выделение пикселей всех шести искомых объектов. Как это следует из представленной таблицы, качество обнаружения первыми тремя указанными метриками достаточно близко, при этом для применения разностно-векторной метрики характерно некоторое сравнительное повышение уровня ложных тревог. Это является следствием почти полного выделения сопутствующего фонового объекта, что, однако, не мешает визуальной идентификации объектов поиска с учетом существенно большего размера этого фонового образования. Качество обнаружения с применением корреляционной меры - низкое.

Аналогичные расчеты спектральной идентификации снимков были проведены по данным, обработанным методиками предварительной обработки.

Полученные образы представлены на рис.4.16. Здесь, в отличие от вышеприведенных результатов обработки по исходному снимку, уровни ложных тревог существенно меньше почти для всех мер близости. При этом сравнительно хуже выделились объекты при использовании корреляционной меры. Оценки величин вероятностей идентификации для этого случая сведены в таблицу 4.2.

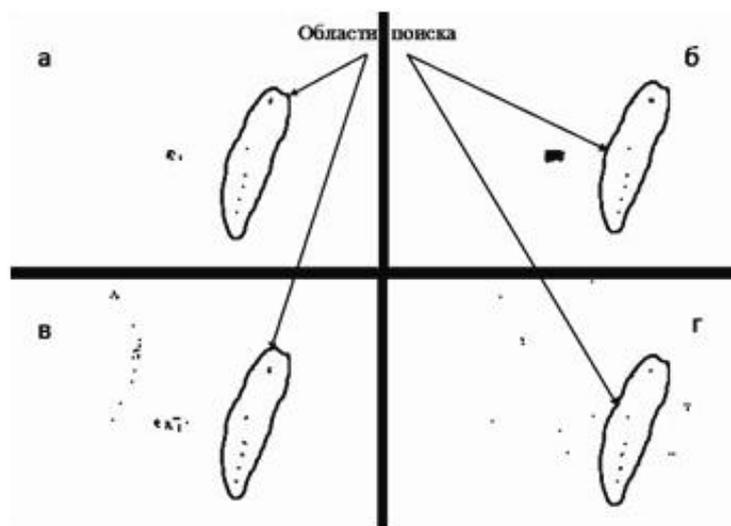


Рис.4.16 - Результаты выделения объектов поиска по предварительно обработанным данным: а – субпиксельной метрикой, б – разностно-векторной, в – модифицированной Теребижа, г – по коэффициенту корреляции

Как показывает анализ приведенных расчетов, а также визуальный анализ результатов распознавания, как по исходным данным, так и по предварительно обработанным, в данном случае наиболее целесообразно использовать специальную разностно-векторную метрику. Она обеспечивает, при максимально достоверном (из выбранных методов) обнаружении искомых объектов, сравнительно невысокую величину ложных тревог. Эта величина, в обоих случаях, обусловлена обнаружением компактного объекта фонового образования, что принципиально не мешает правильной идентификации искомых объектов.

Таблица 4.2. Вероятности обнаружения объектов техногенного мусора по снимку после проведения его предварительной обработки

| Метрика близости | Вероятность обнаружения | Число ложных тревог |
|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Субпиксельная | 0,625 | 32 |
| Разностно-векторная | 0,75 | 98 |
| Теребижа | 0,56 | 70 |
| Корреляционная | 0,44 | 24 |

Результаты исследования спектральной идентификации фрагментов ОЧ РН на фоне травяного покрова и окружающих искусственных покрытий, по данным ВСС в диапазоне 0,4-1,0 нм, со спектральным разрешением 5 нм, принципиально показали возможности реализованного ПО для решения поставленной задачи. По этим результатам было подтверждено высокое качество применения предложенных, специализированных методик первичной и предварительной обработки, в сочетании с выбором метрик сравнения. Так, при полном отсутствии пропусков искомых объектов (как таковых), с последующим применением специальной разностно-векторной метрики, возможно повышение качества решения поставленной задачи примерно в 1,4 – 1,5 раза (по показателю вероятности распознавания пикселей, принадлежащих объектам поиска), по сравнению с исходными (предварительно не обработанными) данными. При этом достаточно низкий уровень ложных тревог в зоне поиска позволяет, даже в присутствии других искусственных образований на снимке, уверенно выделять

искомые объекты. Полученный результат обосновывает возможность применения разработанных методик обработки для решения экологической задачи поиска техногенного мусора.

На втором этапе был проведен расчет на основе ИМ. Опорные векторы были взяты те же, что и при прямой обработке данных. Расчет проводился для трех видов спектрального различения – корреляционным сравнением (4.9), модифицированной метрикой Теребижа (4.6) и разностно-векторной метрикой (4.7). Атмосферная модель рассчитывалась на основе данных об условиях наблюдения, отмеченных выше (МДВ=10 км, высота Солнца 16 градусов, аэрозоль сельский). Результаты расчета вероятностей классификации тремя метриками до и после проведения предварительной обработки имитируемых данных представлены на рис.4.17.

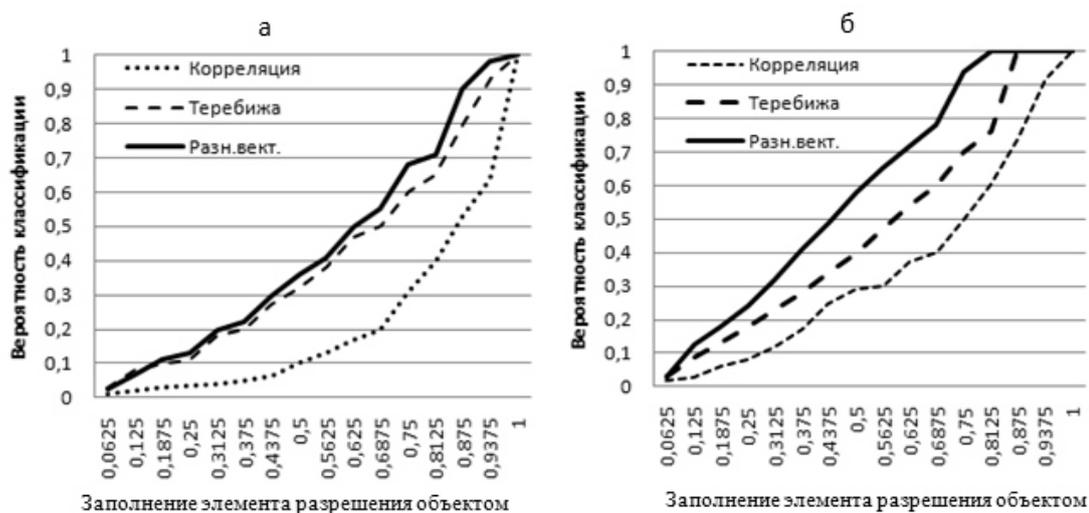


Рис.4.17 – Расчет вероятностей различения на основе ИМ: а - до предварительной обработки, б – после

Приведенные данные показывают, что как до, так и после применения методов предварительной обработки, вероятности различения «объектов» на фоне травяного покрова примерно (с точностью до 10% для всех методов классификации) совпадают с результатами, представленными в таблицах 4.1 и 4.2. 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 (на границах объектов) на самом деле составляет величину не более 0,5 - 0,7. Это в

свою очередь объясняется тем, что пространственное разрешение аппаратуры в рассматриваемой ситуации в большинстве случаев (кроме средней части объекта «дверь») соизмеримо с размерами большинства «объектов», то есть примерно в половине случаев «объект» замешан с «фоном». Таким образом, рассмотренный случай применения ИМ весьма хорошо по своим результатам применения укладывается в данные, полученные «прямой» классификацией результатов съемки. Это подтверждает правильность построения и применения разработанной ИМ.

Таким образом, методика тематической обработки данных ВСС, отраженная в разработанном ПО сводится к следующей последовательности:

1. До реального применения ВСС проводится априорное оценивание возможности решения задачи поиска конкретного техногенного мусора на ИМ, в ходе которого определяются возможные внешние условия применения, необходимость использования методик предварительной обработки, выбираются самые чувствительные метрики спектральной идентификации и их параметры.

2. В ходе непосредственной работы по каждому спектральному вектору данных ВСС осуществляется идентификация, на основе выбранной метрики и с порогом применения по ИМ (выражения 4.5-4.8) и формируется карта обнаружений (зон интереса с возможным содержанием объектов техногенного мусора), которая впоследствии визуализируется совместно с данными ВСС для окончательного принятия решения оператором.

4.4 Выводы

1. Разработанная методика тематической обработки данных (в том числе для «тяжелых» условий эксплуатации ГИС поиска техногенного мусора), основанная на априорном применении вновь разработанной имитационной модели, позволяет, как показали реальные эксперименты, при условии использования разработанных методик первичной и предварительной обработки, на порядок снизить уровень ложных тревог в ходе спектральной идентификации объектов.

2. Применение разработанных методик предварительной обработки позволяет, по результатам эксперимента по реальным данным, в 1,4 – 1,5 раза (по показателю вероятности распознавания отдельных пикселей, принадлежащих объекту), повысить качество решения задачи спектрального поиска техногенного мусора в виде отделяемых частей ракетносителей.

3. Использование разработанной имитационной модели геоинформационного представления объектов поиска, процесса формирования и обработки данных видеоспектральной съемки, обеспечивает, с точностью до 10%, априорную оценку качества конечного решения задачи информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора, как до, так и после применения методик предварительной обработки ВС данных, а также позволяет априорно выбирать наиболее подходящие из предложенных метрик спектральной идентификации и пороги их применения.

4. В результате апробации разработанных методик первичной, предварительной и тематической обработки на реальных результатах воздушной экспериментальной съемки техногенного мусора в виде отделяемых частей ракетносителей был выбрана наиболее подходящая для данного случая метрика – «разностно-векторная», которая показала высокую вероятность распознавания 0.75 (по совокупности обнаруженных пикселей, принадлежащих объектам) и низкий уровень ложных тревог. Этот результат с хорошей точностью подтверждается расчетами на основе ИМ, построенной для аналогичных условий наблюдения, что является наиболее убедительным подтверждением правильности построения разработанной ИМ и ее верификацией по показателю качества решения конечной задачи.

5 Системное оценивание эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора

5.1 Методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора

Как было отмечено выше, применение ВСС должно повышать эффективность оперативного ИО ГИС поиска техногенного мусора за счёт автоматизированного распознавания элементов поверхностей. Однако, для получения объективной оценки работы такой системы, необходимо разработать методику оценки ИО ГИС оперативного поиска техногенного мусора, и сравнить два варианта ИО: с применением ВСС и с использованием стандартной ОЭА. Необходимость функционирования в оперативном режиме ИО ГИС обусловлена часто высокой токсичностью искомым фрагментов, что вызывает целесообразность применения системы в реальном масштабе времени (обработки информации в темпе поступления данных).

Методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора опирается на доработанную до применения для рассматриваемой задачи известной модели, реализующей естественно - научный подход к формированию взаимодействия системы «человек – информация». Модель определяет интеграцию свойств мышления человека (оператора) с информационной средой (видеоданными и результатами их обработки). В общем виде этот подход разработан научно-педагогической школой «Системная интеграция процессов государственного управления», получившей развитие в РГГМУ [66].

Основой обеспечения качества оперативного поиска техногенных загрязнений является реализация инструментального мониторинга в сочетании с достаточно высокой квалификацией оператора, обслуживающего наземные средства обработки данных. По результатам решения оператора производится процедура (если это объект, а не ложная тревога) определения координат искомого объекта в ходе проведения сеанса по результатам съемки.

Квалификация этого оператора в ходе текущей обработки данных определяет возможность принятия им правильного решения в нештатной ситуации, - например, когда видовая обстановка не позволяет однозначно трактовать наблюдаемый сюжет, что, в конечном итоге, определяет качество функционирования системы в целом. Отсюда в рассматриваемом случае ставится общий вопрос синтеза модели информационного взаимодействия системы «оператор – информационные видеоданные» или, для принятого варианта, формирования модели «решение оператора» (РО).

Воздушная оптико-электронная съемка местности представляет собой последовательность получения видеоданных, их первичную обработку и сжатие (архивирование), затем сброс сжатых [67] данных по радиоканалу на наземный пункт с последующей ее обработкой. Такая последовательность операций рассматривается в виде *системы информационного взаимодействия человек – машина* (СИВЧМ), - то есть целостного образования, состоящего из взаимосвязанных (взаимодействующих) компонентов (элементов, частей).

Можно констатировать, что в этом случае необходимо выяснить, как должна выглядеть *модель* правильно построенной СИВЧМ, отвечающей запросам в сложившейся ситуации. Примем определение такой *модели* как описание или представление объекта, соответствующее ему и позволяющее получить необходимые характеристики о нем [68]. Она обладает следующими основными свойствами:

- находится в объективном соответствии с изучаемой СИВЧМ;
- замещает в определенном отношении СИВЧМ;
- дает информацию о СИВЧМ на основе ее исследования и соответствующих правил перехода модель – система (прототип).

Предметная область построения модели – исследование СИВЧМ. Применим к этой области закон сохранения целостности – закон построения и функционирования системы [66]. При этом известны два подхода к проектированию систем – на основе анализа и на основе синтеза [68,69]. Для построения непротиворечивой логической цепочки рассуждений при переходе от

вербальной модели принятия решения, в соответствии с используемым подходом синтеза, поступают следующим образом [69].

Руководствуясь принципом трёхкомпонентности познания, исследуемый процесс рассматривается в трех уровнях: методологическом (условие существования); методическом (условие перевода объекта из настоящего состояния в требуемое); технологическом (условия реализации перевода объекта из настоящего состояния в требуемое). Используя принцип целостности, на каждом из трёх уровней представления, процесс трактуется связью в виде «цепочки»: объект – предназначение - действие. Чтобы этот процесс существовал, необходимо и достаточно установить связь между категориями «объект», «действие», «предназначение». Далее следует интерпретация «объекта», как элемента модели «решения», в виде «обстановки». То есть, в ходе функционирования, для дешифровщика, принятие решения зависит от «обстановки» (это факторы и временные условия поступления данных от инструментального средства мониторинга).

«Действие» следует интерпретировать, как элемент модели «решения», в виде «*информационно-аналитической работы*» – это изучение и анализ данных об обстановке (их предварительная обработка и преобразование – наиболее удобное отображение исходных данных, выявление искомых признаков).

«Предназначение» интерпретируется как элемент модели «решения» в виде его «*реализации*». То есть, – это окончательное установление факта присутствия искомого элемента поиска на рассматриваемом кадре на основе имеющихся и выявленных признаков с отнесением его либо к «ложному», либо определение его конкретного типа с последующими действиями по выполнению автоматизированного определения координат с их занесением в протокол.

Структурная схема, поясняющая формирование модели «Решения оператора» (модель функционирования системы принятия решений) приведена на рис.5.1.

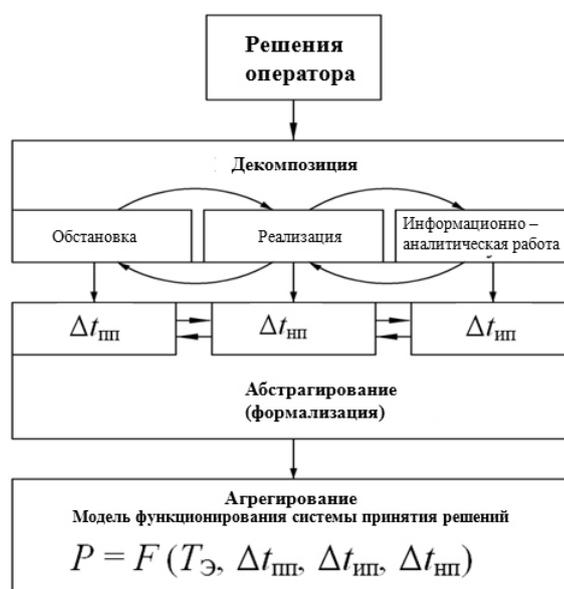


Рис.5.1 - Структурная схема формирования модели «Решения оператора»

На среднем уровне (методическом), реализуется причинно-следственная связь, согласованная с тремя базовыми принципами. Применяя метод абстрагирования, интерпретируются математические категории «обстановка» (модель объекта), «информационно-аналитическая работа» (модель действия), «реализация» (предназначение).

Основным ресурсом, определяющим функционирование системы, является время, поскольку принятое решения наиболее критично к показателю своевременности получения, отсюда целесообразно:

- обстановку интерпретировать как среднее время поступления кадров видеоданных, отвечающих наличию совокупности признаков, подозрительных на наличие объекта поиска (периодичность появления информационных проблем);
- информационно-аналитическую работу - как среднее время идентификации в общем смысле (обнаружения признаков) искомых элементов наблюдаемой сцены;
- реализацию решения как среднее время принятия решения на обнаруженной совокупности признаков, то есть данных о наличии объекта поиска или его отсутствия (ложная тревога), расчет и выдачу его координат с занесением в БД ИО ГИС.

То есть, в процессе дешифрирования оператор сталкивается, в ходе анализа каждого текущего кадра, с потоком информационных векторов, которые отображают совокупность признаков. Поток информационных видеоданных (видеокадров) поступает оператору с определенной заданной периодичностью - $T_э$. Это время, ранее (до поступления оператору – на предыдущем шаге функционирования) затраченное информационной системой на текущую съемку местности. Затем – на бортовую аппаратную обработку, шифрование и передачу по радиоканалу, разархивирование и первичную обработку – снижение полосовых и случайных помех, вторичную (тематическую) обработку и удобное для оператора отображение результата на мониторе.

С другой стороны, – это время, за которое оператор-дешифровщик должен обслужить весь предварительно полученный и обработанный кадр (до поступления следующего) на предмет обзора всего, что на нем представлено. При этом в качестве такой совокупности являются собственно зоны, подозрительные на наличие искомых признаков.

Эта совокупность появляется с некоторой *средней* периодичностью, равной $\Delta t_{ПП}$ (интервал валового поступления элементов снимка, то есть, зон, подозрительных на искомые объекты, для анализа). Для успешного реагирования на появление проблемы (признаков) дешифровщику необходимо вовремя обнаружить и проанализировать каждый такой вектор (поступающую проблему). Поступающие проблемы идентифицируются оператором со средним временем - $\Delta t_{ИП}$, которое характеризует квалификацию дешифровщика. После обнаружения (идентификации) объекта, дешифровщик приступает к принятию окончательного решения о принадлежности этой совокупности к искомому типу объектов или об их отнесении к ложному проявлению (фону). Такая процедура может потребовать привлечения дополнительных ресурсов (времени на дополнительную обработку) для принятия решения. После этого оператор затрачивает время на выдачу команды по определению координат обнаруженного элемента (если он истинный) и на автоматизированное сохранение в БД ИО ГИС. *Среднее* время вынесения окончательного решения о принадлежности

обнаруженного сочетания совокупности признаков к искомому объекту, определение координат и его протоколирование - $\Delta t_{НП}$ (по терминологии, принятой в [69] – это «время нейтрализации информационной проблемы»).

В итоге показатель качества решения задачи дешифрирования рассматривается как функция четырех основных параметров $P = F(T_э, \Delta t_{ПП}, \Delta t_{НП}, \Delta t_{ИП})$ (рис.5.1). Подчеркнем, что все значения времени, с которыми оперирует принятая модель системы, являются *средними*, поскольку оператор, в общем случае, может обработать кадр существенно быстрее, - когда отсутствуют объекты поиска как таковые и на снимке присутствуют только фоновые элементы. Он может также не задействовать все времена (по каждой поступающей проблеме) на идентификацию и не привлекать дополнительные ресурсы (если искомым объектов в кадре нет).

В итоге синтез модели системы «Решения оператора» на основе заданного показателя, в рассмотренном случае, сводится к определению трех отмеченных выше временных параметров функционирования СИВЧМ при использовании четвертого параметра – такта поступления полученной аппаратурой и зафиксированной на мониторе кадровой видеоинформации.

Для практических задач дешифрирования основным элементом является состояние, соответствующее решению конечной задачи оператором. В реальных условиях оператор может оказаться в двух ситуациях:

- он не готов к данным характеристикам сложившейся обстановки;
- он готов к разрешению возникшей проблемы в процессе обработки данных, но это требует от него дополнительных временных ресурсов [69].

Для учёта в модели этих двух основных ситуаций выделяются следующие четыре ее 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. Это либо обнаружение и классификация искомым объектов на кадре с занесением их

координат в БД, либо принятие решения об отнесении их к ложным (конечное решение задачи).

Ситуация отката системы в исходное состояние характеризует способность оператора к процессу дешифрирования на множестве изученных им задач. Частота перехода системы из состояния S1 в состояние S2 (ζ^+) равна величине, обратной среднему времени выполнения целевой задачи T_3 , которая характеризует возможности системы к получению решения, а частота (ζ^-) характеризует среднюю частоту невыполнения целевой задачи системы в целом. Эта величина зависит от вероятности, определяющей, в среднем, возможный сбой системы. Такой сбой возможен в случаях, когда, например, в некоторый момент произошла потеря текущего информационного кадра из-за влияния на носитель внешней среды или временного отказа бортовой аппаратуры. Вероятность такого сбоя, как правило, достаточно мала.

Третье базовое состояние системы (процесса), которое характеризуется «фактом проявления проблемы» – состояние S3. В рассматриваемом случае, – это последовательное поступление на анализ оператором зон, подозрительных на наличие искомых объектов. При нахождении СИВЧМ в состоянии S3 возникает необходимость в обнаружении оператором проблемы (идентификации подозрительной зоны). То есть, при переходе из S3 в S4 оператор выполняет процедуры обработки для определения – есть ли потенциальный объект интереса в зоне, поступившей на обработку, а также определяет план действий по дальнейшей обработке. При этом дешифровщик тратит время $\Delta t_{ИП}$. Частота перехода из состояния S3 в состояние S4 есть величина $\nu_1 = \frac{1}{\Delta t_{ИП}}$, где $\Delta t_{ИП}$ – среднее время «идентификации» информационной проблемы. В том случае, когда дешифровщик «пропускает» текущую зону, подозрительную на объект поиска, система переходит обратно в состояние S1 с частотой ν_3 , которая характеризует вероятность «пропуска» искомого объекта.

На этапе S3 также осуществляется *подготовка к подключению дополнительных ресурсов* для решения возникшей проблемы. При этом 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. В этом состоянии оператору для решения проблемы требуется дополнительное время, чтобы перейти из состояния S4 в состояние S2, т.е. задача решается при привлечении дополнительного временного ресурса Δt_{HP} (по [66] это «время нейтрализации проблемы»). Эта частота соответствует значению $\nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{HP}}$ и также определяется квалификацией и возможностями оператора.

В том случае, когда оператор, по каким-то причинам, не в состоянии, даже при привлечении возможных дополнительных ресурсов, принять правильное решение, тогда система, с вероятностью этого события, возвращается из состояния S2 в состояние S4 с некоторой частотой ν_2^- .

В рассматриваемом, описанном случае, граф процесса функционирования СИВЧМ представляется в виде рис.5.2.

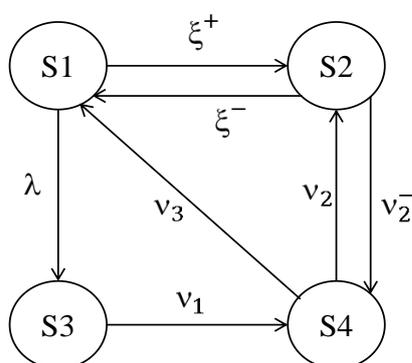


Рис.5.2 – Граф процесса функционирования СИВЧМ

Ниже, для получения аналитического решения задачи, принимаются следующие основные допущения и предположения.

1 Рассматривается информационная система – система взаимодействия оператора-дешифровщика с потоком поступающих данных.

2 Промежутки времени между моментами обнаружения совокупности признаков, подозрительных на наличие искомых зон (проявления проблем) являются величинами случайными.

3 Обнаруженные совокупности признаков во времени образуют поток, который весьма близок к потоку Пуассона.

4 Время обработки данных о признаках является величиной случайной.

5 Обработанные в системе данные о признаках используются далее для принятия конечного решения задачи.

6 Разрабатываемая система предназначена для оценивания потенциальных возможностей СИВЧМ в зависимости от сложившейся обстановки.

Формализация модели системы строится исходя из следующих соображений.

В общем случае при изучении марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем, в описываемом графе состояний системы над стрелками, ведущими из состояния S_i в S_j , проставляют соответствующие интенсивности λ_{ij} . Такой граф состояний называют *размеченным* [70].

Пусть система S имеет конечное число состояний S_1, S_2, \dots, S_n . Случайный процесс, протекающий в этой системе, описывается вероятностями состояний $p_1(t), \dots, p_n(t)$, где $p_i(t)$ – вероятность того, что система S в момент t находится в состоянии S_i . Очевидно, для любого t выполняется соотношение (условие полноты описания):

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1. \quad (5.1)$$

Вероятности состояний $p_i(t)$ находят путем решения системы дифференциальных уравнений, имеющих следующий вид:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} p_j(t) - p_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}, \quad \text{где } i = 1, \dots, n. \quad (5.2)$$

Величина $\lambda_{ji}p_j(t)$ называется потоком вероятностей перехода из состояния Si в Sj , причем интенсивность потоков λ_{ij} может в общем случае зависеть от времени или быть постоянной.

Уравнения типа (5.2) составляют по размеченному графу состояний системы [70], пользуясь следующим *мнемоническим правилом*: производная вероятности каждого состояния равна сумме всех потоков вероятности, идущих из других состояний в данное состояние, минус сумма всех потоков вероятности, идущих из данного состояния в другие.

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для рассматриваемой ситуации. Она имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -(\zeta^+ + \lambda)p_1(t) + \zeta^- p_2(t) + v_3 p_4(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \zeta^+ p_1(t) - (v_2^- + \zeta^-)p_2(t) + v_2 p_4(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - v_1 p_3(t) \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = v_2^- p_2(t) + v_1 p_3(t) - (v_2 + v_3)p_4(t) \end{cases} \quad (5.3)$$

Здесь, как было отмечено выше, введены обозначения:

$$\zeta^+ = 1/T_{\Sigma}, \lambda = 1/\Delta t_{\text{пп}}, v_1 = 1/\Delta t_{\text{ип}}, v_2 = 1/\Delta t_{\text{нп}}. \quad (5.4)$$

Выше также были введены: показатель частоты срыва решения задачи ζ^- , 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 по рис.5.2, описываемому системой уравнений (5.3), матрица алгебраических уравнений A , вектор B (правой части) и вектор решений P будут иметь вид (5.5) (производные в левой части приравниваются нулю). При этом система преобразуется дополняется условием полноты, то есть, вместо четвертого уравнения используется условие $1 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$ (5.1):

$$A = \begin{bmatrix} -(\zeta^+ + \lambda) & \zeta^- & 0 & v_3 \\ \zeta^+ & -(v_2^- + \zeta^-) & 0 & v_2 \\ \lambda & 0 & -v_1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

В итоге решение уравнений вероятностей состояний системы:

$$P = A^{-1}B . \quad (5.6)$$

С учетом приведенного конкретного вида вектора В, решение будет представлять собой правый столбец матрицы, обратной А. Рассчитываемые вероятности характеризуют степень меры возможностей системы «Решение оператора» в соответствующем состоянии.

Показателем качества функционирования СИВЧМ является вероятность того, что каждая проблемная область, подозрительная на наличие искомого объекта (задача), возникающая перед системой, будет идентифицирована и решена при соответствующих значениях входящих в систему уравнений (5.5) параметрах.

Этот факт определяется составляющей p_2 вектора Р - соотношением для ее состояния S2. В итоге установлена аналитическая зависимость обобщенных характеристик «обстановки» ($\Delta t_{\text{ин}}$), «информационно-аналитической деятельности» ($\Delta t_{\text{ин}}$) и «нейтрализации проблемы» ($\Delta t_{\text{ин}}$), возникающей при функционировании описываемой модели системы. Следуя работе академика Анохина П.К. [68], получен, так называемый и определенный им «системообразующий фактор создания рассматриваемой системы» в форме соотношения (5.6).

В общем случае, при реализации системы можно задаться показателем уровня качества ее функционирования. Это - вероятность того, что задача дешифрирования местности, при поступлении кадров с заданной периодичностью - T_3 , будет успешно решена.

Рассмотренный синтез системы, на основе совокупности полученных соотношений, позволяет реализовать подход к сравнению вариантов ее построения.

5.2 Системное сравнение построения информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе традиционной оптико-электронной съемки и с применением видеоспектральной съемки

Полученный выше общий результат используется для количественного оценивания системой наблюдения характеристик процесса формирования зон, подозрительных на искомые объекты, - «образования проблемы» (частота λ), процесса предварительного обнаружения искомых объектов - «идентификации проблемы» (частота ν_1) и конечного дешифрирования – «процесса нейтрализации проблемы» (частота ν_2). То есть, рассматривается динамический процесс дешифрирования поступающей от средства наблюдения информации как результат взаимодействия наземного оператора с поступающей путем передачи на наземный пункт приема и обработки в виде последовательности видеок кадров информации. На рис.5.3 приведены результаты ИО ГИС поиска техногенного мусора для двух вариантов применения: на основе применения ВСС и использования традиционных данных ОЭС, полученные в ходе реального эксперимента по наблюдению фрагментов ОЧ РН на фоне травы в сентябре 2017 года [24]. После передачи данных по радиолинии на наземный пункт обработки осуществляется автоматическая предварительная обработка данных с выделением зон потенциального нахождения объектов поиска.

Применительно к ВС съемке весь полученный кадр укладывается на один экран монитора и к нему прилагается попиксельно совмещенный образ спектрального обнаружения искомых фрагментов. Данные, полученные на основе ОЭА, имеют разрешение в 5 раз более высокое. В эксперименте, в поле зрения ВС кадра, а также всех кадров для ОЭА, как предполагается, находятся 6 реальных объектов ОЧ РН с размерами от 0,5 до 2 метров.

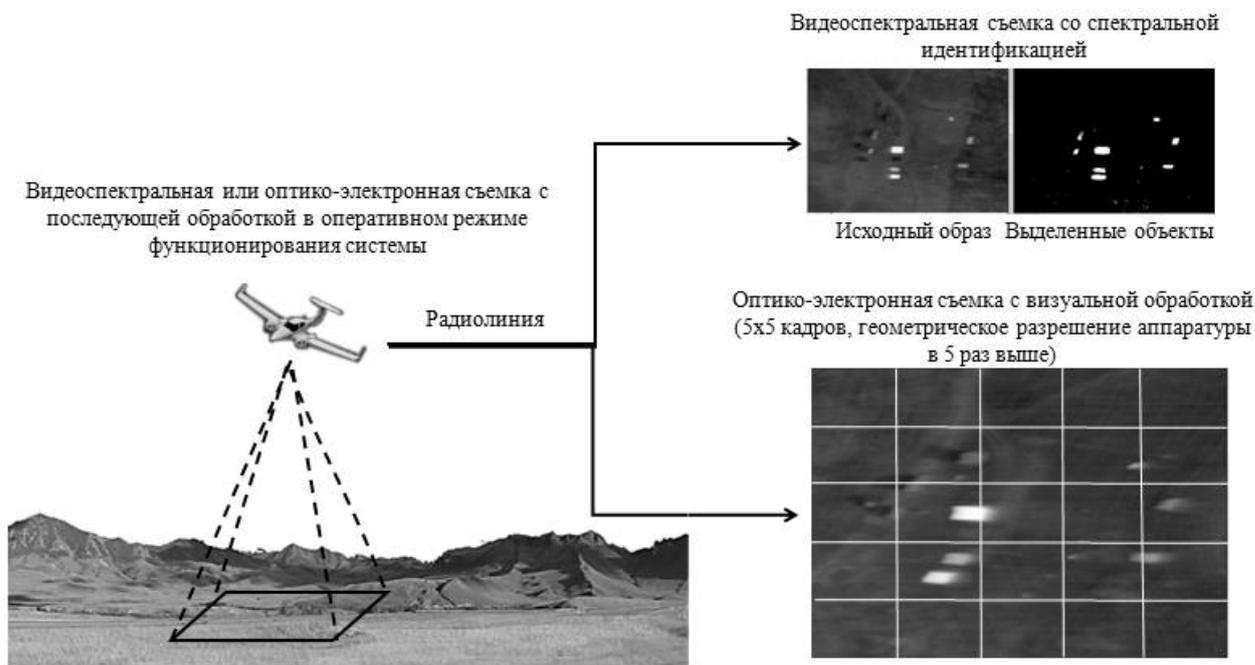


Рис. 5.3 – Формирование ИО ГИС поиска техногенного мусора для двух вариантов применения: на основе применения ВСС и использования традиционных данных от ОЭС

Для ВС системы исследовался конкретный вариант оперативного ИО ГИС поиска ОЧ РН для «критического» случая, - то есть при наблюдении системой достаточно мелких фрагментов, размеры которых соизмеримы с геометрическими элементами пространственного разрешения аппаратуры. Размеры формирующего кадра для ВС съемки составляли 2000 элементов (пикселей) по вертикали (по направлению вектора скорости) и 1000 элементов по горизонтали [24], что соответствует полномасштабному отображению кадра на экране монитора. Высота наблюдения – 1150 метров. Параметры аппаратуры соответствуют, на этой высоте, геометрическому разрешению на местности в 0,646 метра. Скорость движения носителя – 161 км/час. То есть, расстояние, соответствующее длине кадра в 2000 строк, носитель пролетает за время 28,9 секунд. Это время согласовано с длительностью экспонирования одной строки кадра – около 0,0145 сек. Такое время, как показывает практика применения ВС аппаратуры, обеспечивает достаточно высокое отношение сигнала к шуму для заданных параметров спектрального биннингования в 5 нм при обычных (высота

Солнца не ниже 30 градусов) условиях наблюдения. Отсюда частота поступления кадров $\zeta^+ = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{28.9} = 0,035$.

Оценку сбоя системы получения данных определим из следующих соображений. Рассмотрим автономно два состояния системы S1 и S2. Зададим вероятность исправной работы системы $p_3 = 0,98$. Это - вероятность правильного функционирования аппаратуры с учетом возможных сбоев средства формирования кадра из-за технических, внешних неполадок или ошибок его настроек. В этом случае первое уравнение в системе (5.3) вырождается в вид $\frac{dp_1(t)}{dt} = -\zeta^+ p_1(t) + \zeta^- p_2(t)$ при $p_1 + p_2 = 1$. Или, в статическом режиме, используя вышеприведенные соображения, приравнявая производную в левой части нулю, получим $\zeta^- = \frac{1-p_2}{p_2} \zeta^+$.

Учитывая, что в данном случае $p_2 = p_3$, рассчитаем

$$\zeta^- = \frac{1 - p_3}{p_3} \zeta^+ = \frac{1 - 0,98}{0,98} 0,035 = 0,0007.$$

Примем вполне реальное предположение, что на наблюдаемой в кадре площади может находиться, в среднем, $N_e = 10$ зон, обнаруженных отметками на видеокadre в виде зон, спектральные свойства которых соответствуют или близки спектрам искомых объектов, из них 6 истинные и 4 ложных[24]. Тогда временной интервал $\Delta t_{III} = \frac{T_3}{N_e} = \frac{28.9}{10} = 2,9$ сек. Отсюда $\lambda = \frac{1}{\Delta t_{III}} = 0,35$.

Исходя из накопленного опыта функционирования визуального дешифровщика, аналогичного анализу, приведенному в [18], зададим среднее время, требуемое оператору на обнаружение зоны, подозрительной на наличие объекта, как $\Delta t_{III} = 1,0$ сек. Тогда частота $\nu_1 = \frac{1,0}{\Delta t_{III}} = 1,0$.

Поскольку в системе наблюдения с применением ВС аппаратуры обработка данных предполагает не обезличенное обнаружение объектов поиска, а только таких, которые заведомо идентичны (или близки) по своим спектральным свойствам образцу, зададим высокую вероятность обнаружения реального объекта как $p_{III} = 0,98$. Данная высокая вероятность была

подтверждена в серии экспериментов [18], несмотря на соизмеримое значение геометрического разрешения на местности данных ВС и минимального размера объектов поиска. Отсюда, следуя по аналогии вышеприведенной схемы (использована при определении ζ^-), частота сбоя обнаружения объекта определится как $\nu_3 = 0,02$.

Опять же, исходя из накопленного опыта функционирования дешифровщика по распознаванию и обслуживанию обнаруженных на кадре зон, зададим время, требуемое оператору на обнаружение и обслуживание зоны, подозрительной на наличие объекта, как $\Delta t_{НП} = 2,0 \text{ сек}$. Тогда частота $\nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{НП}} = 0,5$.

В рассматриваемом варианте общее среднее время, необходимое для обработки принятых выше 10-ти зон, подозрительных на наличие искомого объекта, составит, в общей сложности, 30 сек (сумма $\Delta t_{НП}$ и $\Delta t_{ИП}$ умноженная на возможное число зон). Вместе с тем, общая длительность жизни кадра для дешифровщика составляет 28,9 секунд, отсюда, для данного случая, вероятность $p_{НП} = 0,98 * \frac{28,9}{30,0} = 0,95$. Тогда частота сбоя системы применительно к окончательному выявлению объекта определится как $\nu_2^- = \nu_2 \frac{1-p_{НП}}{p_{НП}} = 0,5 \cdot \frac{1-0,95}{0,95} = 0,03$.

В итоге заданы все требуемые для расчета вероятностей решения задачи применительно к используемым и обработанным данным на основе ВС.

В соответствии с выражением (5.6), вероятность решения задачи системой составит $p_2 = 0,94$ – это вторая составляющая вектора вероятности системы в состоянии S2 на графе рис.5.2.

Теперь рассмотрим второй вариант ИО ГИС поиска техногенного мусора – на основе данных ОЭА.

Схему построения ОЭА определим из соображения необходимости обнаружения объектов поиска размером 0,5 м на соизмеримой площади охвата местности по отношению к ВС съемке. Для выполнения условия правильного

обнаружения объектов поиска размером 0,5 м по уровню вероятности, равном 0,95, в соответствии с критерием Джонсона [71], разрешение на местности должно быть не менее 0,12 метра, что в 5 раз выше требуемого разрешения, чем для ВС съемки. При соизмеримом охвате местности примем панхроматическую ОЭА, состоящую из линейки 5-ти кадров аналогичного формата, с последовательной съемкой в количестве 5-ти раз. Таким образом, за аналогичное время полета носителя 28,9 секунд ОЭА сделает 5*5 кадров требуемого формата, геометрическое разрешение которых будет в 5 раз выше и составит 0,12 метра. При этом следует иметь в виду, что реальное, реализуемое для оператора, оптическое разрешение ОЭА обычно в 1,2-1,5 раза хуже [71].

Частота поступления такой линейки из 5 кадров составит $\zeta^+ = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{5,78} = 0,17$. Вероятность правильного функционирования системы примем ту же, что и выше: $p_3 = 0,98$. Отсюда $\zeta^- = \frac{1-p_3}{p_3} \zeta^+ = \frac{1-0,98}{0,98} 0,17 = 0,0035$.

Примем также, что на наблюдаемой в линейке из 5 кадров площади будет в среднем, $N_e = 10$ зон, две из них - истинные объекты поиска, 8 – ложные (число ложно обнаруживаемых зон для результатов первичной обработки данных ОЭА существенно больше). Отсюда временной интервал $\Delta t_{III} = \frac{T_3}{N_e} = \frac{5,78}{10} = 0,58$ сек.

Тогда $\lambda = \frac{1}{\Delta t_{III}} = 1,73$.

Зададим время, требуемое оператору на обнаружение зоны, подозрительной на наличие объекта: $\Delta t_{II} = 1,5$ сек. Увеличенное время обусловлено необходимостью перемещения между зонами ввиду того, что все 5 кадров линейки не уместятся полностью на экран в полном масштабе. Отсюда частота $\nu_1 = \frac{1}{\Delta t_{II}} = 0,7$. Вероятность обнаружения объекта поиска зададим по критерию Джонсона [71] в соответствии приведенными выше условиями съемки ОЭА как $p_{III} = 0,95$.

Отсюда, следуя по аналогии с вышеприведенной схемой (использована при определении ζ^-), частота сбоя обнаружения объекта определится как $\nu_3 = 0,035$.

Зададим время, требуемое оператору на обслуживание зоны, подозрительной на наличие объекта: $\Delta t_{НП} = 2,0 \text{ сек}$. Отсюда частота $\nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{НП}} = 0,5$. Вероятность нейтрализации одной проблемы определим также по критерию Джонсона в соответствии приведенными выше условиями съемки ОЭА как $p_{НПО} = 0,8$, исходя из соображений различения объектов поиска по 2-му уровню («определение ориентации»). Допущенное упрощение в данной конкретной задаче допустимо ввиду того, что обломки не имеют конкретной геометрической конфигурации, а условия их поиска обычно не связаны с множеством однотипных объектов.

В рассматриваемом варианте общее среднее время, необходимое для обработки принятых выше 10-ти зон в линейке, подозрительных на наличие искомого объекта, составит, в общей сложности, 35 сек. Вместе с тем, общая длительность жизни линейки для дешифровщика составляет 5,78 сек, отсюда, для данного случая, вероятность $p_{НП} = 0,8 * \frac{5,78}{35} = 0,13$. Тогда частота сбоя системы применительно к окончательному выявлению объекта определится как $\nu_2^- = \nu_2 \frac{1-p_{НП}}{p_{НП}} = 0,5 * \frac{1-0,13}{0,13} = 3,28$.

При принятых выше параметрах системы, для данных на основе ОЭА, в соответствии с выражением (5.6), рассчитанная вероятность решения задачи составляет $p_2 = 0,12$.

То есть, для принятых выше параметров, в рассмотренном варианте систему оперативного поиска объектов на основе съемки ОЭА 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 и уменьшив $\Delta t_{НП}$ до 1 секунды, получим, что вероятность решения задачи составляет $p_2 = 0,75$.

То есть, решение задачи оперативного визуального поиска фрагментов ОЧ РН на основе съемки ОЭА 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 ВС съемки, в рассматриваемом варианте расчета, в среднем в 5 раз выше по сравнению с применением ОЭА. Необходимо также учесть упрощение задачи нахождения ОЧ РН в соответствии с критерием Джонсона [71] по 2-му уровню различения (определение ориентации объекта наблюдения). Реально для полноценного решения задачи с помощью ОЭА требуется использование 3-го уровня различения, что приводит к повышению разрешения на местности до 2,5-5 см. Из этого следует дополнительное увеличение ресурсов аэрофотосъемки и привлечения операторов.

Как это следует из вышеприведенного описания, вероятностные оценки результатов функционирования средства поиска, того или иного построения, существенно зависят от квалификации используемых операторов, параметров аппаратуры, принятой схемы построения системы. Однако, в любом случае, что также подтверждается данными зарубежных источников [72]-[74], для оперативного режима решения подобных задач весьма существенным преимуществом обладают именно системы, построенные на основе ВС съемки. Так, в военном применении систем с конечной идентификацией до типа объекта наблюдения, где фактор времени оперативной обработки поступающих данных особенно важен, именно такое использование средств ВС съемки является, по сути, традиционным. Здесь, на первом этапе, на основе ВС образа сначала спектрально выделяются объекты поиска, а затем, на втором этапе, с использованием данных синхронной съемки с ОЭА более высокого разрешения, осуществляется конечная идентификация (до типа) зон, подозрительных на конкретные объекты наблюдения.

5.3 Практические рекомендации по построению информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора с применением воздушной видеоспектральной съемки

На основе разработанных моделей и построенных на их основе методик первичной, предварительной и тематической обработки данных ВСС можно сделать ряд практических рекомендаций по построению системы ИО ГИС поиска техногенного мусора. Полученные результаты однозначно позволяют определить алгоритм обработки данных ВСС для ИО ГИС поиска техногенного мусора, реализованный в разработанном ПО и представленный на рис.5.4.

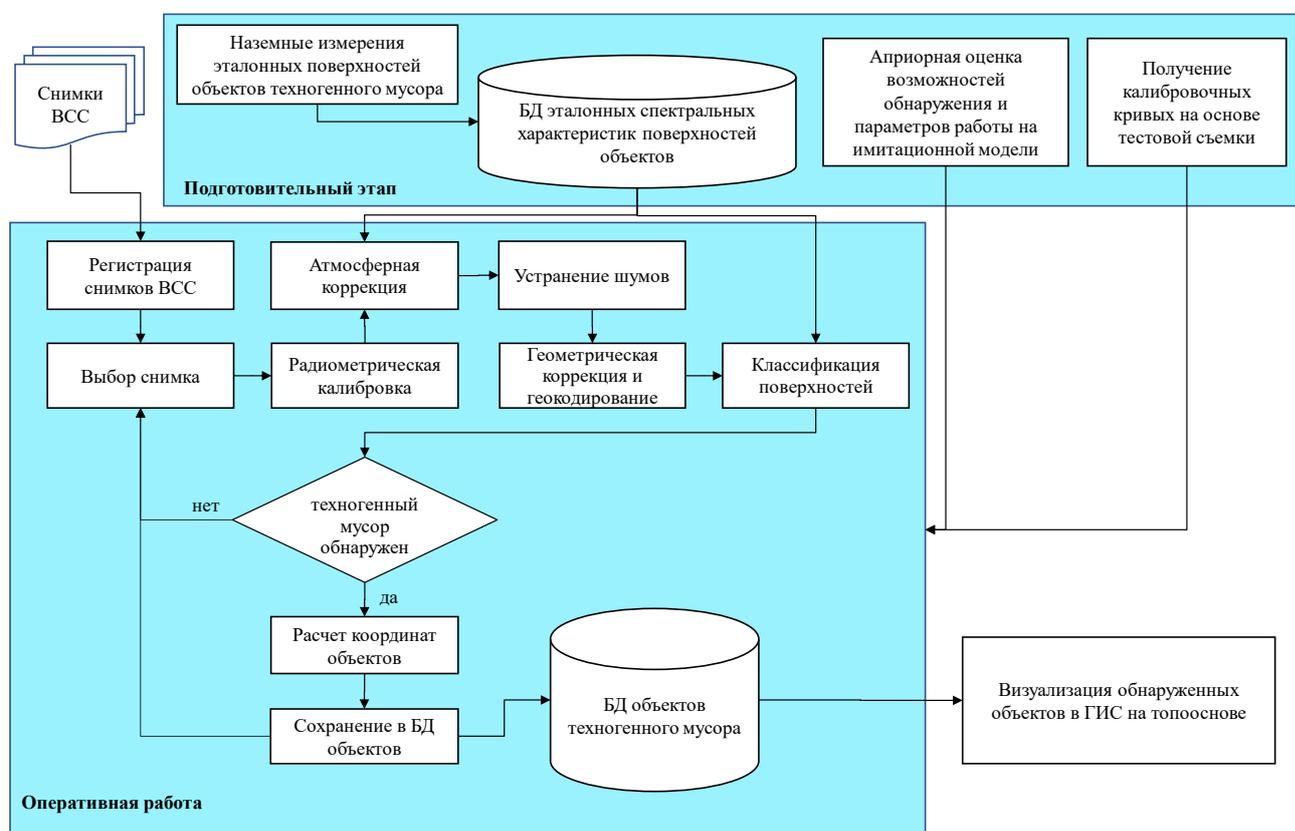


Рис.5.4 – Алгоритм обработки данных ВСС для ИО ГИС поиска техногенного мусора, реализованный в разработанном ПО

В целом обработка разделяется на два основных этапа:

- подготовительный – выполняется заблаговременно до проведения аэросъемки;

– оперативная работа – непосредственная оперативная работа поиска объектов техногенного мусора с помощью воздушной ВСС в целях ИО ГИС поиска техногенного мусора.

На «подготовительном» этапе должны быть выполнены следующие операции:

– проведение наземных измерений спектральных характеристик КСЯ искомым объектов техногенного мусора с занесением в БД, обычно они выполняются с пространственным и спектральным разрешениями, соответствующими требуемым значениям в системе реализации обработки на наземном комплексе;

– априорная оценка возможностей по обнаружению заданных объектов техногенного мусора с помощью разработанной ИМ с подбором наиболее чувствительных метрик спектральной идентификации и порогов ее применения;

– расчет калибровочной кривой радиометрической калибровки на основе тестовой ВСС, такую калибровку целесообразно проводить минимум раз в полгода (а по возможности – раз в месяц или непосредственно перед применением).

На этапе «оперативной работы» должны быть выполнены следующие операции, реализованные в ПО, опубликованном в [75]-[81] в виде зарегистрированных программ для ЭВМ:

– первичную обработку данных ВСС, включая радиометрическую калибровку, спектральный биннинг (при необходимости) и атмосферную коррекцию на основе разработанных методик;

– предварительную обработку данных ВСС, включая компенсацию шумовых искажений, комбинированную геометрическую коррекцию и геокодирование на основе разработанных методик;

– тематическую обработку данных ВСС на основе предложенных метрик спектральной идентификации с выдачей карты идентификации поверхностей (зон интереса с возможным содержанием объектов техногенного мусора);

- обнаружение (выделение) на снимке объектов техногенного мусора на основе полученной карты идентификации поверхностей;
- автоматический расчет координат обнаруженных объектов на основе модели геокодирования и занесение их в БД обнаруженных объектов.

При этом подразумевается, что операции первичной, предварительной и тематической обработки могут быть выполнены в автоматическом режиме, оператору лишь остается дешифровать «подсвеченные» области снимка, выделенные в процессе тематической обработки, на предмет наличия в нем объекта мусора и сохранить их в БД ИО ГИС.

Обнаруженные объекты техногенного мусора являются ИО ГИС и, после занесения их в БД, они отображаются в ГИС на топооснове, что позволяет оперативно использовать эту информацию для ликвидации техногенных загрязнений.

Как это было показано в работе, «наихудшие» условия ФОО соответствуют случаю, когда объекты наблюдения соразмерны с величиной геометрического разрешения используемой аппаратуры, а спектральные контрасты минимальны (с учетом также возможного частичного маскирования искомым объектом фоном). В этих условиях целесообразный выбор величины скользящего нелинейного биннинга данных выбирается в 5 нанометров без информационной потери в ходе последующей идентификации данных ВСС.

Как показано в работе, по оценкам конечного качества решения задачи, преимущество оперативного построения системы на основе ВСС, перед ее реализацией на основе традиционной ОЭС, составляет до 5 раз по показателю производительности. При этом несколько выше вероятность решения конечной задачи. Это позволяет утверждать, что средства ВС съемки, применительно к ИО ГИС поиска техногенного мусора, имеют подавляющее превосходство перед традиционно построенными системами с прямой идентификацией визуального поиска объектов оператором – дешифровщиком.

Это превосходство реализуется не только за счет собственно самого использования систем получения данных на основе ВСС, но и, как это показано,

за счет рационального построения ПО системы с применением разработанных методик первичной, предварительной и тематической обработки. При этом настройки реализации этой обработки для повышения качества решения той или иной задачи поиска техногенных загрязнений, по каждому типу используемой аппаратуры, априорно определяются с помощью специально разработанной для этой цели ИМ. На ее же основе априорно выбираются наиболее рациональные режимы съемки – высота полета носителя его скорость, время экспонирования, настройки подавления помех, а также типы метрик спектральной идентификации.

5.4 Выводы

1. В связи с априорной неоднозначностью выбора подхода к построению оперативного информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора разработана методика системного оценивания эффективности оперативного информационного обеспечения ГИС на основе данных как обычной ОЭС, так и по результатам ВСС.

2. Применение видеоспектральной аппаратуры и использование разработанных методик первичной, предварительной и тематической обработки данных видеоспектральной съемки, позволяет, как показала приведенная выше методика системного оценивания, в 5 раз повысить оперативную производительность оператора визуального поиска ГИС на основе ВС съемки по сравнению с традиционным применением оптико-электронной аппаратуры, при более высокой вероятности решения задачи.

Заключение

В результате исследований по решению научно-технической задачи разработки моделей и методик информационного обеспечения ГИС поиска техногенного мусора на основе применения воздушной видеоспектральной съемки предложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, которые в отличии от известных подходов позволяют решить конечную задачу идентификации техногенного мусора с требуемым качеством, включая:

1. Разработаны модели, методики и программное обеспечение первичной обработки данных ВСС, в том числе: 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 калибровку *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: модель и методика компенсации шумовых искажений данных ВСС, модель и 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 ИО 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 производительность* системы распознавания техногенного мусора в сравнении к стандартному применению ОЭС для ИО 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.

Список литературы

- 1 Васильева И.К., Попов А.В., Ельцов П.Е. Математическое моделирование в геоинформационных системах. Учебное пособие.- Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 2014. – 100 с.
- 2 Карлин Л.Н., Абрамов В.М. Управление энвироментальными и экологическими рисками. Учебное пособие.- СПб.: РГГМУ, 2006. - 322 с.
- 3 Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книги 1 и 2// Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.- М.: Радиотехника, 2016.
- 4 Трубина Л.К. Геоинформационные системы. Конспект лекций. – Новосибирск, 2012. – 35с.
- 5 Райкунов Г.Г., Щербаков В.Л. и др. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / Под ред. Райкунова Г.Г.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 136с.
- 6 Козодеров В.В., Косолапов В.С., Ушаков С.А. и др. Космическое землеведение: информационно-математические основы. - М.: МГУ, 1998.- 572с.
- 7 Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. - МО СССР, 1986. - 155 с.
- 8 Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. - Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1947. - 138 с.
- 9 Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков//Под ред. К.Я. Кондратьева.-Л.: Гидрометеиздат, 1981.-232с.
- 10 Беляев Ю.В., Крот Ю.А., Веллер В.В. и др. Схемы и методики передачи СПЭЯ при калибровке аппаратуры высокого пространственного разрешения и большой апертуры //Тезисы доклада на Десятой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 12-16 ноября 2012 г. М.: ИКИ РАН (электронный сборник).
- 11 SR-3500 Series Spectroradiometer /SM-3500 Series Spectrometer Operator’s Manual / 2013. Spectral Evolution, Inc.1 Canal St. Unit B-1 Lawrence, MA 01840, USA, -17p.

- 12 *Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Дубровицкий Д.Ю., Зубков Б.В., Яковлев Б.А.* Оценка спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометра АГСМТ-1, Препринт ИПМех РАН, №704, 2002.
- 13 *Лысенко С.А.* Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 09. С. 775-788.
- 14 *Белов В.В., Тарасенков М.В.* Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, №5. С.397-403.
- 15 *Liao L. et al.* Performance Characterization of the Hyperion Imaging Spectrometer Instrument // Proc. of SPIE, Vol. 4135, pp. 254- 263. (2000).
- 16 *Szekiela K.H., Bowles J.H., Gillis D.B., Miller W.D.* Interpretation of Absorption Bands in Airborne Hyperspectral Radiance Data // Sensors, 9, pp. 2907-2925. (2009)
- 17 *Berk A. et al.* MODTRAN 5.2.0.0 USER 's MANUEL.-Spectral Sciences, INC. July 2008.-100p. (lex@spectral.com)
- 18 Комплекс аппаратно-программный для контрольно-измерительной, метрологической и поверочной аппаратуры измерения основных характеристик гиперспектральных средств наблюдения (математические, методические и программные аспекты реализации). Технический проект. – СПб.: СПб филиал ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА», 2011. - 557с.
- 19 *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010.-560с.
- 20 *Kruse F.A.* Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric correction using low altitude AVIRIS data of Boulder, Colorado // Proc. of the AVIRIS Earth Science and Applications Workshop. 31 March – 2 April. 2004.
- 21 *Остриков В.Н., Плехотников О.В.* Калибровка гиперспектральных данных авиационной съемки по сопутствующим наземным измерениям эталонных поверхностей наблюдаемых сцен // Исследование Земли из космоса, 2013, №6, с.38-42.

- 22 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Обработка гиперспектральных данных, получаемых с авиационных и космических носителей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М.: ИКИ РАН, 2013. Т.10, №2. С.243-251.
- 23 *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.
- 24 *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.
- 25 *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. -М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. -375с.
- 26 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Шулика К.М.* Имитационно-модельное исследование влияния качества оптической системы гиперспектрометра на вероятность различения спектров//В кн. «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА» /Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.- М.: Радиотехника, 2016. С.538-549.
- 27 *Чабан Л.Н., Берёзина К.В.* Метод коррекции пространственного сдвига спектральной калибровки на гиперспектральных изображениях в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2014. – № 6. –С. 96–103.
- 28 *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.
- 29 *Волков Е.А.* Численные методы. - М.: Наука, 1987.-538с.

- 30 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Чапурский Л.И.* Оценка возможностей космического гиперспектрометра «Ресурс-П» на основе модельной имитации «кубов» с применением баз данных высокого пространственного разрешения /Труды II всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Под общей ред. С.С.Суворова.- СПб: ВКА им.А.Ф. Можайского, 2012. Т. II, с. 278-283.
- 31 *Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Влияние предварительной обработки данных гиперспектральной съемки на качество их тематического анализа // Исследование Земли из космоса, 2014, №1, с.1-6.
- 32 View Spec Pro. User Manuel. ASD Inc. 2008.pp.25 (www.asdi.com)
- 33 *Орлов А.Г.* Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук / ИКИ РАН- Москва, 2008. - 163 с.
- 34 *Chavez, Pat S.* "Image-based atmospheric corrections-revisited and improved." Photogrammetric engineering and remote sensing 62.9 (1996): 1025-1035.
- 35 *Белов А.М., Мясников В.В.* Атмосферная коррекция гиперспектральных изображений с помощью приближенного решения уравнения переноса MODTRAN // Компьютерная оптика, 2014, том 38, №3. – С. 489-493.
- 36 *Воронцов Д.В., Егоров В.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Родионова И.П.* Принципы обработки гиперспектральной информации и результаты летных испытаний прототипа авиационного гиперспектрометра, Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», №4,2006, с.27-37.
- 37 *Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Калинин А.П., Котцов В.А., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В.* Методика имитационного моделирования гиперспектральных изображений земной поверхности // Исследование Земли из космоса, №5, 2007,с. 21-29.
- 38 *Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В.* Источники и приемники излучения. – СПб.: Политехника, 1991.- 240с.

- 39 *Анатольев А.Ю., Федына А.М., Шабakov Е.И.* Математическое моделирование сквозного тракта космической оптико-электронной системы наблюдения. - СПб. : ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999.-71с.
- 40 *Börner A., Wiest L., Reulke R., Richter R.* SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems/ Proc. of Remote Sensing and photogrammetry Society Conference 2008 “Measuring change in change in the Earth system ”/ University of Exeter, 15-17 September 2008.
- 41 *Гудмен Дж.* Статистическая оптика. - М.: Мир, 1988. – 327с.
- 42 *Остриков В.Н., Плaxотников О.В., Кириенко А.В.* Модельная оценка влияния шума гиперспектрометра БЛА на вероятность спектральной идентификации наблюдаемых объектов //В кн. «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Кн.2: Робототехнические комплексы на основе БЛА», ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.- М.: Радиотехника, 2016. С.567-579.
- 43 CMOSIS_cmv2000_2.pdf// www.1stvision.com (2019)
- 44 *Оков И.Н., Остриков В.Н., Плaxотников О.В.* Способ уменьшения шума электронного изображения. Патент на изобретение № 2491629. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 августа 2013г.
- 45 *Бурлов В.Г., Остриков В.Н.* Обеспечение устойчивости государственного управления на основе синтеза методов повышения качества в системах первичной обработки видеоданных в рамках концепции логико-алгебраического подхода и его связи с теорией адаптивной оптимизации контрастных функций / «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке», Матер. XVII Междун.научно-метод.конф. 11-12 февраля 2010г. Том 3. Национальная безопасность.- СПб: 2010. С.92-102.
- 46 *Назаров А.С.* Фотограмметрия. - Мн.: ТетраСистемс, 2006. - 368 с.
- 47 *Лобанов А.Н.* Аэрофототопография. – М.: Недра, 1978. – 575 с.
- 48 *Никишин Ю.А.* Разработка и исследование методов геометрической коррекции и фотограмметрической обработки материалов воздушной нестабилизированной гиперспектральной съемки. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук / МИИГАиК - Москва, 2011. - 135 с.

- 49 *Остриков В.Н., Кириенко А.В.* Навигационно-корреляционная коррекция изображений, искаженных взаимными сдвигами строк // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009.Т.7, №7. С. 52-57
- 50 *Аганов С.В.* Фотограмметрия сканерных снимков. – М.: Картгеоцентр: Геодезиздат, 1996. - 176 с.
- 51 *Бурлов В.Г., Остриков В.Н.* Обеспечение устойчивости государственного управления на основе синтеза методов повышения качества в системах первичной обработки видеоданных в рамках концепции логико-алгебраического подхода и его связи с теорией адаптивной оптимизации контрастных функций / «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке», Матер. XVII Междун.научно-метод.конф. 11-12 февраля 2010г. Том 3. Национальная безопасность.- СПб: 2010. С.92-102.
- 52 *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. - М.: ИКИ РАН, 2013. Т.10, №2. С.243-251.
- 53 *Vermote E., Tanre D. et al.* Second Simulation of the Satellite Signal in the solar Spectrum. User Guide Version 2. Department of Geography. NASA –Goddard Space Flight Center-Code 923, Greenbelt, MD 20771, USA. July 1997.
- 54 *Richter R.* Model SENSAT: A Tool for Evaluating the System Performance of Optical Sensors, Proc. SPIE, 1312, 1990, pp.286–297.
- 55 *Schläpfer D., Boerner A., and Schaepman M.* The Potential of Spectral Resampling Techniques for the Simulation of APEX Imagery based on AVIRIS Data. Summaries of the Eighth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL, Pasadena (CA), 1999,-17:377-384.
- 56 *Wiest L., Reulke R.* Radiometric Simulation and Verification of the Line Scanner Camera WAAC. Proc. Fourth Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition /21st Canadian Symposium on Remote Sensing.V.II,1999, pp. 24-31.
- 57 *Börner A., Wiest L., Reulke R., Richter R.* SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems/ Proc. of Remote Sensing and photogrammetry

Society Conference 2008 “Measuring change in change in the Earth system ”/ University of Exeter, 15-17 September 2008.

58 *Watson M.A., McAllister I., Geatches R.M.* Hyperspectral Scene Assessment and Simulation. Advanced Technology Centre, Sowerby Building Filton, Bristol, BS34 7QW.

59 *Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Кудрявцев С.В., Николенко А.А.* Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичных видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2, с.111-121.

60 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Шулика К.М.* Имитационная модель преобразования снимков авиационного спектрометра на условия наблюдения из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М.: ИКИ РАН. - 2012. Т.9, №2. С.167-172.

61 *Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Калинин А.П., Котцов В.А., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В.* Методика имитационного моделирования гиперспектральных изображений земной поверхности // Исследование Земли из космоса, №5, 2007, с. 21-29.

62 *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. - М.:Физматлит, 2005.-375с.

63 *Остриков В.Н., Кириенко А.В., Плахотников О.В., Смирнов С.И., Михайлов В.В.* Обработка гиперспектральных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613042. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2013 г.

64 *Смирнов С.И., Михайлов В.В., Остриков В.Н.* Поэтапная классификация гиперспектральных данных в пространстве коэффициентов спектральной яркости//В кн. «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА», под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.- М.: Радиотехника, 2016. С.518-528.

65 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Шулика К.М.* Имитационно-модельное исследование влияния качества оптической системы гиперспектрометра

на вероятность различения спектров//В кн. «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА» //Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.- М.: Радиотехника, 2016. С.538-549.

66 *Бурлов В.Г.* Методологические основы моделирования социально - экономических и политических процессов (Модели. Технологии.). - СПб: СПб ГПУ, 2006. – 287с.

67 *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 //В кн. «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА», под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г.- М.: Радиотехника, 2016. С.529-538.

68 *Анохин П.К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности – М.: «Наука», 1979. – 454 с.

69 *Бурлов В.Г.* Логико-алгебраическая концепция построения системы и ее приложение для синтеза системы защиты информации // В кн. «Безопасность информации регионов России» по материалам Научно-технической конференции 13-15.10.1999 г. – СПб: СПИИРАН,1999.

70 *Мирошин Р.Н.* О некоторых решениях интегрального уравнения Колмогорова – Чепмена // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Сер.1: Математика, механика, астрономия. 2007. Вып.4. С.22-29.

71 *Студитский А.С.* Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. –М: МНПО «Спектр», 2013. 112с.

72 *Helmut Haase* Evaluating the Quality of Scientific Visualizations: The Q-VIS Reference Model// Proc. of SPIE. Vol. 3298 (1998). – pp. 123-131.

73 *Michael Koligman, Anthony Copeland* Real-Time Airborne Hyperspectral Detection Systems// Proc. of SPIE. Vol. 4049 (2000). – pp. 230-238.

74 *William B. Kendall* Real-time geo-spatial registration of target images from the WAR HORSE sensor// Proc. of SPIE. Vol. 4741 (2002). – pp. 282-288.

75 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* «Радиометрическая калибровка данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613039. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2013 г.

76 *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* «Оценка качества данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613040. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2013 г.

77 *Остриков В.Н., Кириенко А.В., Плахотников О.В., Смирнов С.И., Михайлов В.В.* «Обработка гиперспектральных данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613042. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2013 г.

78 *Кириенко А.В., Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Модельно-экспериментальная радиометрическая калибровка гиперспектральных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616087. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.06.14 г.

79 *Кириенко А.В., Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Модельно-экспериментальная спектральная коррекция данных гиперспектральной аппаратуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616088. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.06.14 г.

80 *Кириенко А.В., Остриков В.Н.* Геометрическая коррекция данных воздушной гиперспектральной съемки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616089. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.06.14 г.

81 *Кириенко А.В., Остриков В.Н.* Модельно-экспериментальная оценка спектрального разрешения данных гиперспектральной аппаратуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614600. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.04.14 г.