

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

На правах рукописи



Рыжиков Дмитрий Михайлович

**КОНТРОЛЬ ЗОН ПРОИЗРАСТАНИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО
ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН
ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Якимов Александр Николаевич

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Анализ существующих методов неразрушающего контроля и возможностей их применения для мониторинга природной среды и сельскохозяйственных территорий	11
1.1. Методы неразрушающего контроля природной среды.....	11
1.2. Основные задачи космического мониторинга природной среды	13
1.3. Системы дистанционного зондирования Земли	15
1.4. Методы обработки спутниковых данных о растительном покрове земной поверхности.....	21
1.5. Решение задач контроля природной среды и сельскохозяйственных территорий с использованием спутниковых данных.....	36
1.6. Особенности контроля борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования Земли	38
Выводы по разделу 1	39
2. Разработка информационной модели зон произрастания борщевика Сосновского по данным полевого портативного спектрорадиометра и спутниковым данным космической системы RapidEye	41
2.1. Выбор исходных спутниковых данных	41
2.2. Выбор типа информативных признаков для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным	44
2.3. Информационная модель зон произрастания борщевика Сосновского по данным полевого портативного спектрорадиометра.....	47
2.4. Информационная модель зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным космической системы RapidEye	62
Выводы по разделу 2	71
3. Разработка способа неразрушающего контроля и алгоритма обработки спутниковых данных для контроля зон произрастания борщевика Сосновского	72
3.1. Информативные признаки зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным космической системы RapidEye	72
3.2. Вегетационный индекс борщевика Сосновского на основе спутниковых данных.....	87
3.3. Структурная схема алгоритма, реализующего способ неразрушающего контроля зон произрастания борщевика Сосновского	96
3.4. Алгоритм обработки спутниковых данных космической системы RapidEye для распознавания борщевика Сосновского	99
3.5. Программная реализация алгоритма обработки спутниковых данных для контроля зон произрастания борщевика Сосновского	100
Выводы по разделу 3	103

4. Тестирование способа неразрушающего контроля зон произрастания борщевика Сосновского и его адаптация для использования спутниковых данных различных космических систем	105
4.1. Тестирование способа контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным о территории Ленинградской области.....	105
4.2. Аprobация результатов тестирования способа контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным космической системы RapidEye	109
4.3. Адаптация разработанного способа для контроля зон произрастания борщевика Сосновского по данным других космических систем дистанционного зондирования Земли	111
4.3.1. Адаптация разработанного способа для контроля зон произрастания борщевика Сосновского по данным LandSat-8	111
4.3.2. Адаптация разработанного способа для контроля зон произрастания борщевика Сосновского по данным Sentinel-2А	123
4.4. Рекомендации по применению разработанного способа контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным о территории Ленинградской области	130
Выводы по разделу 4	131
Заключение	133
Список сокращений и условных обозначений	136
Список литературы.....	137
Приложение А. Пример файла данных *.sed PSR-1100 – соцветие БС, стадия цветения	161
Приложение Б. Тестовые участки борщевика Сосновского, КА RapidEye.....	172
Приложение В. Тестовые участки, КА RapidEye	181
Приложение Г. Тестовые участки, КА LandSat-8	204
Приложение Д. Тестовые участки, КА Sentinel-2А.....	212
Приложение Е. Акты о внедрении	218

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Вид растений борщевик Сосновского (БС) культивировался в СССР во второй половине XX века как силосная культура. Впоследствии результаты его использования, неудовлетворительные по ряду причин, привели к отказу от его систематического выращивания. Способность БС к неконтролируемому распространению и, как следствие, захвату территорий сельскохозяйственного назначения, а также представление опасности для людей как возможной причины получения ожогов или обострения аллергических заболеваний послужили признанием данного вида растений экологически опасным. Однако высокий биологический потенциал, заложенный в БС при его селекции, позволяет специалистам сельскохозяйственной отрасли рассматривать растения данного вида как ценное сырье для фармацевтики, производства спиртов и древесного угля.

Важной задачей является выявление зон произрастания БС с целями уничтожения или использования, а также прогноза распространения. Вследствие высокой пространственной неоднородности и временной изменчивости внешнего облика растений БС методы контроля зон произрастания БС недостаточно проработаны к настоящему моменту. Распространенные в настоящее время методы визуального контроля, применяемые в рамках полевых исследований, трудны с точки зрения формализации, опасны для человека, имеют высокую стоимость, малую исследуемую площадь и носят субъективный характер. В свою очередь данные дистанционных исследований являются объективными, охватывают значительные площади, имеют низкую стоимость.

Широкое распространение для решения задачи контроля природной среды получили методы обработки данных об отраженном излучении радиодиапазона. Значительный вклад в развитие данных методов внесли работы А.А. Синевой, В.В. Мелентьева, Т.Н. Чимитдоржиева, А.В. Базарова, В.Н. Копылова, Ю.М. Полищука и др. Однако труднодоступность и высокая стоимость данных радиолокационного зондирования природной среды ограничивают возможности применения данных методов контроля.

Задача контроля природной среды может эффективно решаться с использованием данных отраженного излучения оптического диапазона. Значительное количество спутников пассивного зондирования и архивов аэрофотосъемки определяют доступность исходных материалов для исследования и их низкую стоимость. Методы исследования характеристик отраженных волн оптического диапазона наиболее полно освещены в работах К.Я. Кондратьева, Е.Л. Крынова, Л.И. Чапурского, О.В. Григорьевой, А.Н. Григорьева, А.М. Baldrige, S.J. Hook, C.I. Grove, G. Rivera, E.D. Paylor II, J.W. Salisbury и др.

Методы контроля и оценки природной среды посредством исследования характеристик отражения волн оптического диапазона, предложенные в многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов, различаются по исследуемым объектам и контролируемым параметрам, однако в подавляющем большинстве, не могут применяться для контроля зон произрастания БС. Существующие методы контроля не предусматривают дифференцированного подхода к восстановлению значений характеристик отражения БС и не учитывают их отличия от других природных и антропогенных объектов.

Предлагаемый в настоящей работе способ контроля зон произрастания БС по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона, содержащихся в спутниковых данных, основан на использовании специфических свойств отраженных волн оптического диапазона в его различных поддиапазонах (мультиспектральные данные), на основе которых построена информационная модель БС и определены информативные признаки БС, необходимые для его обнаружения и определения контролируемых параметров зон произрастания. При разработке способа анализировались данные спутникового зондирования Земли и в качестве базовой опорной информации – результаты измерений полевым портативным спектрометрическим прибором.

Предложенный способ с применением данных спутниковой съемки необходим для контроля распространения БС на всей площади отдельных регионов Российской Федерации для организаций, занимающихся уничтожением или переработкой БС, а также для информирования населения. Обработка регулярно обновляемых мультиспектральных спутниковых данных позволит получать результаты по изменчивости территорий, занятых БС, и определению векторов его распространения на отдельных участках местности. При использовании БС в качестве сырья разработанный способ позволит также оценить показатель его урожайности. Важность и полезность указанных направлений исследований для народного хозяйства страны свидетельствуют об актуальности темы работы и решаемых задач.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка способа и алгоритма оперативного контроля зон произрастания БС, обеспечивающих эффективный мониторинг местоположения и направления его распространения по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона, полученным из одновременных спутниковых данных.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка способа оптического неразрушающего контроля зон произрастания БС в период фазовых состояний цветения и плодоношения по мультиспектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона.

2. Разработка информационной модели зон произрастания БС на основе свойств оптического электромагнитного излучения, отраженного БС, по измерениям полевого портативного спектрорадиометра и спутниковым данным в рамках разрабатываемого способа оптического контроля.

3. Разработка спектрального индекса *Heracleum Sosnowskyi Index* (HSI), позволяющего производить распознавание БС по отраженному сигналу оптического диапазона, зафиксированному в спутниковых данных информативных признаков зон произрастания БС на различных космических аппаратах (КА).

4. Разработка решающих правил, позволяющих производить обнаружение растительности и распознавание БС по мультиспектральным спутниковым данным.

5. Разработка алгоритмического и программного обеспечения (ПО), реализующего предлагаемый способ оптического контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным.

6. Выполнение расчета индекса HSI и исследование распространения и изменчивости зон произрастания БС по территории Ленинградской области (ЛО) с помощью разновременных данных космических систем различного пространственного разрешения (ПР) (RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A) с использованием разработанного способа оптического контроля.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются спектральные характеристики волн оптического диапазона, отраженных от БС, а предметом исследования – способы и алгоритмы контроля зон произрастания БС по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона.

Методы исследования

В работе использованы методы теории вероятностей и математической статистики, теории неразрушающего контроля, теории распространения электромагнитных волн, теории распознавания образов, оптики, спектрометрических измерений поверхностей, геоинформатики, дистанционного зондирования Земли.

Научная новизна

1. Разработан способ оптического неразрушающего контроля зон произрастания БС, отличающийся тем, что в качестве исходных данных используются спектральные характеристики отраженных сигналов оптического диапазона, что позволяет решать задачу распознавания БС и контроля зон произрастания БС дистанционно с учетом специфики отражательных характеристик БС в отдельных поддиапазонах.

2. Построена информационная модель зон произрастания БС, отличающаяся тем, что в качестве признаков используются свойства отраженных от БС волн в различных поддиапазонах оптического диапазона, что при использовании совместно с математической моделью позволяет проводить контроль зон произрастания БС по отраженному сигналу оптического диапазона.

3. Разработан спектральный индекс HSI, отличающийся тем, что учитываются особенности отражения электромагнитных волн оптического диапазона от БС в различных поддиапазонах, что позволяет применять спутниковые данные различных КА для решения задачи распознавания БС.

4. Предложены решающее правило обнаружения растительности по малому числу информационных признаков и решающее правило распознавания БС, отличающиеся тем, что используются спектральные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) и HSI, что позволяет проводить контроль зон произрастания БС дистанционно с учетом специфики отражательных характеристик БС в отдельных поддиапазонах.

5. Предложен и программно реализован алгоритм создания специализированных карт, отличающийся тем, что использование спектральных характеристик в различных поддиапазонах волн позволило разработать обобщенный критерий принятия решений, что дало возможность проводить контроль зон произрастания БС по разновременным спутниковым данным и оценивать динамику распространения БС.

Практическая значимость

Направление диссертационного исследования тесно связано с критическими технологиями РФ (технологиями мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения, технологиями предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера), утвержденными Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

Результаты исследования использованы в ходе выполнения работ по Государственному контракту №325-15 («Тематическая обработка данных дистанционного зондирования Земли (снимков космических аппаратов), созданию тематических слоев (карт)

распределения БС и распределения вегетационного растительного индекса NDVI, разработке программного модуля автоматического расчета индекса NDVI»).

Использование разработанного способа неразрушающего контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным обеспечивает безопасность проведения работ по картированию ареалов распространения данного вида растений, повышение объективности результатов и оперативности их получения, снижение роли человеческого фактора, а также позволяет расширить применимость мультиспектральных спутниковых данных для решения задач мониторинга природной среды.

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены в практику оперативного мониторинга природных сред, осуществляемого в настоящее время территориальными управлениями по сельскому хозяйству, а также рядом академических и отраслевых организаций и институтов, выполняющих исследования в области экологии, природопользования и сельского хозяйства.

Разработанный способ контроля зон произрастания БС предполагается использовать в задачах оценки урожайности полей для нужд переработки растений данного вида и использования их в качестве сырья.

Полученные результаты контроля зон произрастания БС могут быть положены в основу новых разработок по обнаружению и контролю компонентов природной среды, моделированию и анализу динамики их распространения на основе обработки мультиспектральных спутниковых данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ неразрушающего контроля зон произрастания БС по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона, учитывающий специфику отражательных характеристик БС в различных поддиапазонах оптических волн.

2. Информационная модель зон произрастания БС, построенная на основе результатов измерений характеристик отражения БС в оптическом диапазоне волн полевым портативным спектрометриком и по данным спутниковой съемки.

3. Решающие правила обнаружения растительности и распознавания БС по мультиспектральным спутниковым данным с использованием разработанного спектрального индекса HSI.

4. Алгоритм контроля зон произрастания БС по спектральным характеристикам отраженных волн, полученных посредством спутниковой съемки.

Апробация работы

Основные результаты по теме диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях:

- X, XII, XIII, XIV, XV Открытая научно-практическая конференция учащихся, студентов и аспирантов «Информационные технологии в области науки и техники» (Санкт-Петербург, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.);
- II Всероссийская научная конференция «Проблемы военной геофизики и контроля окружающей среды» (Санкт-Петербург, 2012 г.);
- X, XIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2012, 2015 гг.);
- Всероссийская конференция с международным участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (Архангельск, 2013 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Средства и технологии ДЗЗ из космоса в науке, образовании, бизнесе» (Санкт-Петербург, 2014 г.);
- II Международная конференция «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов» (Санкт-Петербург, 2014 г.);
- II Международная конференция «Дистанционное зондирование Земли – сегодня и завтра» (Санкт-Петербург, 2014 г.);
- VI молодежный экологический конгресс «Северная пальмира» (Санкт-Петербург, 2014 г.);
- LXVIII Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета ЛЭТИ (Санкт-Петербург, 2015 г.);
- Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием «Борщевик Сосновского: экологическая проблема или сельскохозяйственная культура будущего?» (Санкт-Петербург, 2017 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 27 работ, из них шесть статей – в изданиях из списка, рекомендованного ВАК РФ, или индексируемых SCOPUS, четыре – зарегистрированные программы для ЭВМ. Подана заявка на изобретение. Список публикаций приводится на стр. 29.

Внедрение результатов исследования

Внедрение основных результатов диссертационной работы подтверждено актами об использовании ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэро-

космического приборостроения», ООО ЛенОблГИС и филиалом ФГБУ «Россельхозцентр» по Ленинградской области.

Личный вклад автора

Автором лично выполнены все этапы диссертационного исследования: постановка задач, проведение измерений в полевых условиях, получение и подготовка исходных данных мультиспектральной спутниковой съемки, обработка, интерпретация и анализ данных, разработка информационной модели БС, разработка способа оптического контроля зон произрастания БС, разработка алгоритмического и ПО, тестирование способа на обработке разновременных данных нескольких КА, формулировка выводов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и пяти приложений. Общий объем, включая приложения – 221 с., в том числе 69 рисунков и 41 таблицы. Список литературы включает 222 наименования, из них 172 на русском языке.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В соответствии с ГОСТ Р 5642–2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» существующие методы неразрушающего контроля (НК) классифицируются по видам НК, по методам НК, по первичному информативному параметру, по способу получения первичной информации. НК по видам подразделяется на магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, проникающими веществами [1].

Многообразие методов НК и физических принципов, заложенных в их основе, определяют широкий круг задач, решаемых путем их применения.

Территории сельскохозяйственного назначения в Российской Федерации характеризуются достаточно большими площадями. В связи с этим широкий охват данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и регулярность получения информации приводят к незаменимости данных спутниковой съемки при решении задач контроля природной среды и сельскохозяйственных территорий [2-5]. Дистанционные методы исследования частично заменили полевые исследования, таким образом доказав свою значимость и экономическую целесообразность [6-8]. Заинтересованность научного сообщества в развитии методов ДЗЗ для задач сельского хозяйства в Российской Федерации подтверждается значительным количеством докладов по данной тематике на крупнейших всероссийских конференциях по ДЗЗ [9-10].

1.1. Методы неразрушающего контроля природной среды

Среди методов неразрушающего контроля, перечисленных выше, применение для контроля природной среды нашли радиоволновой и оптический методы [11]. Методы, основанные на регистрации отраженных волн оптического и радио диапазонов, применяются для исследования и контроля атмосферы, водной/ледовой поверхности и суши. Широкое распространение получили способы контроля посредством обработки данных измерений, выполненных с летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, беспилотных летательных аппаратов) и искусственных спутников Земли – космических аппаратов (КА) ДЗЗ. В настоящем исследовании использовались данные комического зондирования ввиду возможности использования свободно распространяемых данных, а также наличия у автора материалов коммерческой съемки (КА RapidEye).

Радиоволновой контроль основан на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектами контроля. Методы радиоволнового

контроля подразделяют на: амплитудные, фазовые, амплитудно-фазовые, частотно-фазовые, поляризационные, геометрические, временные [11]. Космическая радиолокация является эффективным инструментом дистанционного зондирования для обнаружения разливов нефти – рисунок 1.1 [12]. Однако в некоторых случаях, возникают ложные определения разливов, обусловленные наличием ветровых slickов.

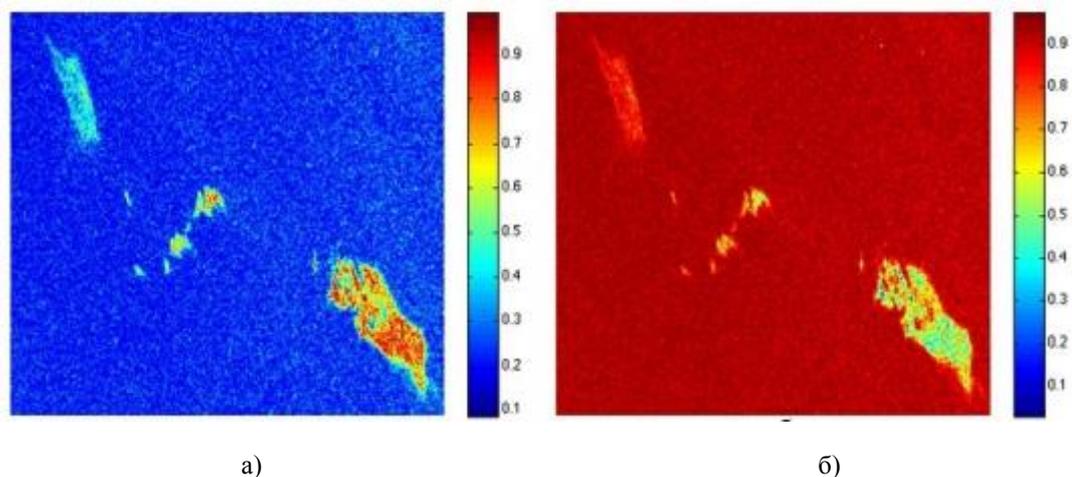


Рисунок 1.1 – Серия поляриметрических характеристик, рассчитанных для фрагмента полно-поляризационного РЛИ Radarsat-2, 8.06.2011: а) энтропия, б) анизотропия [12]

Данные радиолокационной съемки применяются для решения задач картирования и исследования лесного покрова по композитному RGB-изображению (Red-Green-Blue – Красный-Зеленый-Синий) [13] – рисунок 1.2.

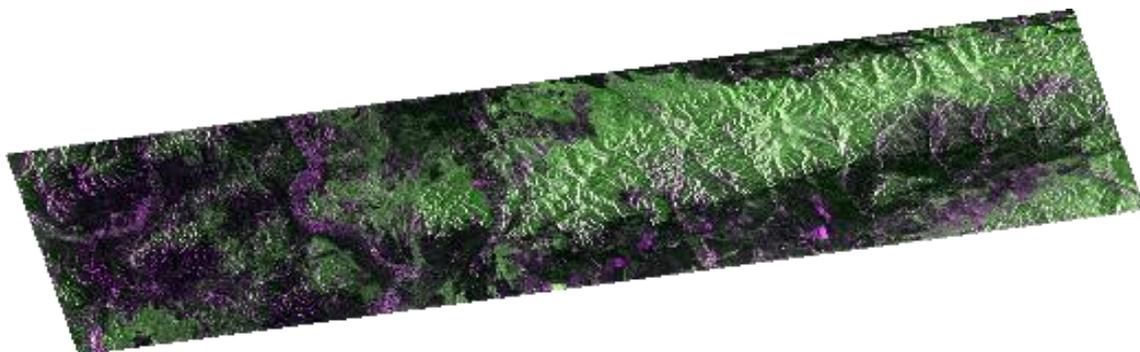


Рисунок 1.2 – RGB-композит радиолокационного изображения С-диапазона (hh, hv, hh-hv) Мухоршибирского района, Radarsat-2, сентябрь 2012 г. [13]

Радиолокационные спутниковые снимки применяются для проведения контроля лесных гарей. В статье [14] для решения данной задачи авторы используют разновременные снимки, полученные с КА ERS-2, составляя из них RGB-изображение – рисунок 1.3.



Рисунок 1.3 – Лесные гари на радиолокационном снимке ERS-2 [14]

Оптический НК основан на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля. Под оптическим излучением понимается электромагнитное излучение, имеющее длину волны 10^{-3} - 10^3 мкм, т.е. ультрафиолетовая, видимая (свет) и инфракрасная области спектра» [11]. Основными информационными параметрами объектов контроля оптическими методами являются их спектральные и интегральные фотометрические характеристики, которые зависят от строения вещества (объекта), температуры, агрегатного состояния, микрорельефа, условий освещенности, угла падения излучения, его поляризации и длины волны [12]. Методы оптического контроля в задачах ДЗЗ являются наиболее распространенными, о чем свидетельствует значительное количество КА ДЗЗ, функционирующих на орбите Земли и имеющих оптические сенсоры на борту [15].

1.2. Основные задачи космического мониторинга природной среды

Технологии ДЗЗ из космоса нашли свое применение во множестве сфер человеческой деятельности. Задачи, решаемые при помощи спутниковых снимков, можно подразделить на следующие группы по типу объектов мониторинга [16-17]:

- атмосфера;
- водные/ледовые объекты;
- земная поверхность.

Исследованиям процессов, протекающих в атмосфере, посвящены работы [18-22]. В работах [23-25] исследуется вопрос классификации облачности по спутниковым снимкам. Проблемы восстановления параметров атмосферы и облачности рассматриваются в работах [26-27]. Результаты данных исследований могут использоваться для нужд метеорологии, климатологии и авиации.

Исследованию и контролю поверхности водоемов посредством методов ДЗЗ посвящены работы [28-33]. Важнейшими задачами спутникового мониторинга акваторий являются: эффективное управление водными ресурсами, экологическое состояние водных объектов, мониторинг ряда чрезвычайных ситуаций, соблюдение водного кодекса РФ [34-36]. Решению задач мониторинга ледовой обстановки посвящены работы [37-41]. Методы ДЗЗ позволяют решать задачи определения типов льда, навигации в условиях крайнего севера, исследования климата, мониторинга экологического состояния в условиях ледового покрова, мониторинга ряда чрезвычайных ситуаций.

Исследование земной поверхности средствами ДЗЗ включает в себя множество различных задач и направлений, связанных непосредственно с типом исследуемых объектов. Решению задач лесного хозяйства, таких как определение границ леса, очагов и направления развития лесных пожаров, степени нарушенности лесной экосистемы, обнаружение вырубок, посвящены работы [42-45]. На современном этапе развития технологий мониторинг лесных массивов имеет высокую степень автоматизации исследований, а также позволяет отслеживать ситуацию в режиме реального времени посредством тематических геопорталов.

В настоящее время данные ДЗЗ активно используются для решения задач на уровне городов и муниципальных управлений. Территориальное планирование, мониторинг строительных работ, отслеживание свалок мусора и ряд других задач решаются посредством спутниковой съемки [46-47]. Данные ДЗЗ в настоящее время доступны и неспециалистам отрасли космического мониторинга посредством веб-картографических сервисов, таких как, например, Google Earth, Яндекс.Карты, Wikimapia.org [48-50].

Специалистами отрасли признано, что данные ДЗЗ незаменимы в качестве исходной информации для решения задачи кадастрового учета. Спутниковая съемка обеспечивает точность и объективность оценок кадастровой принадлежности земель. Также в некоторых случаях для решения данной задачи используются материалы аэрофотосъемки [51-52].

Технологии ДЗЗ также активно внедряются в сферу картографии, страхования, сельского хозяйства и др.

1.3. Системы дистанционного зондирования Земли

В настоящее время на орбите функционируют спутники ДЗЗ, принадлежащие различным странам: Россия, США, Франция, Германия, Италия, Великобритания, Испания, Япония, Израиль, Индия, Китай, Южная Корея, Канада, Австралия и др. [53-54]. Они отличаются друг от друга параметрами орбиты и характеристиками съемочной аппаратуры. Снимки, полученные с подавляющего большинства КА являются коммерческим продуктом, однако существует съемка с ряда космических аппаратов ДЗЗ, которая находится в открытом бесплатном доступе посредством веб-сервисов и FTP-серверов [55-56].

Орбиты КА ДЗЗ делятся на два типа: околополярные солнечно-синхронные и геостационарная – рисунок 1.4 [57].

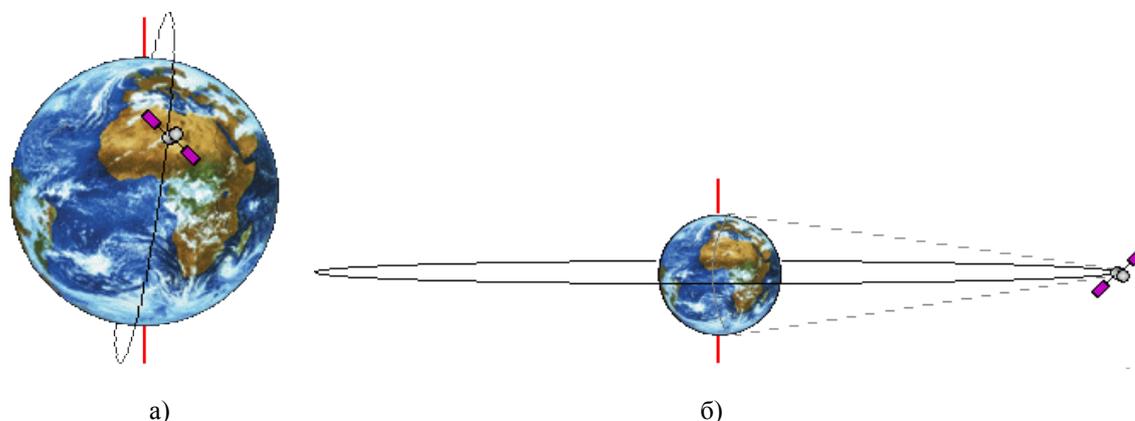


Рисунок 1.4 – Орбиты КА ДЗЗ: а) околополярная солнечно-синхронная, б) геостационарная [57]

Особенностью солнечно-синхронной орбиты является прохождение спутника над любой точкой поверхности Земли приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Движение такого спутника синхронизировано с движением линии светораздела на поверхности Земли. За счёт этого спутник всегда пролетает в освещённой области Земли, при этом условия освещённости при пролёте над одной и той же точкой Земли всегда одинаковые [57].

Геостационарной орбитой называется орбита, расположенная над экватором Земли на расстоянии 35786 км над уровнем моря. На этой высоте угловая скорость вращения спутника вокруг Земли равна угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси, что означает стационарное во времени расположение спутника и какой-либо точки на экваторе, что в свою очередь позволяет производить съемку одной и той же местности с периодичностью 15-30 минут. Снимки с КА ДЗЗ, функционирующих на геостационарной орбите, целиком охватывают земное полушарие [57].

Высота орбиты и характеристики съемочной аппаратуры КА ДЗЗ определяют ширину полосы съемки спутника – рисунок 1.5.

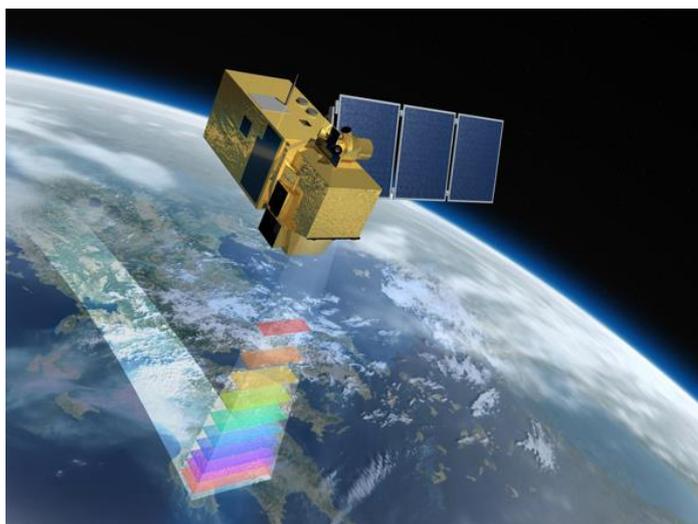


Рисунок 1.5 – Ширина полосы захвата съемки КА ДЗЗ [58]

Ширина полосы захвата определяет размер территории поверхности Земли, охватываемой снимком за один пролет. Данная характеристика обратно пропорционально периоду съемки – временному интервалу между двумя последовательными сеансами съемки одного участка местности космическим аппаратом. Период съемки определяет круг задач, решаемых с использованием данных конкретного КА ДЗЗ, подходящих по критериям частоты обновляемости данных.

По принципу дистанционного зондирования КА ДЗЗ делятся на спутники пассивного и активного зондирования – рисунок 1.6.

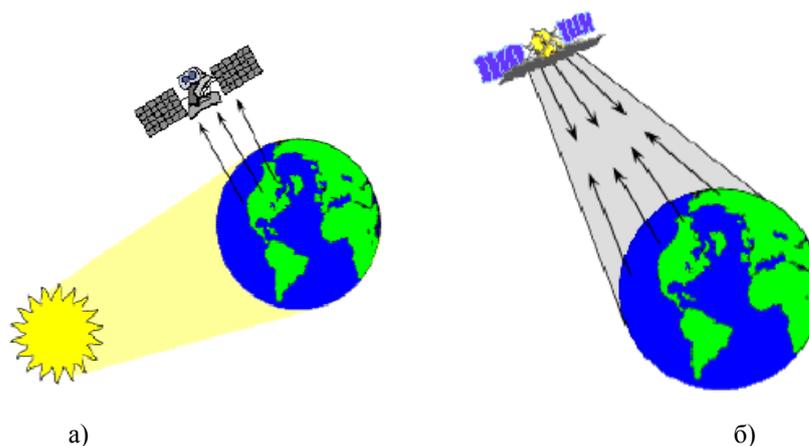


Рисунок 1.6 – Принципы пассивного (а) и активного (б) дистанционного зондирования

При пассивном дистанционном зондировании аппаратура спутника не излучает зондирующий сигнал, а лишь принимает отраженное от Земли солнечное излучение и собственное излучение объектов земной поверхности. При активном дистанционном зондировании спутник ДЗЗ излучает зондирующий сигнал и фиксирует его после отражения от поверхности Земли. Рабочий диапазон длин волн для спутников пассивного зондирования располагается от видимой до тепловой инфракрасной зон (поддиапазонов) спектра

электромагнитного излучения, для активного – микро- и радиоволновый диапазоны [59-60].

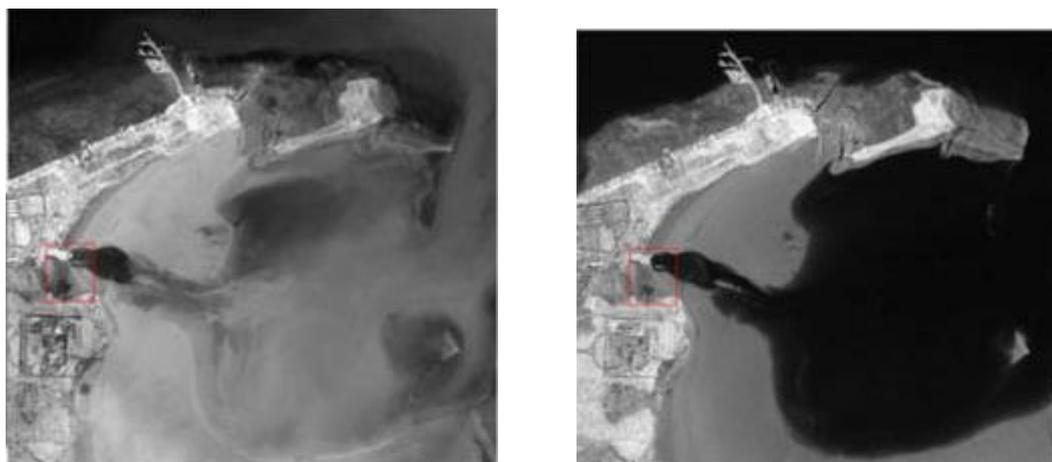
В настоящем исследовании использовались материалы пассивного зондирования, в связи с чем далее по тексту акцент будет сделан на данном классе снимков.

Мультиспектральные (полученные в различных поддиапазонах оптического спектра электромагнитных волн) спутниковые снимки относятся к данным пассивного дистанционного зондирования. Пассивные средства регистрируют отраженное от подстилающей поверхности солнечное излучение в видимой части спектра, ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, а также собственное излучение объектов в тепловом ИК, микроволновом и радиодиапазонах [61]. Принятое сенсором спутниковой системы излучение фиксируется съемочной аппаратурой в соответствии с параметрами фоточувствительных элементов [59]. Так, например, многие системы ДЗЗ регистрируют отраженное электромагнитное излучение в четырех спектральных поддиапазонах: синий, зеленый, красный, ближний ИК [15]. Информация, содержащаяся в этих поддиапазонах, позволяет формировать изображение поверхности Земли в естественных для человеческого глаза цветах и рассчитывать показатели растительности [15, 62-65].

Возможность применения данных конкретного КА ДЗЗ для решения какой-либо задачи определяется рядом характеристик получаемых снимков [66-72]:

1) Спектральные диапазоны съемки – диапазоны длин волн, фиксируемых съемочной аппаратурой (сенсором) спутника. Солнечное излучение, отразившееся от Земли, а также собственное излучение объектов фиксируется прибором, таким образом сохраняется спектральная яркость дискрета поверхности на определенной длине волны. Так, например, КА RapidEye имеет 5 каналов (поддиапазонов) съемки: синий (0,44-0,51 мкм), зеленый (0,52-0,59 мкм), красный (0,63-0,685 мкм), крайний красный (0,69-0,73 мкм), ближний инфракрасный (0,76-0,88 мкм) [15].

На рисунке 1.7 приведены фрагменты спутникового снимка в синем (BLUE) и ближнем инфракрасном (NIR) поддиапазонах длин волн. Различия в свойствах спектрального отражения различных объектов проявляются в виде отличающихся друг от друга показателей яркости соответствующих им пикселей изображения. Так, например, территория акватории визуально отличима на фоне объектов суши в ближнем ИК канале съемки.



а)

б)

Рисунок 1.7 – Фрагмент спутникового снимка: а) канал BLUE; б) канал NIR [73]

Для описания характеристик отражения электромагнитных волн, определяемых по космическим снимкам, существует ряд определений.

Спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) – характеристика распределения отраженного потока электромагнитного излучения по спектру. Условное обозначение – B_λ . Единица измерения СПЭЯ – $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{нм}}$, ср – стерадиан [74].

Коэффициент отражения, спектральное альbedo – отношение величин отраженного и падающего светового потока [59,75-76].

Коэффициент спектральной яркости (КСЯ) – показатель отношения яркости в данном направлении к яркости в том же направлении идеально рассеивающей поверхности в определенном интервале длин волн при данных условиях освещения. Условное обозначение – r_λ [75,77-79].

Спектральная яркость – количественный показатель яркости пикселя в различных зонах спектра. Под спектральной яркостью часто понимается характеристика отражения, представленная цифровыми значениями пикселей принятого спутникового снимка. Спектральная яркость пикселя соответствует величине светового потока, зафиксированного сенсором спутника. Условное обозначение – L_λ , однако нередко используется обозначение DN – «Digital Number» [80-82]. Спектральная яркость – безразмерная величина, однако ее значения могут быть приведены к значениям СПЭЯ в результате преобразований, различных для каждого КА ДЗЗ [83].

Снимки, полученные от спутников ДЗЗ, по спектральному разрешению можно разделить на три класса: панхроматические, мультиспектральные (многозональные), гиперспектральные.

- Снимки, на которых зафиксировано излучение в одном поддиапазоне длин волн, называют панхроматическими. Как правило в панхроматическом режиме регистрируются волны видимого и части ближнего ИК поддиапазона. Примером спутников ДЗЗ, специализированных для получения таких данных, являются WorldView-1, EROS-A, EROS-B.

- Мультиспектральные снимки представляют собой набор слоев данных о спектральном отражении поверхности в различных поддиапазонах спектра. Как правило ширина поддиапазонов составляет более 0,05 мкм. Мультиспектральные данные могут быть получены при помощи следующих спутников ДЗЗ: WorldView-2, 3, IKONOS, GeoEye, QuickBird, RapidEye, LandSAT-5, 7, 8, TERRA/MODIS, Канопус-В и др. Следует заметить, что некоторые мультиспектральные системы ДЗЗ также производят съемку в панхроматическом режиме.

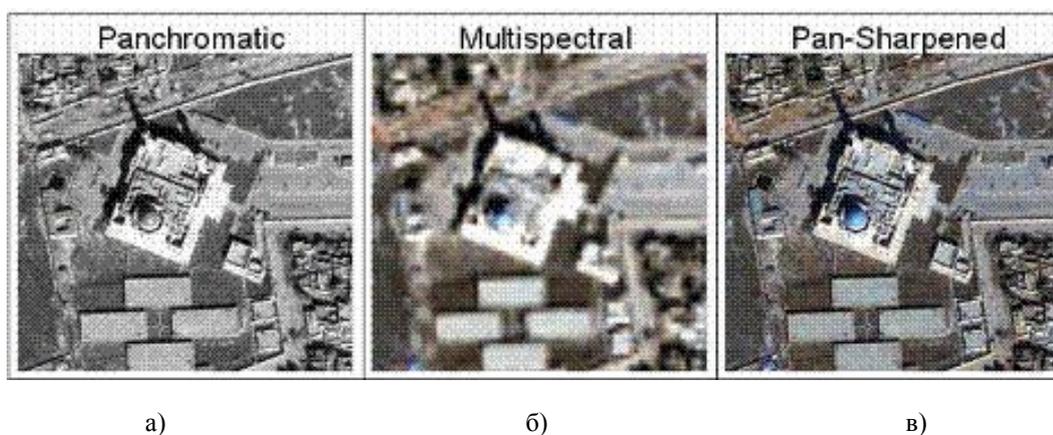
- Гиперспектральные выполняются в различных поддиапазонах спектра, значительно более узких по сравнению с мультиспектральными данными. Количество поддиапазонов съемки гиперспектральных снимков обычно составляет порядка 100 каналов шириной, близкой к значению 0,01 мкм [15]. При этом гиперспектральные данные отсутствуют в открытом доступе и являются избыточными для ряда решаемых задач [84].

2) Пространственное разрешение – линейное расстояние на поверхности Земли, охватываемое одним пикселем снимка [59]. На рисунке 1.8 представлен фрагмент спутникового снимка КА RapidEye в масштабе, на котором видна дискретизация – визуально различимы границы пикселей. При мониторинге наземных объектов пространственное разрешение определяет, насколько малые объекты могут быть различимы на снимке и насколько велика степень усреднения параметров спектрального отражения внутри одного пикселя. Следует отметить, что в одном пикселе содержится показатель спектральной яркости всего участка местности в целом, насколько бы разнородным он не был. К примеру, пространственное разрешение КА RapidEye составляет 6,5 метров, а пространственное разрешение КА WorldView-2 может быть приведено к 0,5 метра. Таким образом, один пиксель снимка, сделанного RapidEye, может включать в себя 169 пикселей снимка WorldView-2. Более высокое пространственное разрешение позволяет распознавать более мелкие детали объектов, но также и повышает гетерогенность изображений, что может привести к ошибкам распознавания.



Рисунок 1.8 – Фрагмент спутникового снимка КА RapidEye, Санкт-Петербург, 07-08-2013; RGB – 3,2,1

Для снимков, полученных одновременно в мультиспектральном и панхроматическом режимах, может быть выполнена операция улучшения пространственного разрешения (pan-sharpening) [85]. Данная операция базируется на том факте, что панхроматические данные обладают более высоким пространственным разрешением. Так, например, пространственное разрешение WorldView-2 – 0,46 метра в панхроматическом режиме, 1,84 м – в мультиспектральном, IKONOS – 1 и 4 метра соответственно. Также данная операция имеет название «слияние разрешений». Результатом ее выполнения является мультиспектральный снимок, улучшенный по пространственному разрешению до соответствующего значения панхроматического снимка. На рисунке 1.9 приведен исходный снимок IKONOS и снимок после проведения операции слияния разрешений.



а)

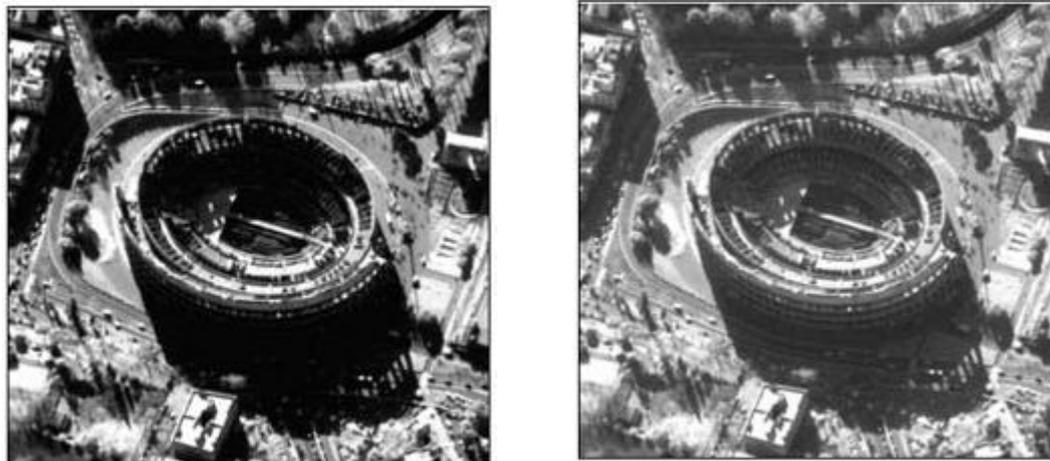
б)

в)

Рисунок 1.9 – Результат слияния разрешений, IKONOS [85]:

а) панхроматический снимок; б) мультиспектральный снимок; в) результат слияния разрешений

3) Радиометрическое разрешение – количество бит информации, содержащее спектральную яркость одного пикселя одного канала снимка. Чем больше радиометрическое разрешение, тем больше градаций цвета может быть получено при отображении – рисунок 1.10.



а)

б)

Рисунок 1.10 – Снимки с различным радиометрическим разрешением:

а) 8 бит, $2^8 = 256$ градаций цвета; б) 11 бит, $2^{11} = 2048$ градаций цвета [73]

Также данная характеристика влияет на значения яркостей пикселей снимка. Так, например, в случае, если две различные системы ДЗЗ имеют идентичные характеристики пространственного и спектрального разрешения, но радиометрическое разрешение отличается, яркости пикселей одного и того же объекта также могут существенно отличаться.

1.4. Методы обработки спутниковых данных о растительном покрове земной поверхности

Многомерность данных ДЗЗ предоставляет широкие возможности по обработке спутниковых снимков с целью распознавания и контроля объектов. Под обработкой изображений понимается процесс распознавания объектов, определение их свойств, взаимосвязей, количественных и качественных характеристик [86]. По степени автоматизации обработку снимков можно разделить на три типа [59,61,86]:

- визуальная – процесс распознавания объектов без использования каких-либо специализированных программных средств обработки данных; результат определяется специалистом-дешифровщиком;

- автоматизированная обработка отличается от визуальной применением компьютерных методов при непосредственном участии оператора;

- автоматическая обработка – процесс распознавания объектов без участия оператора, вся обработка от момента получения снимка до момента сохранения конечного результата выполняется программным обеспечением (ПО).

Степень автоматизации исследований на данном этапе развития технологий имеет очень малое значение, а для некоторых тематических задач зачастую применяется визуальное дешифрирование [87-91]. Стремление к автоматизации дешифрирования спутниковых снимков имеет высокую актуальность ввиду больших временных затрат на обработку данных и высоких требований к квалификации персонала, что повышает актуальность теоретических исследований [92-95].

Процесс получения конечного тематического продукта по снимкам ДЗЗ является поэтапным и включает определенный ряд преобразований исходных данных. Весь процесс обработки изображений состоит из двух последовательных групп преобразований: первичной и вторичной обработки. Первичная обработка изображений направлена на устранение искажений данных, возникающих под действием комплекса внутренних и внешних условий наблюдения. Данная группа преобразований делится на две подгруппы: радиометрическая и геометрическая обработка [96-97]. Результатом проведения первичной обработки являются изображения, которые не содержат дефектов, имеющих яркостную или пространственную природу. Следует заметить, что состав операций преобразования первичной обработки изображений аэрокосмических снимков, как правило, является стандартным и постоянным для конкретной системы ДЗЗ и не зависит от практической задачи, решаемой по используемым изображениям. Данный этап обработки имеет высокую степень автоматизации, а также, зачастую, для данных, получаемых потребителем от дистрибьютора, уже проведены вышеописанные процедуры.

Вторичная обработка носит прикладной характер, и состав ее операций, как правило, определяется особенностями решаемой задачи. Данная группа элементов обработки включает две подгруппы: предварительную и тематическую обработку. Предварительная обработка производится для подготовки данных к некоторой тематической обработке. Такая подготовка может быть уникальной для каждого типа решаемой задачи, однако также имеет высокую степень автоматизации. Как следствие, процедуры предварительной обработки нашли свою практическую реализацию в специализированном ПО [98-99].

Так, например, для решения задач поиска изменений на местности, поиска координат целевых объектов и др. необходимо дополнительно уточнить географическую привязку снимков. Существуют методы уточнения географической привязки по опорным точкам. Для материалов съемки некоторых КА ДЗЗ необходимо проводить уточнение геогра-

фической привязки съемочных каналов по отдельности с целью устранения их пространственного рассогласования – рисунок 1.11 [100].



Рисунок 1.11 – Уточнение географической привязки по опорным точкам [100]

Для устранения яркостных искажений спутниковых снимков, связанных с рельефом местности, применяется процедура топографической коррекции (рисунок 1.12). Участки местности, находящиеся на затененных склонах, становятся ярче, на солнечных – темнее. Коррекция яркостных характеристик производится на основе данных об угле съемки спутника, угле падения солнечных лучей и цифровой модели рельефа. Для составления модели естественного освещения местности в современных географических информационных системах (ГИС) достаточно знать дату и время съемки [99].

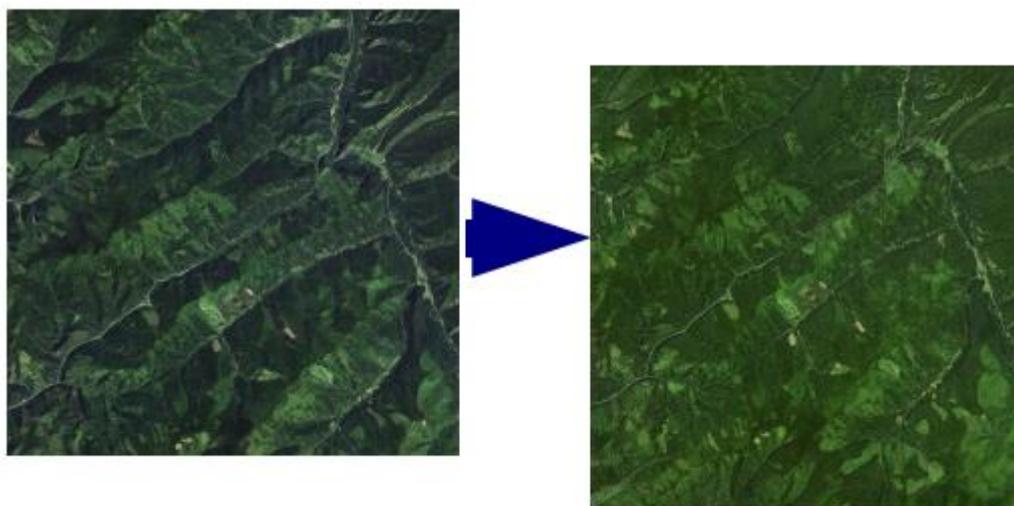


Рисунок 1.12 – Топографическая коррекция [101]

Для устранения яркостных искажений спутниковых снимков, связанных с влиянием атмосферы, применяется процедура атмосферной коррекции. В современных ГИС, таких как ERDAS Imagine, ENVI, GRASS GIS и др., реализованы алгоритмы атмосферной коррекции для ряда КА ДЗЗ. Коррекция производится на основе данных об угле падения солнечных лучей и диапазонах длин волн съемочных каналов спутника. В некоторых ГИС процедуры топографической и атмосферной коррекции реализованы в едином ПО [101-103].

Тематическую обработку мультиспектральных спутниковых снимков подразделяют на два этапа: выделение информативных признаков и анализ изображений, каждый из которых представляет собой отдельную задачу.

Различия характеристик спутников ДЗЗ определяют особенности составления информативных признаков наземных объектов по космическим снимкам. Зачастую на различных космических снимках один и тот же объект описывается различными значениями спектральных яркостей.

Задача обнаружения объектов подстилающей поверхности по спутниковым снимкам заключается в их отделении от других объектов на основе каких-либо показателей. Подобные задачи решаются в теории распознавания образов, медицине, проектировании систем технического зрения. Для обнаружения объектов подстилающей поверхности по спутниковым снимкам необходимо наличие информативных признаков, характеризующих их отличительные особенности. Информативные признаки для решения различных задач распознавания выбираются схожим образом: они должны с формальной точки зрения описывать требуемые объекты в виде некоторого условия или критерия. Помимо этого, при выборе информативных признаков следует стремиться к максимизации различий между объектами интереса и другими объектами, а также минимизации различий между конкретными экземплярами объектов интереса [104-106].

На обработку мультиспектральных и гиперспектральных спутниковых снимков ввиду большого объема исходных данных (от сотен мегабайт до десятков гигабайт) может быть затрачено значительное время и вычислительные ресурсы. В результате выбора информативных признаков может быть уменьшена исходная спектральная размерность данных, что приведет к уменьшению объема обрабатываемых данных. Исключение наименее информативных спектральных поддиапазонов съемки не оказывает влияние на результат решения задач обнаружения и контроля, таким образом сокращается избыточность обрабатываемых данных [84].

Информативные признаки для обнаружения объектов при обработке спутниковых снимков можно разделить на две группы: прямые и косвенные [86]. Прямыми дешифро-

вочными признаками называются свойства объекта интереса, непосредственно отображаемые на спутниковых снимках. Они подразделяются на следующие группы:

- яркостные;
- геометрические;
- структурные.

Применение яркостных дешифровочных признаков основывается на различиях характеристик отражения электромагнитного излучения различными поверхностями. Сенсором спутника пассивного зондирования фиксируется интенсивность потока электромагнитного излучения для отдельных участков поверхности Земли в определенных диапазонах длин волн и сохраняется в виде числовых значений. Таким образом, формируется растровое изображение, значения пикселей которого используются для формирования цветового отображения снимка на экране монитора.

Выделяют следующие яркостные дешифровочные признаками.

1. Уровень яркости (кодированная яркость) – показатель интенсивности зафиксированного сенсором спутника электромагнитного излучения для каждого пикселя изображения в отдельности. Максимальное значение соответствует белому цвету, минимальное – черному, оттенки серого соответствуют значениям от минимального до максимального.

2. Цвет – комбинация, как правило, трех компонентов различных спектральных диапазонов съемки, при которой значения пикселя интерпретируются как коэффициент соответствующей компоненты цвета в модели RGB. Восприятие цвета имеет как психофизическую, так и психофизиологическую природу и основано на свойстве человеческого глаза воспринимать электромагнитные волны в диапазоне приблизительно 400-750 нм [107]. В модели представления цветов RGB любой цвет может быть представлен линейной комбинацией трех основных цветов:

$$C = rR + gG + bB, \quad (1.1)$$

где C – цвет, воспринимаемый человеческим глазом в результате суперпозиции в определенной пропорции составляющих электромагнитных волн светового диапазона, соответствующих основным цветам; R, G, B – составляющие электромагнитной волны, соответствующие основным цветам модели RGB (красный, зеленый, синий) и определяющие уровень яркости объекта или пикселя изображения; $r, g, b \in [0,1]$ – коэффициенты компонент цвета.

3. Спектральный образ – совокупность характеристик отражения электромагнитного излучения поверхностью или объектом для различных длин волн. Спектральный образ

может быть представлен в виде зависимости какой-либо характеристики отражения от длины волны [79,108-110].

Геометрическими информативными признаками являются форма, размер, тень. Они являются важным инструментом визуального дешифрирования ввиду того, что очертания объектов на изображениях легко распознаются человеком. Следует отметить, что геометрические информативные признаки также зависят от яркостных характеристик снимка, поскольку объекты и их геометрические свойства определяются по совокупности, как правило, близких по значениям яркостей смежных пикселей изображения и отличию их яркости от окружающих пикселей.

Признак формы используется для определения контура объекта и используется, как правило, для обнаружения антропогенных объектов: самолеты, корабли, здания, сельскохозяйственные поля и пр. Признак размера носит скорее относительный характер, поскольку позволяет оценить соотношение расположенных рядом объектов по принципу «больше/меньше». По признаку размера можно отличить сарай от жилого дома, легковой автомобиль от грузового и т.д. Признак тени зависит от угла солнечного освещения в момент съемки и также носит относительный характер. Тень от объекта позволяет судить о его размерах и структуре.

Структурные информативные признаки представляют собой показатели взаимного расположения частей сложного объекта относительно друг друга, их размещения и повторяемости. Структурные признаки также, как и геометрические, непосредственно связаны с показателями яркости, поскольку именно по яркости отдельных пикселей или групп пикселей можно обнаружить сложный объект и составляющие его элементы. Структурные информативные признаки применяются для распознавания сельскохозяйственных полей, формы рельефа, классификации речных сетей [86].

К настоящему времени проведен ряд научных исследований, имеющих целью построение спектральных образов различных объектов, в том числе и природного происхождения. Результаты данных исследований объединены авторами в библиотеки. Таким образом, под библиотекой (базой) спектральных образов понимается систематизированный набор спектральных образов различных объектов и материалов.

Ряд библиотек спектральных образов находится в открытом доступе в сети интернет. Наиболее обширной из них по составу представленных образов является ASTER Spectral Library (ASL) [108]. Данный ресурс создан Лабораторией реактивного движения НАСА (ЛДР). Спектральные данные ASL представлены по группам, среди которых: камни и минералы (более 2000 образов), антропогенные объекты и материалы (84), почвы (69), вода/снег/лед (9), растительность (4). Каждый из представленных спектральных об-

разов представлен в виде упорядоченных пар значений (длина волны, КСЯ), а также графически – рисунок 1.13 – в виде зависимостей КСЯ – r_λ – от длины волны λ . ASL версии 2.0 была переименована в "Спектральную библиотеку проекта "ECOSTRESS" (ECOSTRESS Spectral Library) и была выпущена с версией 1.0 второго февраля 2018 года и в настоящее время является частью обоих проектов ЛДР - ASTER и ECOSTRESS (ECOsysteM Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station - тепловизионный спектрометр для исследования процессов круговорота воды в природе).



Рисунок 1.13 – Зависимость КСЯ от длины волны для лиственного леса, ASTER Spectral Library [108]

Данные ASL включают в себя два спектральных образа для древесной растительности и два – для травянистой. При этом приведенные зависимости КСЯ от длины волны не учитывают видового разнообразия и сезонной изменчивости растительности. Для решения задач контроля данные ASL могут рассматриваться как опорная информация для проведения дальнейших исследований.

Помимо ASL в открытом доступе в сети интернет находится библиотека спектральных образов, разработанная геологической службой США (United States Geological Survey - USGS) [111]. Спектральные данные библиотеки USGS также поделены на группы, среди которых: камни и минералы (более 800), антропогенные объекты и материалы (более 100), вода/снег/лед (25), растительность (более 200). Также, как и в ASL, приведенные спектральные образы представлены в виде упорядоченных пар значений (длина волны, КСЯ), а также в виде графика. На рисунке 1.14 приведен спектральный образ верхушки кроны сосны.

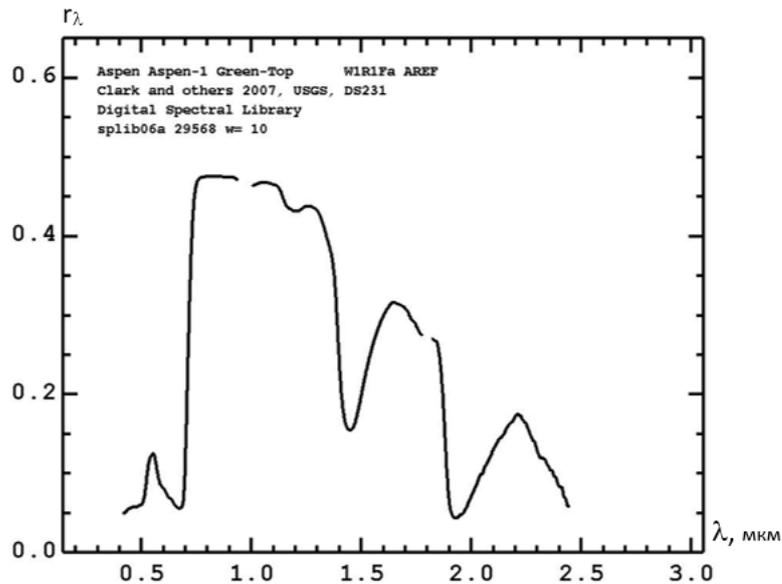


Рисунок 1.14 – Зависимость КСЯ от длины волны для крон осины, USGS [111]

В отличие от ASL в библиотеке USGS представлены спектральные образы различных видов растительности. Однако диапазон длин волн ограничен значениями 0,4 и 2,5 мкм. Показатели КСЯ в библиотеке USGS для некоторых видов растительности представлены в нескольких вариантах, соответствующих различным месяцам и годам.

В русскоязычном сегменте интернета также существует библиотека спектральных образов [112]. Ресурс «GIS-LAB: Географические информационные системы и дистанционное зондирование» предоставляет открытый доступ к информации собранной на основе исследований советских ученых [79]. Библиотека начитывает более 1000 спектральных образов растительности, почв, минералов и антропогенных объектов без деления на группы. Для каждого спектрального образа есть в наличии ссылка на источник данных: статья, монография, опубликованный результат исследований. Следует отметить, что для некоторых видов растительности приведены различные данные в зависимости от даты исследования. На рисунке 1.15 приведены спектральные образы крон осины за разные месяцы, полученные из ресурса GIS-LAB.

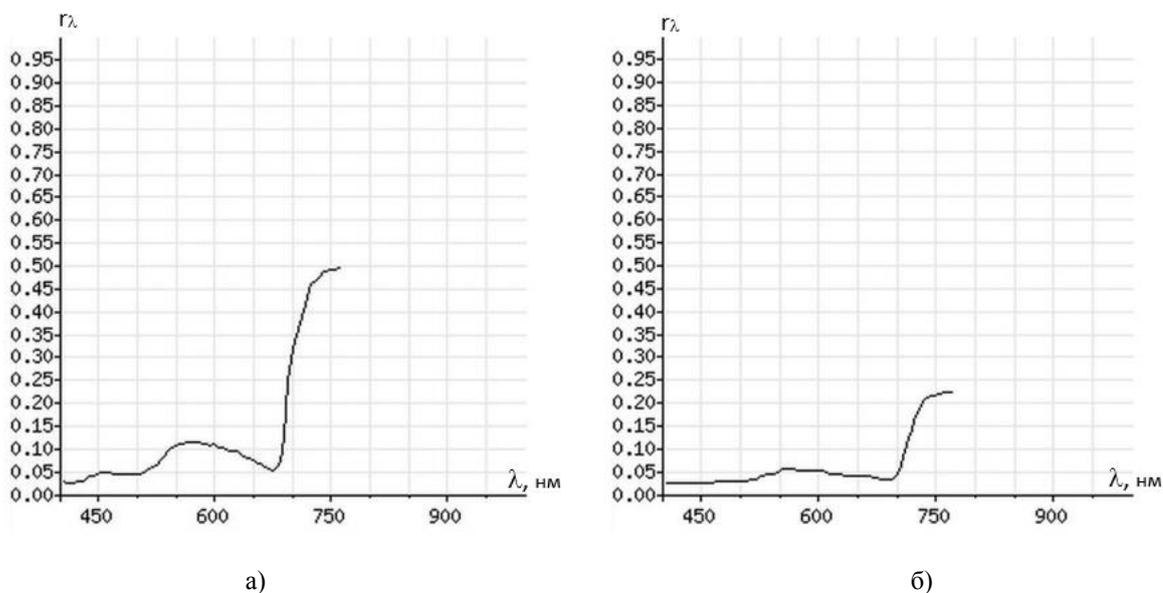


Рисунок 1.15 – Зависимость КСЯ от длины волны для крон осины, Московская область, GIS-LAB, а) 17 мая, б) 23 июля [112]

По результатам анализа спектральных образов крон осины, а также характеристик других видов растений и почв спектральной библиотеки GIS-LAB, можно сделать вывод, что коэффициенты отражения электромагнитных волн природными объектами могут сильно изменяться в течение года. Жизненный цикл растений в течение года разделяется на фенологические фазы. При изменении фазы качественно меняется внешний вид растения и как следствие его спектральный образ [113-115].

Однако спектральные образы, представленные в открытых источниках, рассмотренных выше, были получены путем наземных измерений и при использовании авиационных средств, что не является релевантным для данной работы [116-117]. Исследования из космоса имеют определенные особенности при создании и использовании спектральных образов объектов, что показано в ряде научных работ.

В процессе тематической обработки космических снимков с целью автоматизации поиска наземных объектов могут быть использованы спектральные образы. В статье [118] предлагается использование разработанной реляционной базы данных (БД) коэффициентов спектральной яркости ландшафтов. Предложенная БД содержит параметры отражения объектов, опубликованные в работах отечественных и зарубежных авторов и представленных в рассмотренных выше библиотеках. Для учета сезонных изменений таблицы БД позволяют хранить информацию за различные фенологические периоды (максимум 8) [118].

Проблемы создания БД коэффициентов спектральной яркости рассматривались в статье [117]. Авторами отмечается, что количество информации, доступное в открытых источниках, является недостаточным для необходимой степени заполнения БД. В статье

также указывается, что для большого объема данных не указаны сведения об условиях проведения измерений, что затрудняет их непосредственное использование в процессе дешифрирования снимков.

В работе [119] предложена методика обработки гиперспектральных снимков КА Nuregion. Автор приводит результаты изменчивости спектральных коэффициентов отражения природных объектов (луговая растительность, древесная растительность), а также антропогенных объектов (асфальтовое покрытие, покрытие крыши). По результатам исследований делается вывод о стационарности спектральных свойств компонентов неживой природы. Для рассмотренных классов подстилающей поверхности формируются эмпирические зависимости спектральных яркостей от длины волны отраженного излучения.

В статье [120] рассматривается проблема распознавания шотландской сосны, пораженной вредителями на фоне здоровых растений данного вида. Авторами предлагается использовать свойства спектрального отражения растений не напрямую, а посредством вычисления спектральных отношений. В результате делается вывод, что расчет совокупности параметров, состоящей из восьми индексов вегетации позволяет разделить ареалы произрастания шотландской сосны на два класса: здоровые растения и растения, пораженные вредителем. Следует заметить, что исследования проводились на примере одного снимка КА WorldView-2, а спектральные кривые строились по исходным спектральным яркостям пикселей. Таким образом, не было доказано, что информативные признаки, предложенные в данной работе, могут быть применены для других снимков WorldView-2 или других КА.

Авторы статьи [121] предлагают решать задачу поиска лесных гарей и вырубок с использованием БД спектральных образов, описанной в [117]. Выбранный в качестве способа дешифрирования снимков метод спектральных отношений в совокупности с пороговой обработкой не показал удовлетворительного результата. В качестве дополнительных информативных признаков использовались показатели структуры объектов.

Анализ изображений является заключительным этапом обработки спутниковых снимков. В общем виде данный этап всегда сводится к поиску на изображении заданного класса (или нескольких классов) объектов, а также расчет их параметров [122].

Основными современными методами тематической обработки и анализа мультиспектральных спутниковых снимков являются:

- визуальное дешифрирование;
- классификация/ поиск целевых объектов;
- субпиксельное распознавание;
- текстурный анализ;

- поиск изменений на местности;
- спектральные преобразования и отношения.

Визуальное дешифрирование заключается в распознавании объектов по спутниковым снимкам оператором-дешифровщиком без использования каких-либо алгоритмов автоматизации тематической обработки. Процесс визуального дешифрирования имеет логическую природу восприятия цвета пикселей снимка и их пространственного контекста. Необходимым условием проведения визуального дешифрирования является предварительный подбор наиболее информативных каналов для решения конкретной задачи. Съёмочные каналы могут рассматриваться как по отдельности, так и в виде RGB-композиции [86].

Одной из ключевых задач тематической обработки является классификация изображения и распознавание отдельных классов объектов. Целью классификации является отнесение всех пикселей изображения к различным классам (заданным заранее или определяемым в процессе обработки), целью распознавания – определение пикселей соответствующих определенному классу.

Классическим методом классификации и распознавания снимков является по-пиксельный подход. Особенность метода заключается в рассмотрении каждого пикселя в качестве независимой сущности без учета контекста [123-124]. По-пиксельные методы дешифрирования снимков в качестве априорных данных используют значения спектральных яркостей эталонных объектов (классификация с обучением), либо определяют границы классов автоматически, исходя из спектральных характеристик снимка в целом (классификация без обучения). В результате каждому пикселю изображения присваивается метка класса. В случае классификации без обучения оператору-дешифровщику требуется определять имена полученных классов после проведения обработки.

В настоящее время существуют различные методы по-пиксельной классификации, отличающиеся, в основном, алгоритмами вычисления «схожести» пикселей снимка и пикселей эталонных участков. В методе минимального расстояния в качестве значения близости пикселя к классу используется евклидова метрика. Все пиксели рассматриваются как точки в n -мерном спектральном пространстве признаков (n – количество каналов съёмки). «Евклидовой метрикой называется расстояние от точки-центра класса до конкретного пикселя в этом пространстве». Тот класс, евклидово расстояние до которого оказывается минимальным, присваивается пикселю в качестве результата [125-126].

Для решения задачи классификации спутниковых снимков также применяется по-пиксельный метод с использованием расстояния Махаланобиса. При вычислении расстояния Махаланобиса принимается во внимание степень разброса значений обучающей вы-

борки, выраженная дисперсией [127-129]. Как следствие, при равном евклидовом расстоянии до двух различных классов, в данном методе, пиксель будет отнесен к тому классу, дисперсия которого выше.

Метод максимального правдоподобия в отличие от предыдущих подходов имеет вероятностную природу. Для каждого пикселя снимка в n -мерном пространстве рассчитывается вероятность принадлежности ко всем заданным заранее классам. Результатом обнаружения является класс с наибольшей вероятностью принадлежности [130-131]. Сравнение по-пиксельных методов, приведенное в работах [132-134], позволяет сделать вывод, что наилучшие результаты можно получить, используя метод расстояний Махалонобиса и метод максимального правдоподобия. Влияние на оценку точности результатов методов оказывают искомые классы объектов и характеристики спутниковых снимков.

Наряду с традиционными по-пиксельными методами в настоящее время широкое распространение получили также метод опорных векторов, нейросетевая классификация и объектно-ориентированный подход [135-136].

Метод опорных векторов (МОВ) (Support Vector Machine) позволяет учитывать не только яркостные характеристики рассматриваемого пикселя, но и информацию, полученную в результате анализа соседних пикселей. При использовании МОВ пиксели эталонных выборок классов разделяются n -мерными гиперплоскостями. Гиперплоскости создают зону между объектами классов, в которой нет ни одного пикселя этих классов. Элементы классов, находящиеся на границах этой зоны, называются опорными векторами, поскольку располагаются максимально близко к другому классу. При проведении классификации данным методом каждый класс обучающей выборки оказывается очерченным гиперплоскостями, что позволяет определять классовую принадлежность каждого пикселя исходного снимка. В процессе совершенствования данного метода было предложено отказаться от концепции линейной гиперплоскости и ввести нелинейную, что приводит к лучшим результатам по классификации изображения [137-143].

В методе классификации при помощи нейронных сетей (НС) в качестве основы используется принцип организации и функционирования биологических систем. В данном подходе применяется построение и обучение искусственной НС. В качестве эталонной информации используется вектор признаков выбранных классов. Искусственная НС обучается посредством специализированного процесса, модифицирующего веса нейронных связей. Если обучение было проведено успешно, то множество информативных признаков (входных сигналов) приводит к появлению желаемого результата классификации (множества выходных сигналов) [144-151].

В работе [152] приведено сравнение методов опорных векторов и НС при решении задачи распознавания спектрально схожих классов природных объектов: лиственница, ель, осина, кедр, пихта, береза по спутниковому снимку КА SPOT-4. Результаты обоих методов оказались примерно равны по точности с незначительным преимуществом нейросетевого подхода.

Метод объектно-ориентированной (ОО) классификации основывается на принципе анализа не отдельных пикселей, а их групп. Пиксели объединяются в блоки (сегменты) в случае схожести спектральных характеристик. Преобразование исходных многоспектральных данных в сегменты позволяет вводить в рассмотрение геометрические и текстурные характеристики объектов в дополнение к спектральным. Под геометрическими свойствами понимаются характеристики формы: площадь, периметр, выпуклость, прямоугольность и другие. Тектурные характеристики являются показателями пространственной ориентации пикселей внутри одного сегмента и являются мерой внутренней неоднородности объектов. Важным шагом обработки при использовании ОО подхода является операция сегментации. Показатель различий спектральных яркостей пикселей может подбираться как вручную, так и по результатам автоматического анализа гистограмм исходного снимка [153-160].

В статьях [161-163] приведены результаты сравнения метода ОО классификации и классических по-пиксельных методов. Подход, имеющий в своей основе принцип работы с более крупными сегментами изображения, показал значительно лучший результат. В статье [164] приведен результат сравнения ОО и нейросетевого методов. Для снимков высокого разрешения рассмотренные способы классификации показали почти одинаковый результат по точности. В случае анализа снимков среднего пространственного разрешения КА LandSat-5 лучший результат показал метод с применением НС, что было связано авторами с неудачным выбором способа сегментации исходного снимка в ОО методе. В настоящее время большое внимание уделяется проблеме сегментации спутниковых снимков, подтверждаемое наличием зарегистрированных патентов на изобретение в данной области [165-169]. ОО подход нашел свою реализацию в виде ПО ведущих производителей программ обработки данных ДЗЗ: ERDAS Imagine Objective, Trimble eCognition [170-171].

Методы субпиксельного распознавания применяются в том случае, когда пространственное разрешение пикселя снимка недостаточно для обнаружения объектов интереса, т.е. в один пиксель, как правило, попадают объекты различных классов. В случае, если пиксель снимка содержит объекты двух классов и характеристики спектральной яр-

кости обоих классов известны заранее, по значению яркости пикселя можно определить пропорциональное соотношения площадей обоих классов в границах пикселя [172-173].

Методы текстурного дешифрирования заключаются в анализе яркостей и взаимного расположения пикселей внутри выбранной области снимка, т.е. производится анализ внутренней структуры, узора некоторого объекта или зоны. В текстурном анализе применяются статистический, геометрический, структурный, спектральный и модельный подходы [101, 174].

Широкое распространение получили методы поиска изменений на местности по двум или более спутниковым снимкам. В литературе представлен метод вычитания, заключающийся в расчете разности между двумя снимками. Данный метод подразумевает, что исследуемые снимки не содержат геометрических ошибок и имеют одинаковые характеристики (выполнены одним КА ДЗЗ). Операция вычитания выполняется для пары каналов снимков, охватывающих идентичный диапазон длин волн. Разность, отличная от нуля, считается наличием изменений. Метод вычитания также предполагает расчет интегральной характеристики изменений по разностям во всех имеющихся каналах съемки. Аналогичный принцип имеет метод деления, в котором, в отличие от предыдущего метода, рассматривается отношение аналогичных каналов. Метод RGB позволяет анализировать три одновременных снимка, аналогичные каналы которых объединяются в RGB-изображение. Серый цвет на результирующем изображении получается в случае совпадения яркостных характеристик всех трех исходных каналов, и, как следствие, отсутствие изменений. Цвет, отличный от серого означает наличие изменений. Данный метод используется в основном для проведения дальнейшего визуального анализа. Также существуют методы главных компонент, оверлей, сравнения индексных показателей и др. [175-178].

Репрезентативные методы тематической обработки, рассмотренные выше, основываются, как правило, на восстановленных физических параметрах отражения электромагнитного излучения, которые достигаются с определенной точностью в результате проведения процедур предварительной обработки. Наименее чувствительными к внешним факторам и процедурам коррекции снимков являются методы, основанные на спектральных преобразованиях и отношениях каналов спутникового снимка (в литературе используется термин «спектральные индексы»). Индексные показатели основаны на характерных особенностях объектов интереса и выделяют их на фоне других объектов и компонентов ландшафта. Индексы, как правило, слабо чувствительны к состоянию атмосферы и различиям в естественной освещенности [179-180].

Классификация данных ДЗЗ из космоса по степени их обработки была предложена НАСА при создании системы EOSDIS (Earth Observation System Data Information System).

Данные спутниковой съемки подразделяются на уровни, от нулевого уровня – level 0 (L0) – необработанные данные, принятые с борта КА, до четвертого уровня (L4) – статистических оценок и результатов моделирования (таблица 1.1) [181-183].

Таблица 1.1 – Уровни обработки данных ДЗЗ в системе EOSDIS

Уровень обработки данных	Краткая характеристика
L0	Исходные данные, получаемые с борта космического аппарата, т.е. показания научной аппаратуры, а также телеметрические данные, характеризующие состояния и режим работы научной аппаратуры и космического аппарата
L1A	Исходные показания научной аппаратуры, снабженные вспомогательной информацией в виде аннотации (набором корректирующих коэффициентов), необходимой для радиометрической и геометрической коррекции и географической привязки данных
L1B	Данные уровня L1A в физических единицах
L2	Восстановленные геофизические параметры исследуемых объектов
L3	Данные, привязанные к равномерной пространственно-временной шкале, обычно с определенной степенью полноты и непротиворечивости
L4	Результаты анализа, статистики, модельные оценки

На основе классификации НАСА была создана классификация CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) – таблица 1.2 [183].

Таблица 1.2 – Уровни обработки данных ДЗЗ в системе CEOS

Уровень обработки данных	Краткая характеристика
L0, L0A, L0B, L0C	Неоткорректированные («сырые») данные с добавлением дополнительной вспомогательной информации, необходимой для последующей обработки
L1A	Радиометрически скорректированные данные
L1B	Радиометрически и геометрически скорректированные данные
L1C	Географически привязанные данные
L1D	Ортотрансформированные данные
L2	Восстановленные геофизические параметры исследуемых объектов
L2G	Данные L2 в некоторой географической проекции

Продолжение таблицы 1.2

Уровень обработки данных	Краткая характеристика
L3	Данные, привязанные к равномерной пространственно-временной шкале, обычно с определенной степенью полноты и непротиворечивости
L4	Результаты анализа, статистики, модельные оценки

Данные ДЗЗ, приведенные к уровню обработки L1B, не содержат радиометрических и геометрических искажений. Спектральные яркости пикселей спутникового снимка, приведенные к уровню обработки L1B, выражены в физических единицах, соответствующих величине светового потока, зафиксированного сенсором спутника. В настоящем исследовании используемые данные были приведены к уровню обработки не ниже L1B.

1.5. Решение задач контроля природной среды и сельскохозяйственных территорий с использованием спутниковых данных

Согласно данным Росстата в 2007 г. посевная площадь в Российской Федерации составила 76,4 млн. га [184]. Масштабность территорий данной отрасли не только в России, но и в мире неуклонно приводит к использованию передовых технологий мониторинга, таких как, например, ДЗЗ. В современном мире методы дистанционных наблюдений используются для решения различных задач сельского хозяйства [184-187]:

1) определение типов сельскохозяйственных посевов (зерновые, масличные, технические, овощные и др.). Возможность контролировать площади выращиваемых культур как агропромышленными предприятиями, так и надзорными органами;

2) текущий контроль за состоянием сельскохозяйственных угодий, оценка всхожести сельскохозяйственных культур, засоренности территорий сельскохозяйственного назначения;

3) прогнозирование характеристик урожайности сельскохозяйственных культур на основе данных о текущем состоянии посевов.

4) мониторинг темпов уборки урожая;

5) выявление и прогнозирование опасных процессов и явлений, связанных с сельскохозяйственным природопользованием (ветровая и водная эрозия, засоление, вытаптывание почвогрунтов скотом и др.);

6) изучение природных условий, препятствующих активной сельскохозяйственной деятельности (зоны заболачивания, рельеф местности);

7) оценка рисков при расчетах в сфере страхования сельскохозяйственных земель.

При тематической обработке данных ДЗЗ для решения задач контроля природной среды и сельскохозяйственных территорий при помощи спутниковых данных широкое распространение получили индексные показатели: вегетационные и почвенные индексы. Самым распространенным показателем, характеризующим состояние растительности, является нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), рассчитываемый по формуле:

$$k_{NDVI} = \frac{L_{NIR} - L_{RED}}{L_{NIR} + L_{RED}}, \quad (1.2),$$

где k_{NDVI} – значение индекса NDVI для пикселя снимка, L_{NIR} – спектральная яркость пикселя в ближнем инфракрасном канале съемки; L_{RED} – спектральная яркость пикселя в красном канале съемки. Вегетационные индексы основаны на характерных особенностях отражения электромагнитного излучения зеленой растительностью: высокое значение в ближнем инфракрасном поддиапазоне и низкое значение в красном (за счет содержащегося в листьях хлорофилла). Зависимость значений КСЯ, усредненных для различных видов зеленой растительности, от длины волны приведена на рисунке 1.16 [179-180].

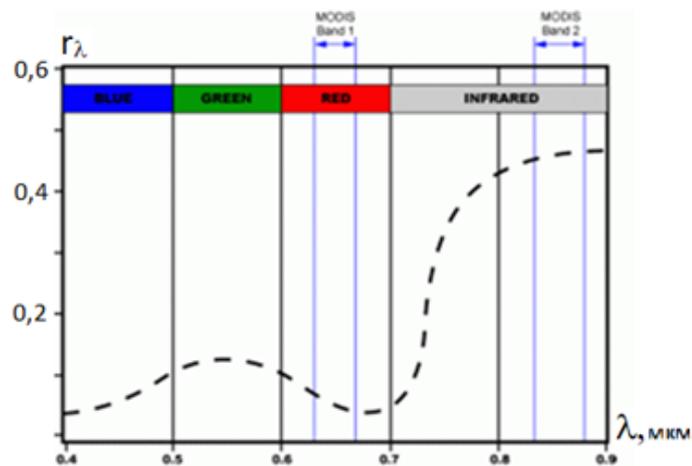


Рисунок 1.16 – Усредненная зависимость КСЯ от длины волны для различных видов зеленой растительности [180]

На основе свойств усредненной характеристики отражения волн оптического диапазона зеленой растительностью построено большинство вегетационных индексов. Тем не менее, основное назначение индексов вегетации – определение состояния, плотности произрастания, угнетенности растительности, разделение растительности и почв, антропогенных и водных объектов. При этом различия видового состава растений и выявления зон

произрастания конкретных видов выходят за рамки применимости существующих индексов вегетации [179-180].

1.6. Особенности контроля борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования Земли

Следующий подраздел посвящен особенностям растительного покрова, состоящего из БС.

Как любому растению БС свойственна периодичная смена фенологических фаз (появление ростков, цветков, увядание и т.п.). Вследствие произрастания в разных регионах и погодных условиях данный вид растений может иметь отличные периоды смены фенологических фаз. Также наблюдается неодновременность смены фенологических фаз у отдельных растений БС при одинаковых условиях. Для БС, произрастающего в ЛЮ, характерен период цветения с конца июня до середины августа, период плодоношения с начала августа до середины сентября [188].

Основными биологическими особенностями БС, обуславливающими его способность к распространению, «являются:

- прорастанье ранней весной до появления другой растительности;
- высокая жизнеспособность молодых растений;
- быстрый рост, способность расти скученно и вытеснять другие растения местной флоры;
- неодновременность цветения растений одной популяции, способность растений откладывать цветение до наступления благоприятных условий;
- раннее цветение, которое позволяет семенам полностью вызреть;
- способность к самоопылению, результатом которого являются полноценные семена;
- большая плодовитость, позволяющая одному растению начать экспансию;
- большое количество семян в «банке семян», а также семена, которые сохраняются больше одного года;
- высокая полевая всхожесть семян;
- содержание биологически активных веществ (фурокумаринов и др.), угнетающих рост других растений и защищающих борщевик от растительноядных насекомых;
- быстрое расселение семян с помощью ветра, животных, транспорта» [189];
- растения не способны к вегетативному размножению, они могут только возобновляться из подземных почек после скашивания или иного механического повреждения [189].

Несмотря на значимость проблемы распространения БС, в настоящее время исследования по дистанционным методам его обнаружения находятся в своей начальной стадии. Актуальность мониторинга зон произрастания БС посредством обработки данных ДЗЗ из космоса приведена автором в [190-193].

Существуют исследования, посвященные обнаружению БС по данным съемки с беспилотного летательного аппарата. На основе обработки данных спектрорадиометра авторы разрабатывают ряд критериев, позволяющие определить ареалы произрастания БС. Данный метод не может быть применен для обработки мультиспектральных спутниковых данных ввиду уникальности и малой ширины спектральных диапазонов применяемого авторами спектрорадиометра [194].

Научных исследований по методам обнаружения БС по данным ДЗЗ из космоса в результате проведенного исследования найдено не было, что подчеркивает актуальность данной работы. Однако существуют исследования по визуальному дешифрированию *Helianthus mantegazzianum* по данным ДЗЗ из космоса и с беспилотных летательных аппаратов [195].

Биологические особенности БС, а именно отличие периода цветения относительно другой растительности в ЛО, белые соцветия, большая площадь листовой поверхности и высокая плотность произрастания обуславливают наличие информативных признаков БС при исследованиях из космоса. Существующие способы исследования природной среды на основе обработки данных ДЗЗ не учитывают характеристики отражения БС.

В настоящей работе проведены исследования СПЭЯ, КСЯ и спектральных яркостей отраженного борщевиком излучения оптического диапазона в ЛО, выбраны и проанализированы информативные признаки БС, на основе которых разработан способ контроля зон произрастания БС.

Выводы по разделу 1

По результатам анализа существующих методов неразрушающего контроля и возможностей их применения для мониторинга природной среды и сельскохозяйственных территорий сформулированы следующие выводы:

- 1) Для решения задач контроля природной среды важное значение имеют данные дистанционного зондирования Земли из космоса.
- 2) Большинство КА ДЗЗ фиксируют электромагнитное излучение оптического диапазона; данные с ряда КА пассивного зондирования находятся в открытом доступе в сети Интернет.

3) Различия характеристик спутников ДЗЗ определяют особенности составления информативных признаков наземных объектов по космическим снимкам.

4) Методы тематической обработки спутниковых снимков ориентированы на решение конкретных задач обнаружения на основе известных информативных признаков объектов.

5) Для решения задач контроля природной среды и сельскохозяйственных территорий с использованием спутниковых данных широкое распространение получили индексы вегетации.

6) Существующие методы контроля природной среды с использованием спутниковых данных не учитывают особенности БС и не могут быть применены в исходном виде для контроля зон произрастания БС.

7) Существующие немногочисленные методы распознавания БС дистанционными методами не ориентированы на применение спутниковых снимков.

8) Биологические особенности БС определяют отличия характеристик отражения волн оптического диапазона растений данного вида в фенологических фазах цветения и плодоношения, что для ЛЮ соответствует периоду с конца июня до середины сентября.

9) Анализ существующих методов показал, что они не применимы для контроля растительных объектов сложной конфигурации. Наилучшим образом показали себя способы анализа с увеличенным количеством информативных признаков, наиболее перспективные из которых – на основе мультиспектральных и гиперспектральных данных.

10) В связи с необходимостью учета временных затрат на обработку исходных данных и возможности получения результатов в реальном масштабе времени наиболее перспективным оказался мультиспектральный метод, который выбран для решения задачи контроля зон произрастания БС.

2. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗОН ПРОИЗРАСТАНИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО ПО ДАННЫМ ПОЛЕВОГО ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ RAPIDEYE

Наличие объективной информации о зонах произрастания БС определяет возможность построения информационной модели данного вида растений. В разделе 2 проанализированы современные возможности КА ДЗЗ для решения задач распознавания БС и контроля зон произрастания БС, а также разработана информационная модель зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным.

2.1. Выбор исходных спутниковых данных

В настоящем подразделе обоснован выбор исходных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания БС. Ключевыми факторами соответствия спутниковых данных решаемой задаче были пространственное разрешение снимка и возможность осуществления мультиспектральной съемки.

Спутниковые данные сверхвысокого пространственного разрешения, полученные, например, при помощи КА WorldView-2, 3, QuickBird, GeoEye, не использовались в данном исследовании ввиду их высокой стоимости и недостаточного процента покрытия исследуемой территории за один сезон.

Спутниковые данные низкого пространственного разрешения, принятые, например, с КА Terra/MODIS, Aqua/MODIS, Suomi/NPP также не использовались в данном исследовании из-за большого размера пикселей изображения. Площади одного пикселя снимков, полученных с КА Terra/MODIS и Suomi/NPP соответственно - $S_{Terra/MODIS}$ и $S_{Suomi/NPP}$ соответственно, приведены ниже:

$$S_{Terra/MODIS} = 250\text{м} \cdot 250\text{м} = 62500\text{м}^2 = 6,25\text{Га}, \quad (2.1)$$

$$S_{Suomi/NPP} = 375\text{м} \cdot 375\text{м} = 140625\text{м}^2 \approx 14\text{Га}. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что в представленных расчетах для Terra/MODIS выбрано пространственное разрешение 250 метров, которое соответствует только двум спектральным поддиапазнам данного КА из 36. Для остальных спектральных поддиапазнов величина площади пикселя на местности выше в 4 раза (ПП – 500 метров) или в 16 раз (ПП – 1000 метров).

Исходя из фактора площади пикселей снимка, для распознавания БС могут быть использованы мультиспектральные спутниковые данные как высокого, так и среднего пространственного разрешения.

В результате анализа характеристик пространственного разрешения современных систем ДЗЗ и возможности получения снимков, произведенных ими, для выполнения исследования выбраны космические аппараты LandSat-8, Sentinel-2A и RapidEye.

Космический аппарат LandSat-8, выведенный на орбиту в 2013 году, продолжает совместную программу НАСА и USGS по мониторингу земной поверхности. В таблице 2.1 приведены основные характеристики спутниковых снимков LandSat-8.

Таблица 2.1 – Основные характеристики спутниковых снимков LandSat-8 [15,196]

Характеристика	Значение		
Период съемки, суток	16		
Спектральные поддиапазоны, нм	430-450 450-520 530-600 630-680 850-890 1360-1390 1570-1650 2110-2290	500-680	10600-11190 11500-12510
Пространственное разрешение (в надире), м	30	15	100
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12		
Ширина полосы съемки, км	185		

Космический аппарат Sentinel-2A, выведенный на орбиту в 2015 году, предназначен для поддержки программы глобального мониторинга окружающей среды и безопасности Copernicus Европейского космического агентства (European Space Agency - ESA). В таблице 2.2 приведены основные характеристики спутниковых снимков Sentinel-2A.

Таблица 2.2 – Основные характеристики спутниковых снимков Sentinel-2A [15,197]

Характеристика	Значение		
Период съемки, суток	10		
Спектральные поддиапазоны, нм	450-530 540-580 650-680 786-900	700-710 735-745 775-790 855-885 1560-1660 2100-2280	435-450 935-945 1365-1385
Пространственное разрешение (в надире), м	10	20	60

Продолжение таблицы 2.2

Характеристика	Значение
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12
Ширина полосы съемки, км	290

Группировка космических аппаратов RapidEye, выведенная на орбиту в 2008 году, принадлежит коммерческой компании BlackBridge AG (Германия). В состав группировки входят пять аппаратов с идентичными характеристиками: Tachys, Mati, Choma, Choros, Trochia. В таблице 2.3 приведены основные характеристики спутниковых снимков, получаемых со спутников группировки RapidEye.

Таблица 2.3 – Основные характеристики спутниковых снимков RapidEye [198]

Характеристика	Значение
Период съемки, суток	1
Спектральные поддиапазоны, нм	440-510
	520-590
	630-685
	690-730
	760-880
Пространственное разрешение (в надире), м	6,5
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12
Ширина полосы съемки, км	77

Площади поверхности Земли, охватываемые одним пикселем космических аппаратов LandSat-8, Sentinel-2A и RapidEye - $S_{LandSat-8}$, $S_{Sentinel-2A}$ и $S_{RapidEye}$, приведены ниже:

$$S_{LandSat-8} = 30\text{м} \cdot 30\text{м} = 900\text{м}^2, \quad (2.3)$$

$$S_{Sentinel-2A} = 10\text{м} \cdot 10\text{м} = 100\text{м}^2, \quad (2.4)$$

$$S_{RapidEye} = 6,5\text{м} \cdot 6,5\text{м} = 42,25\text{м}^2. \quad (2.5)$$

При этом площадь одного растения БС на виде сверху может достигать 10 м^2 . Таким образом, выбранные системы ДЗЗ не могут способствовать распознаванию единичного растения БС. Однако в ряде случаев, например, на территории ЛО, как показано в разделе 1, БС занимает целые поля, площадью, значительно превышающей площадь одного пикселя снимка выбранных систем ДЗЗ. В этом случае перспективным оказывается использование мультиспектральных характеристик отраженных волн оптического диапазона для распознавания БС.

Для моделирования и разработки способа контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным использовались снимки КА RapidEye, ввиду большой площади покрытия, имеющихся в наличии у автора снимков, наилучшего пространственного разрешения по сравнению с LandSat-8 и Sentinel-2A, а также наличия подтвержденных зон произрастания БС во время проведения съемки RapidEye. Спутниковые снимки LandSat-8 и Sentinel-2A использовались для адаптации разработанного в разделе 3 метода (раздел 4).

2.2. Выбор типа информативных признаков для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным

Для решения задач распознавания БС и контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным определены и проанализированы информативные признаки данного класса объектов. Фрагменты снимков территорий, на которых присутствует БС, приведены на рисунке 2.1.

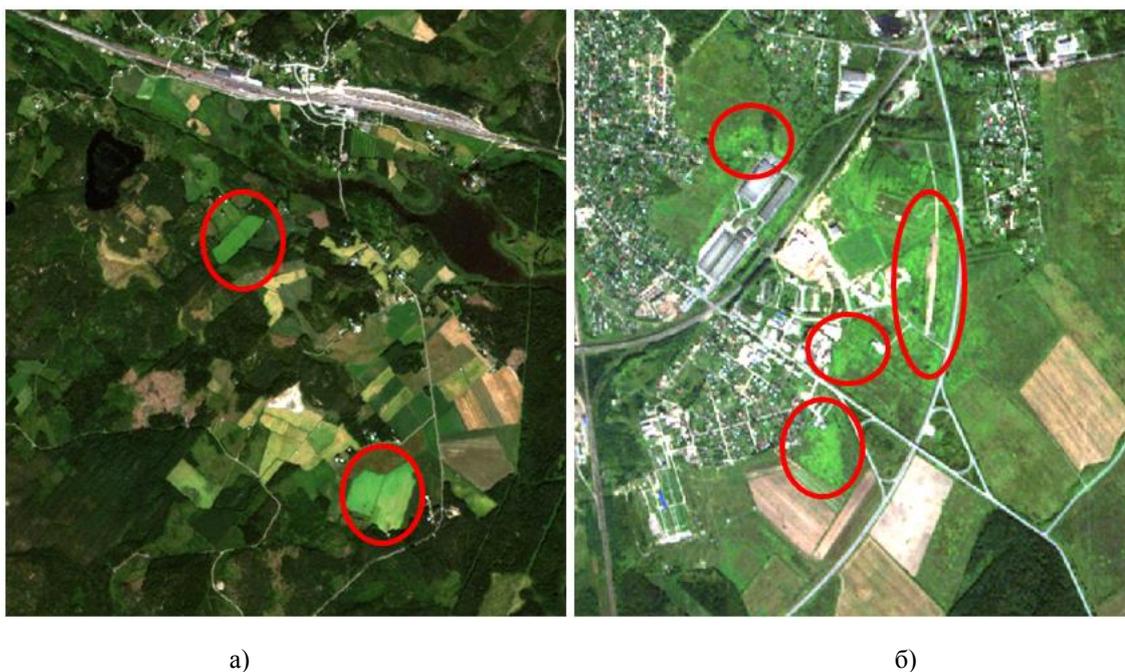


Рисунок 2.1 – Фрагменты снимков RapidEye, на которых присутствует БС (выделен красным):

а) 27-07-2013, RGB – 3,2,1; б) 07-09-2013, RGB – 3,2,1

Спутниковые снимки, используемые в настоящем исследовании, ввиду соотношения площади пикселя снимка и площади растения БС, позволяют обнаруживать единичные экземпляры представителей данного вида растений только методом сабпиксельной классификации, который в данной работе не рассматривался. Таким образом, поиск информативных признаков осуществлялся для зон произрастания БС, превышающих по площади размеры пикселей анализируемых снимков.

Геометрические признаки для решения данной задачи не применялись ввиду того, что зоны произрастания БС, как показали полевые исследования, имеют случайную форму и только в редких случаях соответствуют контурам отдельных полей, имеющих правильную геометрическую форму.

Зоны произрастания БС как природный объект не имеют какой-либо упорядоченной структуры [86]. Таким образом, структурные информативные признаки для решения поставленной задачи также не использовались.

На рисунке 2.1 представлены снимки в естественных цветах (RGB – 3,2,1). На представленных снимках целевой объект имеет разные оттенки цвета, но визуально отличим на фоне окружения. Таким образом, можно сделать вывод, что спектральные яркости пикселей, соответствующих БС отличаются от аналогичного показателя окружающей растительности и антропогенных объектов.

Методом обнаружения объектов целевого класса наименее требовательным к выполнению предварительной обработки, как показано в разделе 1, является расчет спектральных преобразований и отношений. Данный метод снижает влияние различий естественной освещенности и атмосферных искажений. Таким образом, в настоящей работе определены и проанализированы яркостные информативные признаки БС, и на их основе разработано спектральное преобразование – индексный показатель, позволяющий распознавать растения данного вида.

Следует отметить, что на мультиспектральном спутниковом снимке, как правило, имеются дефекты, «битые» пиксели, облачность, которые могут привести к заведомо ложному результату распознавания. Помимо разработанного спектрального индекса на основе информативных признаков БС разработаны дополнительные критерии, которые позволили устранить явные ошибки предлагаемого способа.

Одной из подзадач настоящего исследования была разработка универсального способа контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным. С учетом поставленного условия в качестве информативных спектральных поддиапазонов выбирались поддиапазоны, наиболее распространенные среди современных систем ДЗЗ. Следует отметить, что спектральные поддиапазоны, охватывающие длины волн электромагнитного излучения более 1 мкм есть в наличии у КА LandSat-8 и КА Sentinel-2A (ПР – 20 м) и отсутствуют у КА RapidEye и аналогичных по решаемым задачам КА SPOT-7, Ресурс-П/МВА, Ресурс-П/ШМСА-ВР, Канопус-В [15,199]. Таким образом, возможность использования съемочных каналов среднего инфракрасного поддиапазона в настоящем исследовании не рассматривалась.

На рисунке 2.2 приведена диаграмма спектральных поддиапазонов рассматриваемых КА в области видимого и ближнего инфракрасного излучения.

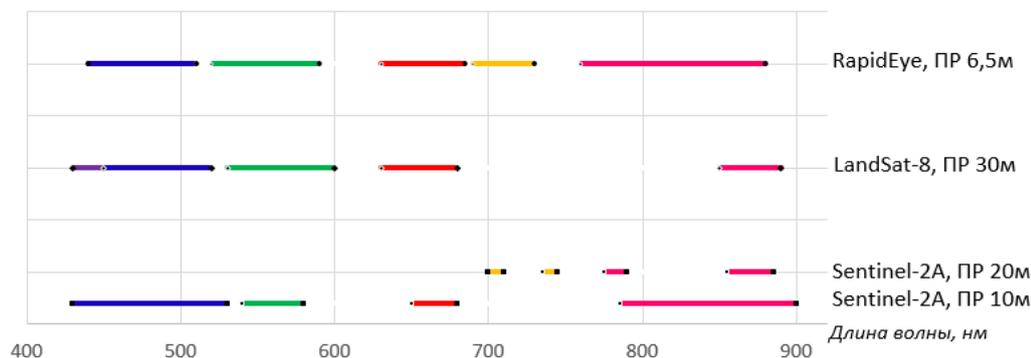


Рисунок 2.2 – Спектральные поддиапазоны рассматриваемых КА ДЗЗ

Следует заметить, что для всех рассмотренных КА ДЗЗ общими являются синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный съемочные поддиапазоны. Однако они не полностью совпадают по диапазонам длин волн; так, например, ширина инфракрасного поддиапазона LandSat-8 составляет 40 нм, RapidEye – 120 нм, Sentinel-2A – 114 нм. Фиолетовый съемочный канал присутствует лишь у LandSat-8, крайний красный канал – только у RapidEye и Sentinel-2A (ПП 20 м). Таким образом, для максимальной универсальности разрабатываемого способа сделан акцент на использование синего, зеленого, красного и ближнего инфракрасного поддиапазонов съемки.

Синий поддиапазон электромагнитного излучения среди выбранных поддиапазонов наиболее подвержен влиянию атмосферы, чувствителен к присутствующим на снимке туману и дымке. Данный спектральный поддиапазон используется для решения задач мониторинга водных объектов, обнаружения пожаров и антропогенных объектов. Синий поддиапазон спектра мало чувствителен к содержанию хлорофилла однако используется для дифференциации грунта от растительности, лиственной флоры от хвойной, картографирования типов леса. Зеленый поддиапазон спектра соответствует максимальному коэффициенту отражения здоровой зеленой растительности для видимого излучения. Данный спектральный поддиапазон используется для решения задач оценки общего состояния и таксации леса, идентификации антропогенных объектов, картирования концентрации наносов и осадков в мутных водах, выявления горных пород богатых 2-х валентным (закисным) железом по сравнению с 3-х валентным. Красный поддиапазон спектра содержит полосу поглощения хлорофилла. Он применяется для дифференциации зеленой растительности, мониторинга лесного покрова, почвенного и геологического картографирования. Ближний инфракрасный поддиапазон спектра является индикатором количества вегетационной биомассы и площади листовой поверхности растений. Данный поддиапазон

используется для классификации лесов, определения их породного состава, мониторинга заражения лесов насекомыми-вредителями, определения последствий ураганов, оценки урожайности земель сельскохозяйственного назначения, определения береговой линии [200-201].

В дальнейших исследованиях показателей отражения волн оптического диапазона сделан акцент на синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный поддиапазоны с целью применения разрабатываемого способа к данным КА LandSat-8, Sentinel-2A и RapidEye.

2.3. Информационная модель зон произрастания борщевика Сосновского по данным полевого портативного спектрометра

Модель называется информационной, если в ней отсутствует непосредственное подобие физических процессов реальных объектов. В информационной модели реальный объект представляется как «черный ящик», имеющий ряд входов и выходов, а моделируются связи между выходными и входными сигналами. В основе информационных моделей лежит отражение некоторых процессов функционирования моделируемых объектов, что позволяет оценить поведение реальных объектов [202].

Исследование отражательных свойств БС, использованных в качестве исходных данных для моделирования зон произрастания БС, предполагает проведение измерений с использованием спектрометра в полевых условиях при естественном солнечном освещении, так как при транспортировке образцов растений с целью измерения их характеристик отражения в лабораторных условиях происходит увядание, осыпание лепестков, что сказывается на результатах. Кроме того, результаты измерений спектрометром, полученные при естественном освещении, могут сравниваться с данными многоспектральной и гиперспектральной спутниковой съемки после проведения процедур обработки [107, 203].

Методика исследования характеристик отражения БС с использованием средств полевой спектрометрии включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор тестового полигона, в пределах которого произрастает БС;
- 2) оценка соотношений площадей различных объектов на территории выбранного полигона;
- 3) проведение калибровочных измерений спектрометром, необходимых для учета и компенсации вариаций естественного солнечного освещения;
- 4) проведение спектрометрических измерений БС и окружающей растительности;

5) обработка и анализ результатов измерений, разработка информационной модели зон произрастания БС, формирование информативных признаков отражательных свойств БС.

Для выполнения настоящего исследования автор проводил полевые экспедиции, информация о которых приведена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Полевые экспедиции

№	Место проведения	Дата/время	Количество измерений БС	Количество измерений других объектов
1	Бугровское сельское поселение	12.07.2016 12:07 – 12:15	18	4
2	Бугровское сельское поселение	03.08.2016 16:00 – 16:10	25	4
3	Бугровское сельское поселение	06.09.2016 11:46 – 11:58	21	12

Тестовым полигоном для проведения полевых измерений отражательных свойств БС выбран участок между кольцевой автодорогой Санкт-Петербурга (СПб) и улицы Шоссейной Бугровского сельского поселения – рисунок 2.3. В выбранном тестовом полигоне БС произрастает в естественных природных условиях, участок местности не подвергался обработке химикатами или скашиванию. Поверхность БС, формирующая отраженный поток излучения, является гетерогенной и включает в себя различные элементы растения: листья и соцветия. В связи с этим проводились измерения всех имеющихся элементов БС как отдельных объектов с помощью спектрорадиометра. Следует отметить, что в естественных условиях произрастания вследствие одновременной смены фенологических фаз у различных экземпляров БС, элементы растений имеют различное состояние и, как следствие, различные показатели отражения. Выбранный тестовый полигон репрезентативно представлял текущее состояние БС для ЛО. Размер выбранного тестового полигона не только превышал значение ПР данных ДЗЗ, которые использовались для дальнейших исследований, но и обеспечивал достоверное распознавание БС спутниковых на снимках. В свою очередь в рамках полевых экспедиций очерчивались границы тестового полигона и определялись опорные точки на местности с расчетом их координат при использовании средств глобального позиционирования, что позволило внедрять полученные пространственные данные в геоинформационные проекты [203].

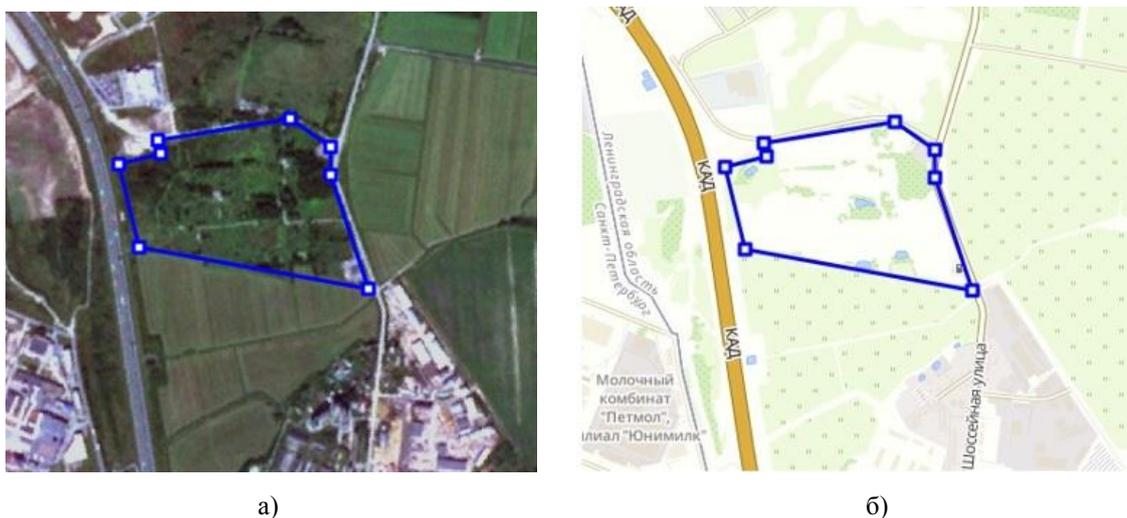


Рисунок 2.3 – Тестовый полигон,

а) спутниковый снимок космического аппарата RapidEye, 2013 год, б) карта OpenStreetMap

В рамках применения разработанной методики исследования отражательных свойств БС использовался полевой портативный спектрорадиометр Spectral Evolution PSR-1100 – (рисунок 2.4). Данный прибор является оптико-электронным устройством для проведения спектрорадиометрических измерений в диапазоне длин волн электромагнитного излучения 320-1100 нм. Угловое поле зрения прибора составляет 4° . Спектрорадиометр PSR-1100 оснащен матричным приемником излучения, сформированным из 512 элементов. Таким образом, прибор обеспечивает получение измерений в 512 поддиапазонах со спектральным разрешением 3,2 нм.



Рисунок 2.4 – Внешний вид полевого портативного спектрорадиометра Spectral Evolution PSR-1100

Для компьютерной обработки результатов измерений PSR-1100 применялось ПО DARWin SP – (рисунок 2.5).

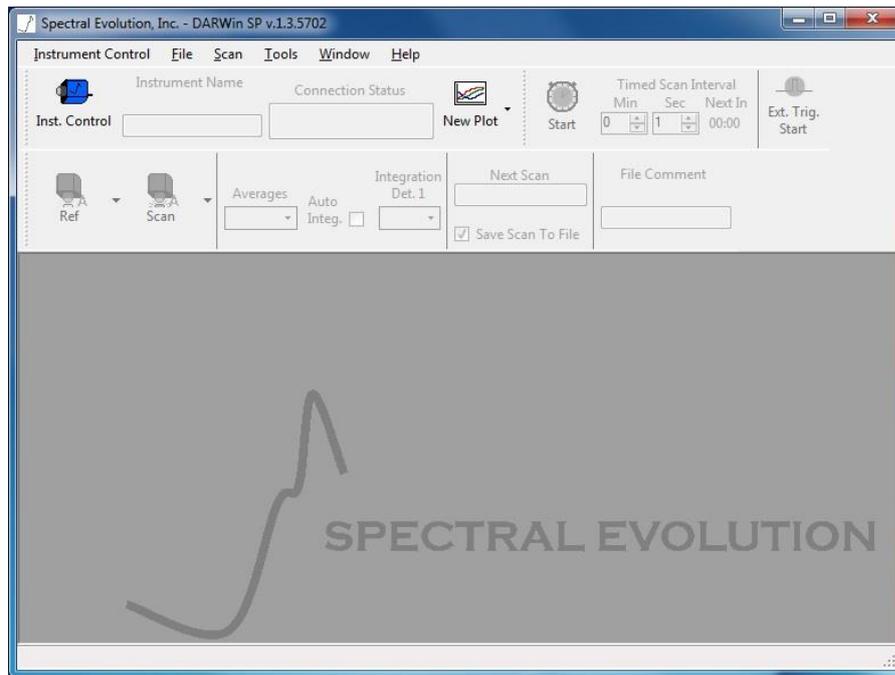


Рисунок 2.5 – Интерфейс программного обеспечения DARWin SP

Результаты измерений PSR-1100 сохраняются в памяти прибора в виде файла с расширением *.sed, который визуализируется в среде DARWin SP в виде графиков. Пример файла данных *.sed, содержащий информацию об измеренных характеристиках отражения излучения соцветием БС, находящегося в стадии цветения, приведен в приложении

А. Измеряемая устройством величина – B_λ – СПЭЯ; единица измерения – $\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2 \times \text{ср} \times \text{нм}}$.

СПЭЯ – результат прямых измерений спектрорадиометром.

Величина отраженной СПЭЯ, фиксируемой спектрорадиометром, напрямую зависит от положения Солнца и метеорологических условий. Для обеспечения возможности сравнения результатов прямых измерений экспедиции, все измерения проводились в ясную погоду и с минимально возможными промежутками времени. Анализ данных измерений PSR-1100 проводится при допущении стационарности во времени условий освещенности в период проведения измерений. При этом спектрорадиометрические и калибровочные измерения проводились в идентичных условиях с выдерживанием расстояния от прибора до объекта и ориентации прибора в заданном направлении.

Необходимым опорным измерением является калибровочная характеристика – Reference, определяемая в результате измерения СПЭЯ, отраженного от белой калибровочной панели излучения - рисунок 2.6. Основной особенностью белой калибровочной панели является свойство идеально диффузно рассеивающей поверхности в рабочем диапазоне длин волн спектрорадиометра. Калибровочные измерения производились спектрорадиометром в начале полевых работ, а также в течение периода времени выполнения ра-

бот при изменении условий освещенности. Результат измерения Reference, проведенного в полевых условиях, позволяет оценить уровень естественного солнечного освещения.

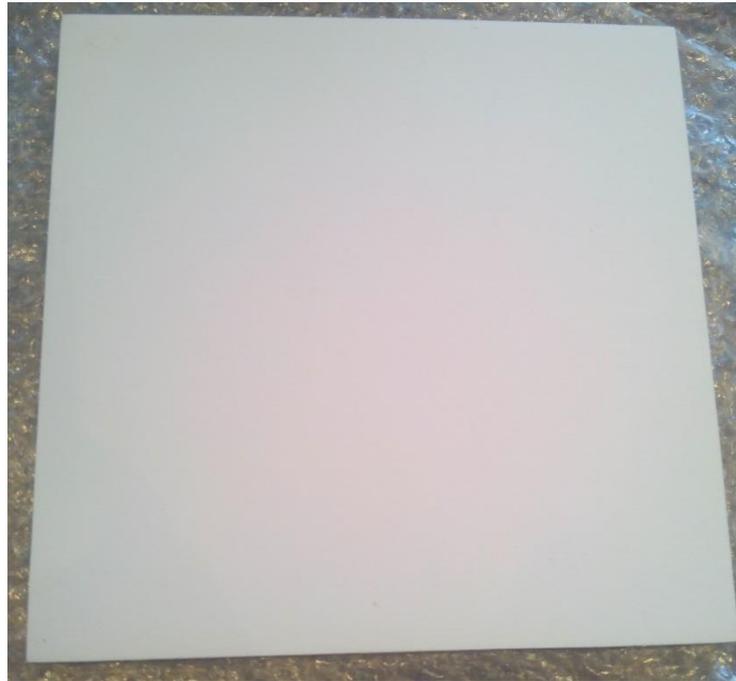


Рисунок 2.6 – Калибровочная белая панель

В результате обработки данных измерений получены спектральных характеристик отражения различных объектов в виде зависимостей СПЭЯ и КСЯ от длины волны. Для расчета КСЯ применяется формула [77, 79]:

$$r_{\lambda} = \frac{B_{\lambda}}{B_{0\lambda}}, \quad (2.6)$$

где r_{λ} – КСЯ, B_{λ} – СПЭЯ исследуемой поверхности в заданном направлении, $B_{0\lambda}$ – СПЭЯ идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и исследуемая поверхность. В качестве оценки величины $B_{0\lambda}$ использовалась измеренная калибровочная характеристика.

В связи с тем, что БС является гетерогенным объектом, то есть включает в себя различные структурные элементы: листья и соцветия – спектрометриком проводились измерения всех обнаруженных структурных элементов БС как отдельных объектов исследования. При этом, вследствие неодновременности смены фенологических фаз у различных растений БС, структурные элементы данного вида растений имеют различное состояние и, как следствие, различный внешний облик. Таким образом, спектрометрические измерения характеристик отражения проводились для отдельных структурных элементов БС, а также окружающей травянистой растительности. Методика проведения из-

мерений включала в себя требование многократного измерения (не менее трех измерений) характеристик для каждого объекта, имеющее целью исключение человеческого фактора и уменьшение вероятности получения заведомо недостоверного результата.

Для расчета СПЭЯ гетерогенного объекта в заданном поддиапазоне длин волн оптического излучения по результатам измерений для дискретных значений длин волн предложена следующая формула:

$$B_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{j=1}^m B_{\lambda} s_j}{\sum_{j=1}^m s_j}, \quad (2.7)$$

где λ – длина волны; B_{λ_1, λ_2} - СПЭЯ объекта в поддиапазоне длин волн (λ_1, λ_2) ; B_{λ} – СПЭЯ объекта, измеренная для длины волны λ ; s_j – элемент площади проективного покрытия объекта, j – номер элемента площади проективного покрытия объекта.

Для расчета КСЯ гетерогенного объекта в заданном поддиапазоне длин волн оптического излучения по результатам измерений для дискретных значений длин волн предложена следующая формула:

$$r_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{j=1}^m \frac{B_{\lambda}}{B_{0\lambda}} s_j}{\sum_{j=1}^m s_j}, \quad (2.8)$$

где r_{λ_1, λ_2} – КСЯ объекта в поддиапазоне длин волн (λ_1, λ_2) , $B_{0\lambda}$ - СПЭЯ идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и объект.

В том случае, когда заданный поддиапазон длин волн равен спектральному разрешению измерительного прибора, формулы (2.8), (2.9) принимают вид:

$$B_{\lambda} = \frac{\sum_{j=1}^m B_{\lambda} s_j}{\sum_{j=1}^m s_j}, \quad (2.9)$$

$$r_{\lambda} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{B_{\lambda}}{B_{0\lambda}} s_j}{\sum_{j=1}^m s_j}. \quad (2.10)$$

Информационная модель БС представляет собой совокупность пар значений (r_i, λ_j) , где i – номер элемента БС, j – номер спектрального поддиапазона, $\lambda \in (320; 1100)$ нм.

Первая в хронологическом порядке экспедиция была проведена в Бугровском сельском поселении, ЛО, 500 метров от кольцевой автодороги, 12.07.2016, что соответствует фенологической фазе цветения БС. На рисунке 2.7 приведена фотография внешнего вида поля БС.



Рисунок 2.7 – Фотография из архива фотоматериалов экспедиции от 12 июля 2016, поле БС

Результаты визуальной оценки полей БС позволили сделать следующие выводы о соотношении площадей различных типов поверхности (таблица 2.5):

Таблица 2.5 – Соотношение площадей типов поверхности в пределах поля БС, визуальная оценка

№	Тип поверхности	Доля от площади поля
1	Соцветие БС	30 %
2	Листья БС	60 %
3	Травянистая растительность	7 %
4	Почва	3 %

На рисунке 2.8 приведены фотографии, сделанные в полевой экспедиции, на которых изображены различные структурные элементы БС, использованные в качестве экспериментальных образцов.

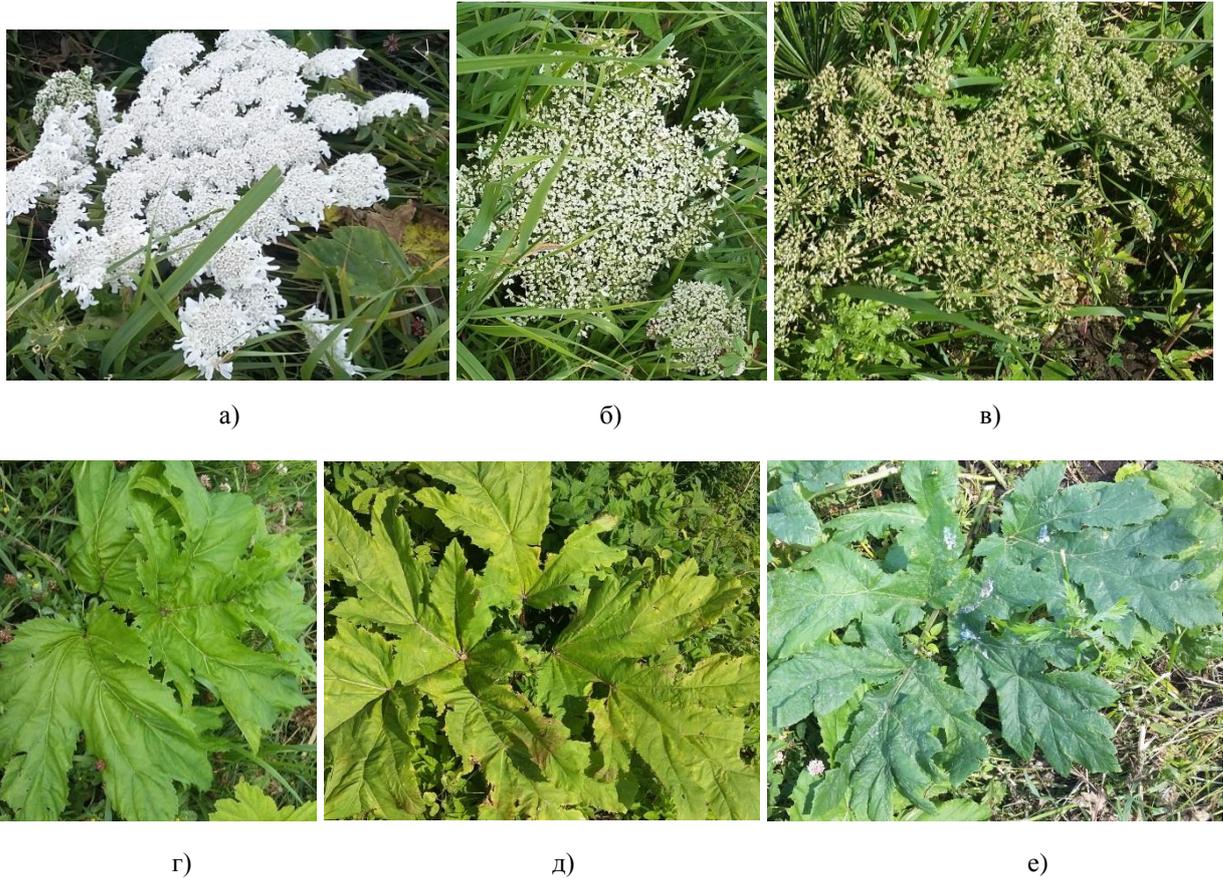


Рисунок 2.8 – Фотографии из архива фотоматериалов экспедиции от 12 июля 2016: а) Соцветие БС: стадия цветения, б) Соцветие БС: стадия опадения лепестков, в) Соцветие БС: стадия появления венчиков, г) Ярко-зеленый лист БС, д) Желтеющий лист БС, е) Темно-зеленый лист БС

Результаты измерений БС и окружающей злаковой травянистой растительности были обработаны в ПО DARWin SP и представлены в виде зависимостей величины СПЭЯ от длины волны на рисунке 2.9. Анализ представленных графиков был направлен на обнаружение особенностей СПЭЯ БС в поддиапазонах длин волн, фиксируемых съемочной аппаратурой выбранных выше КА ДЗЗ (синий, зеленый и красный поддиапазоны видимого излучения, а также ближний инфракрасный поддиапазон). В качестве примера на рисунке 2.9 приведены границы съемочных каналов КА RapidEye, соответствующие выбранным спектральным поддиапазонам.

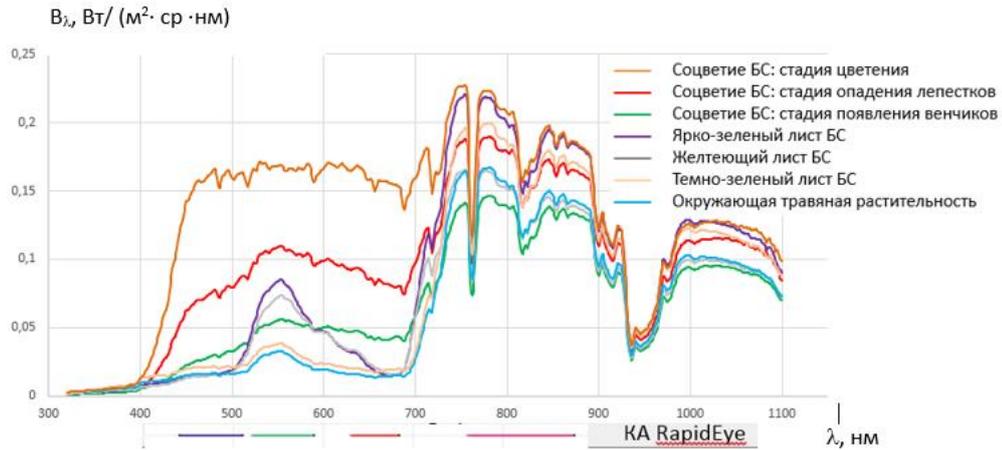


Рисунок 2.9 – Зависимости СПЭЯ от длины волны, экспедиция от 12 июля 2016

Для приведенных на рисунке 2.9 объектов в ПО DARWin SP были рассчитаны зависимости КСЯ от длины волны – рисунок 2.10.

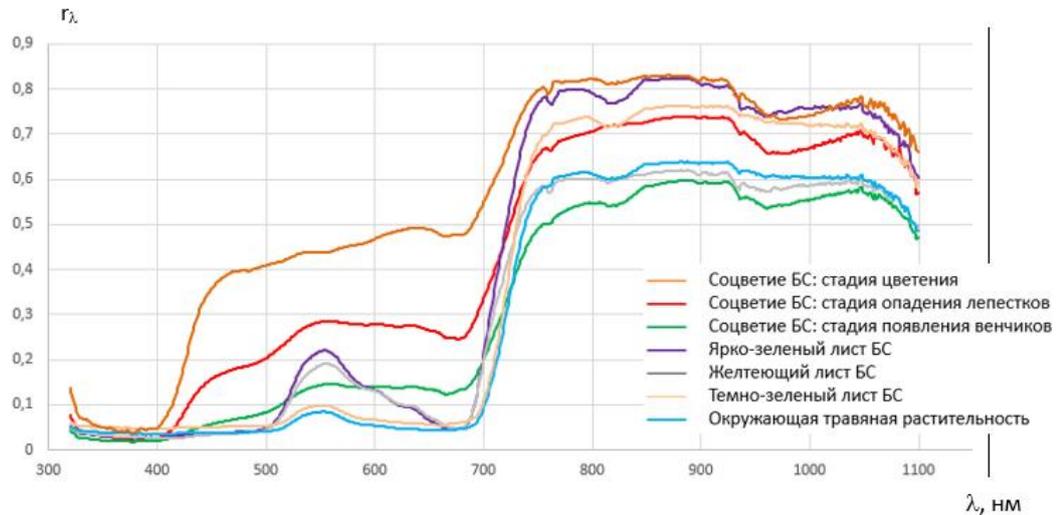


Рисунок 2.10 – Зависимости КСЯ от длины волны, экспедиция от 12 июля 2016

Анализ результатов, приведенных на рисунках 2.9, 2.10, позволил определить особенности отражательной способности БС в зависимости от длины волны зондирующего излучения, перечисленные ниже:

1) соцветие БС в стадии цветения имеет ровную линию тренда характеристики КСЯ отраженного электромагнитного излучения в видимой области спектра, при этом его значения превышают значения других объектов на всех рассматриваемых длинах волн, например, значения КСЯ травянистой растительности - на 35% в синем и зеленом поддиапазонах, на 42% в красном и на 20% в ближнем инфракрасном);

2) соцветие БС в стадии опадения лепестков имеет локальный максимум отражения в зеленой области спектра на графике КСЯ. Для видимого поддиапазона длин волн данный объект принимает высокие значения КСЯ, однако ниже, чем у соцветия, находящегося

ся в стадии цветения. Следует заметить, что в ближней инфракрасной области спектра: значения КСЯ ниже, чем у соцветий БС в стадии цветения (на 11%), ярко-зеленого (на 8%) и темно-зеленого (на 2%) листьев БС, и выше, чем у других экспериментальных образцов (на 9-15%);

3) соцветие БС в стадии появления венчиков имеет более высокие значения КСЯ в синей и красной областях спектра, чем зеленая растительность (листья БС и травянистая растительность) на 3% и 8% соответственно. В зеленом поддиапазоне длин волн излучения значения КСЯ данного образца превышают значения только травянистой растительности и темно-зеленых листьев БС, а в ближнем инфракрасном поддиапазоне значения КСЯ являются наименьшими среди всех объектов;

4) для объектов, представляющих собой зеленую растительность, синяя и красная области спектра не являются информативными – отличия значений КСЯ объектов находятся на уровне 0.5%. В зеленой области спектра наибольшие значения КСЯ имеют ярко-зеленый и желтеющий листья БС. Однако в ближнем инфракрасном поддиапазоне среди рассмотренных объектов наиболее высокие значения имеют ярко-зеленый и темно-зеленый листья БС (79% и 74% соответственно); желтеющий лист БС имеет более низкие значения КСЯ из-за подверженности процессам увядания, в то время как значения показателей отражения солнечного излучения в данном поддиапазоне являются показателем здоровья зеленой растительности. При рассмотрении окружающей травянистой растительности в целом на характеристики отражения оказывает влияние малая площадь листовой поверхности в виду частичного затенения образца и, как следствие, приводит к более низким значениям КСЯ, чем у других объектов зеленой растительности (на 2-13% в зеленом поддиапазоне и 1-18% в инфракрасном).

Анализ выявленных особенностей показателей отражения БС в совокупности с данными оценки соотношения площадей проективного покрытия – таблица 2.5 – позволяет сформулировать следующие выводы о соотношении характеристик БС в целом с окружающей травянистой растительностью. Обобщение полученных результатов в дальнейшем используется для сопоставления с результатами анализа данных ДЗЗ, получаемых с воздушных и космических средств:

1) в синей и красной области спектра БС имеет значения КСЯ, превышающие показатели травянистой растительности за счет наличия соцветий. Однако тридцатипроцентная доля площади, занимаемая соцветиями, не позволяет сделать вывод об информативности синего и красного видимых поддиапазонов длин волн;

2) в зеленой области спектра каждый относящийся к БС объект имеет значения КСЯ, превышающие показатели травянистой растительности, что позволяет сделать вы-

вод о более высоких значениях (на 7-10%) в данном поддиапазоне длин волн для БС в целом относительно травянистой растительности;

3) в ближней инфракрасной области спектра каждый объект, относящийся к БС (за исключением соцветия в стадии появления венчиков), имеет значения КСЯ, превышающие показатели травянистой растительности (на 1-21%), что позволяет сделать вывод о более высоких значениях в данном поддиапазоне длин волн для БС в целом относительно травянистой растительности.

Вторая в хронологическом порядке экспедиция была проведена также в Бугровском сельском поселении, ЛО, 500 метров от кольцевой автодороги. Дата проведения экспедиции – 03.08.2016 – соответствует переходу от фенологической фазы цветения к фенологической фазе плодоношения БС.

На рисунке 2.11 приведены фотографии полевой экспедиции, на которых изображены различные части БС, использованные в качестве объектов исследования.

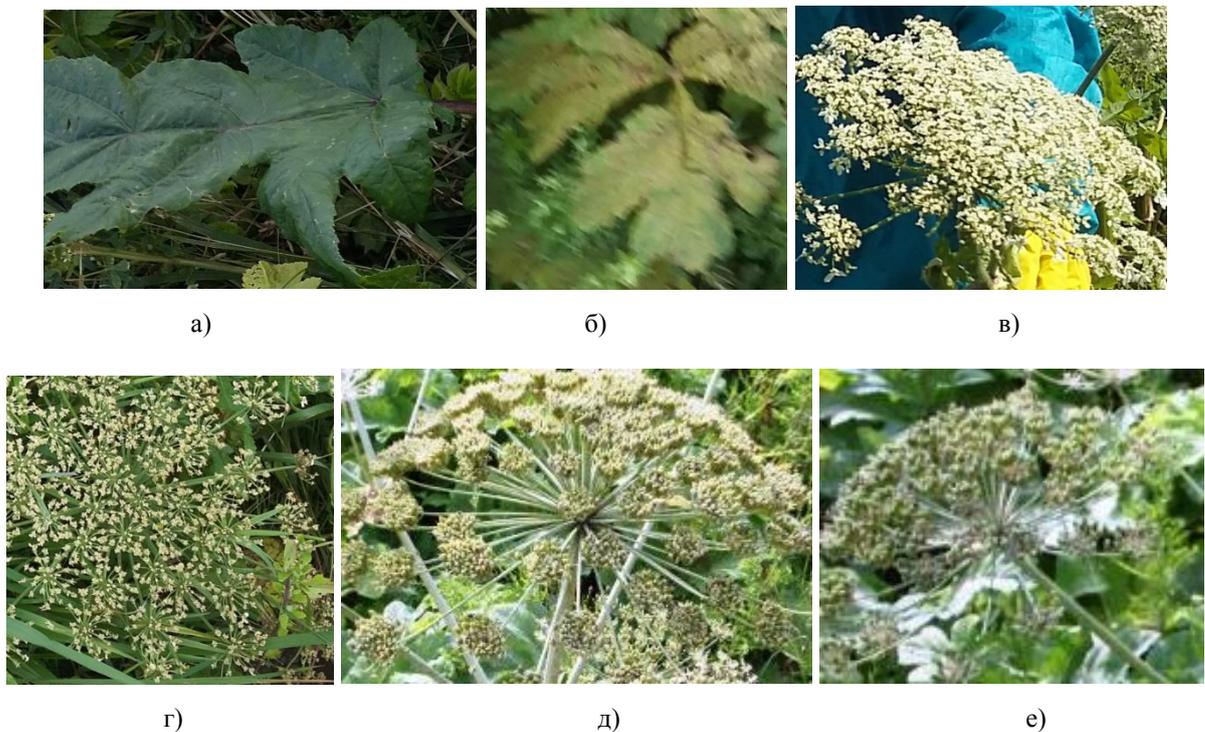


Рисунок 2.11 – Фотографии из архива фотоматериалов экспедиции от 03 августа 2016: а) Темно-зеленый лист БС, б) Лист БС с признаками хлороза, в) Соцветие БС: стадия опадения лепестков, г) Соцветие БС без лепестков, д) Соцветие БС: стадия появления семян, е) Соцветие БС: стадия плодоношения

Следует заметить, что в день проведения экспедиции наблюдался частичный переход БС от стадии цветения к стадии плодоношения. Однако цветущих соцветий по визуальной оценке было не менее 50% от их общего количества. Результаты измерений были обработаны в ПО DARWin SP и представлены в виде зависимостей величины СПЭЯ от длины волны. Полученные графики представлены на рисунке 2.12.

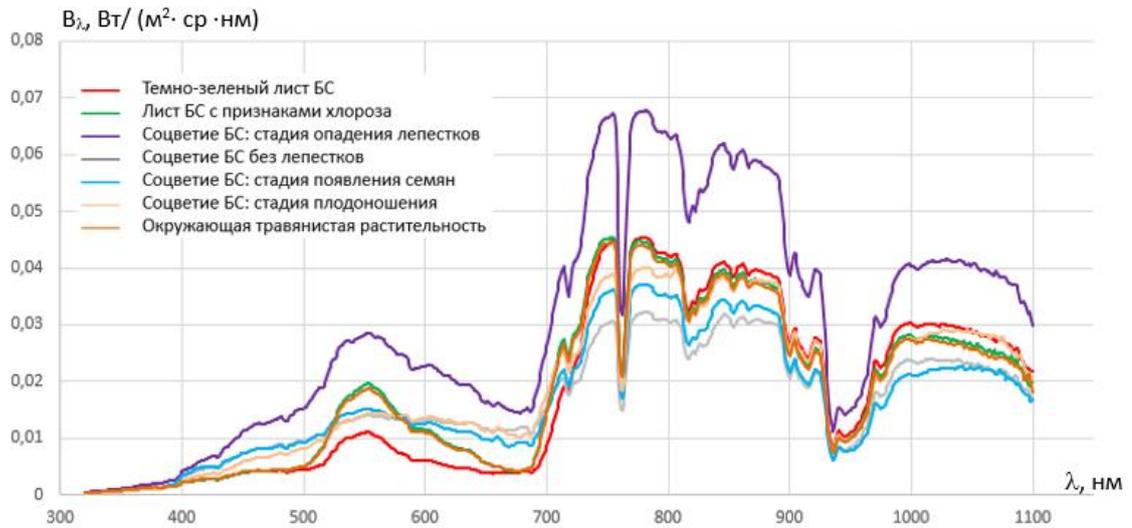


Рисунок 2.12 – Зависимости СПЭЯ от длины волны, экспедиция от 03 августа 2016

Для приведенных на рисунке 2.12 объектов в ПО DARWin SP были рассчитаны зависимости КСЯ от длины волны – рисунок 2.13.

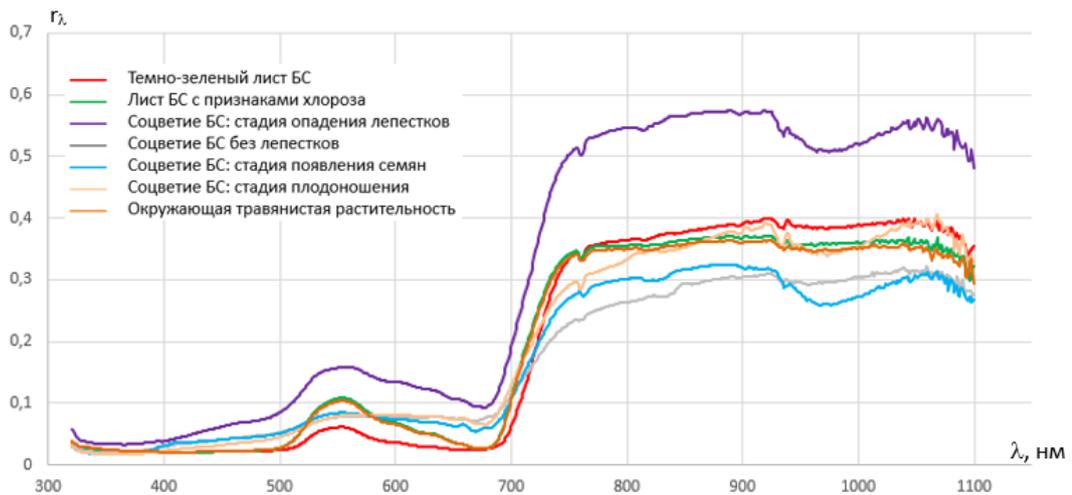


Рисунок 2.13 – Зависимости КСЯ от длины волны, экспедиция от 03 августа 2016

Анализ результатов, приведенных на рисунках 2.12, 2.13, позволил выявить следующие особенности отражательной способности БС в зависимости от длины волны зондирующего излучения:

1) соцветие БС, находящееся в стадии опадения лепестков, имеет наивысшие значения КСЯ на всем исследуемом поддиапазоне длин волн по сравнению с другими объектами, например, значения КСЯ выше, чем у травянистой растительности на 0,05 в синем, на 0,06 в зеленом, на 0,08 в красном и на 0,19 в ближнем инфракрасном поддиапазонах;

2) другие исследованные состояния соцветий БС имеют схожие характеристики отражения. В синем и красном поддиапазонах длин волн данные объекты имеют меньшие значения КСЯ, чем цветущее соцветие (на 0,03-0,05), и большие, чем зеленая раститель-

ность (на 0,02-0,05). В зеленом поддиапазоне длин волн они имеют меньшие значения КСЯ, за исключением темно-зеленого листа БС. В ближнем инфракрасном поддиапазоне длин волн данные объекты имеют наименьшие значения КСЯ;

3) окружающая травянистая растительность в синем и красном поддиапазонах длин волн имеет меньшие значения КСЯ, чем соцветия БС (на 0,02-0,08) и большие, чем листья БС (на 0,01); в зеленом поддиапазоне длин волн – меньшие значения КСЯ, чем значения КСЯ соцветия БС в стадии опадения лепестков и листа с признаками хлороза (на 0,06 и 0,01 соответственно), и большие, чем значения других объектов (на 0,01-0,04); в ближнем инфракрасном поддиапазоне длин волн – меньшие значения КСЯ по сравнению с соцветием в стадии опадения лепестков и листьями БС (на 0,02-0,19) и большие по сравнению с другими объектами (на 0,01-0,09).

Анализ графиков, приведенных на рисунках 2.12, 2.13, в совокупности с данными визуальной оценки площадей – таблица 2.5 – позволяет сделать следующие выводы о соотношении характеристик БС в целом и окружающей травянистой растительности:

- в синей и красной областях спектра БС имеет значения СПЭЯ, схожие со значениями окружающей травянистой растительности, что обусловлено усреднением характеристик отражения элементов БС;

- в зеленой области спектра БС имеет значения СПЭЯ, превышающие показатели окружающей травянистой растительности за счет характеристик отражения соцветий БС в стадии опадения лепестков;

- в ближней инфракрасной области спектра БС имеет значения СПЭЯ, превышающие показатели злаковой травянистой растительности за счет характеристик отражения соцветий БС в стадии опадения лепестков и листьев БС.

Третья в хронологическом порядке экспедиция была проведена также в Бугровском сельском поселении, ЛО, 500 метров от кольцевой автодороги. Дата проведения экспедиции – 06.09.2016 – соответствует переходу от фенологической фазы плодоношения к фенологической фазе увядания БС.

На рисунке 2.14 приведены фотографии полевой экспедиции, на которых изображены различные части БС, использованные в качестве объектов исследования.



Рисунок 2.14 – Фотография из архива фотоматериалов экспедиции от 06 сентября 2016:
 а) Плодоносящее соцветие БС без семян, б) Соцветие БС с семенами, в) Темно-зеленый лист БС, г)
 Желтеющий лист БС, д) Засыхающий лист БС

Результаты измерений были обработаны в ПО DARWin SP в виде зависимостей величины СПЭЯ от длины волны. Полученные графики представлены на рисунке 2.15.

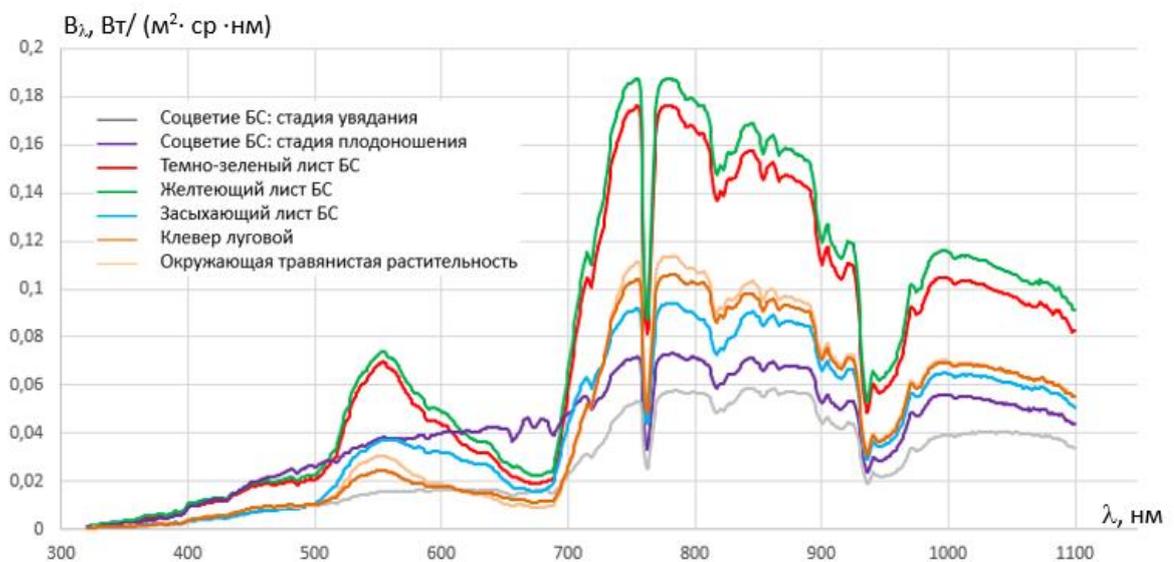


Рисунок 2.15 – Графики зависимостей величины отраженного светового потока от длины волны, экспедиция от 06 сентября 2016

Для приведенных на рисунке 2.15 объектов в ПО DARWin SP были рассчитаны зависимости КСЯ от длины волны – рисунок 2.16.

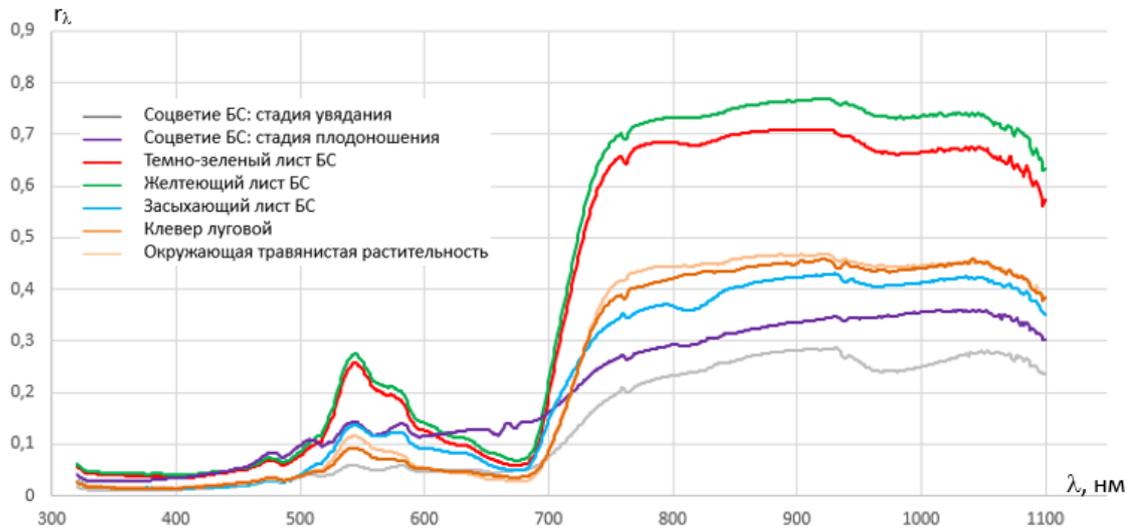


Рисунок 2.16 – Зависимости КСЯ от длины волны, экспедиция от 06 сентября 2016

Анализ результатов, приведенных на рисунках 2.15, 2.16, позволил выявить следующие особенности отражательной способности БС в зависимости от длины волны зондирующего излучения:

1) соцветие БС в стадии увядания имеет наименьшие значения среди всех экспериментальных образцов, за исключением красной области спектра, в которой данный объект имеет более высокие значения КСЯ, чем окружающая зеленая растительность (на 0,01-0,02);

2) соцветие БС в стадии плодоношения имеет наивысшие значения КСЯ в красной области спектра и меньшие значения КСЯ, по сравнению с показателями других объектов за исключением соцветия БС без семян в ближней инфракрасной области;

3) темно-зеленый и желтеющий листья БС имеют наивысшие значения КСЯ в зеленой и инфракрасной областях спектра, в 1,5-5 раз превышающие показатели других объектов;

4) клевер луговой и злаковая травянистая растительность имеют визуально схожие характеристики КСЯ. Данные объекты имеют наименьшие значения КСЯ в синем и красном поддиапазонах спектра. В зеленой области видимого излучения данные образцы имеют меньшие значения среди всех объектов кроме соцветия БС в стадии увядания. В ближней инфракрасной области спектра их значения КСЯ меньше в сравнении со значениями листьев БС (на 0,25-0,29) и больше по сравнению с другими экспериментальными образцами БС (на 0,03-0,18).

Анализ графиков, приведенных на рисунках 2.15, 2.16, в совокупности с данными визуальной оценки площадей – таблица 2.5 – позволяет сделать следующие выводы о соотношении характеристик БС в целом и злаковой травянистой растительности:

- в синей, зеленой и инфракрасной областях спектра БС имеет значения СПЭЯ, превышающие показатели окружающей травянистой растительности;
- в ближней инфракрасной области спектра БС в целом имеет значения, превышающие показатели окружающей травянистой растительности за счет значений СПЭЯ соцветий и большой площади листьев БС.

В результате анализа зависимостей показателей СПЭЯ и КСЯ от длины волны электромагнитного излучения БС и окружающей травянистой растительности были выделены следующие характерные особенности БС в целом вне зависимости от фенологической фазы:

- в синей и красной области спектра БС имеет показатели отражения электромагнитного излучения, схожие со значениями окружающей травянистой растительности; различия зависят от количества и состояния соцветий, а также степени угнетенности листвы;
- в зеленой и инфракрасной области спектра БС имеет показатели отражения электромагнитного излучения, превышающие показатели окружающей травянистой растительности.

В результате проведенных расчетов значений КСЯ на основе данных измерений СПЭЯ полевым портативным спектрометриком PSR-1100 составлена информационная модель БС, представляющая собой совокупность пар значений (r_i, λ_j) , где i – номер элемента БС, j – номер спектрального поддиапазона, $\lambda \in (320; 1100)$ нм – рисунки 2.10, 2.13, 2.16.

2.4. Информационная модель зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным космической системы RapidEye

Спектрометриком PSR-1100 охватываются спектральные поддиапазоны длин волн электромагнитного излучения, которые фиксируются съемочной аппаратурой КА RapidEye – рисунок 2.17. Принимая во внимание тот факт, что одной из подзадач данной работы являлся поиск информативных признаков зон произрастания БС для решения задачи его обнаружения по мультиспектральным спутниковым данным, результаты, полученные по данным PSR-1100, являлись опорной информацией для интерпретации спутниковых снимков.

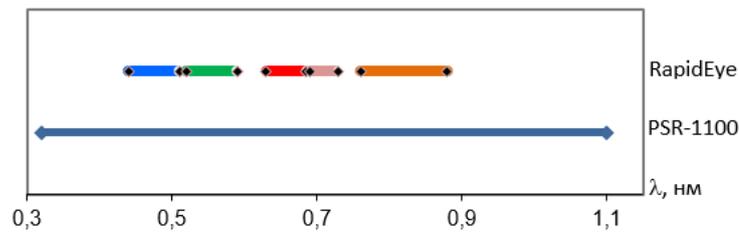


Рисунок 2.17 – Поддиапазоны длин волн, фиксируемые КА RapidEye и портативным спектрометрическим прибором Spectral Evolution PSR-1100

Рассчитанный по результатам измерений PSR-1100 КСЯ по определению не подвержен влиянию атмосферы. Характеристика СПЭЯ, также рассчитанная по результатам измерений PSR-1100, является мерой потока отраженного электромагнитного излучения после прохождения им атмосферы. Характеристики спектрального отражения, представленные в виде яркостей пикселей спутникового снимка, является мерой потока отраженного электромагнитного излучения после прохождения им атмосферы дважды.

Процедура атмосферной коррекции, реализованная в некоторых ГИС обработки данных ДЗЗ, таких как ERDAS Imagine, ENVI, QGIS и др., позволяет минимизировать влияние различий в освещенности снимка и влияние атмосферы. Пиксели снимка, для которых была проведена данная процедура, принимают значения СПЭЯ, как было показано автором в статье [109] на примере лиственного леса – таблица 2.6.

Таблица 2.6 – Пересчет значений спектральной яркости в значения СПЭЯ для спутниковых снимков КА RapidEye

Снимок, величина	Параметр	0,44-0,51 нм	0,52-0,59 нм	0,63-0,685 нм	0,69-0,73 нм	0,76-0,88 нм
31-05-2009, L($\Delta\lambda$)	Мат. ож. СКО	4514 68.5	3365 72.1	1301 64.8	2862 113.9	6108 392.6
01-06-2011, L($\Delta\lambda$)	Мат. ож. СКО	4645 13.15	3542 40.4	1729 16.97	3009 75.3	6795 314.7
31-05-2009, B($\Delta\lambda$)	Мат. ож. СКО	87 19.7	303 29.3	7.5 8.1	538 59.35	2039 196.5
01-06-2011, B($\Delta\lambda$)	Мат. ож. СКО	133 20.8	329 41.1	104 26.13	555 73.1	1995 275.6

Однако процедура атмосферной коррекции требует больших временных затрат на установку параметров обработки и на проведение самой процедуры коррекции. Проведение атмосферной коррекции, как показано в [204] не позволяет с высокой точностью восстановить значения КСЯ по спутниковым снимкам. Усредненные параметры модели кор-

рекции не приводят к удовлетворительному результату. Метод идентификации классов подстилающей поверхности приведен автором в [205-206].

Тем не менее, характерные особенности классов объектов подстилающей поверхности в отдельных каналах съемки будут проявляться в равной степени независимо от проведения или не проведения атмосферной коррекции. Это обусловлено идентичностью параметров коррекции для всех пикселей каждого канала снимка в отдельности. Таким образом, абсолютные значения пикселей, принадлежащие объектам различных классов на различных снимках, могут быть различны, тогда как их относительные показатели друг относительно друга будут оставаться неизменными. Данным наблюдением обуславливается широкое распространение индексных изображений в ДЗЗ.

В рамках настоящего исследования характеристики спектрального отражения БС были также определены по мультиспектральным данным космической системы RapidEye. Снимки КА RapidEye были приведены к уровню обработки L1B и не подвергались процедуре атмосферной коррекции.

В качестве исходных данных использовались снимки КА RapidEye за 2013 год, их перечень приведен в таблице 2.7. Также в таблице представлена фенологическая фаза БС на снимке и номер КА RapidEye в группировке.

Таблица 2.7 – Используемые многоспектральные спутниковые снимки КА RapidEye

№	Название	Районы ЛО	Фен. фаза	№ RE
1	2013-07-27_103357	Приозерский	цветение	5
2	2013-07-30_101547	Гатчинский, Волосовский, Лужский, Приозерский	цветение	4
3	2013-08-07_102850	Гатчинский, Волосовский, Приозерский	цветение	2
4	2013-09-06_101359	Гатчинский, Лужский, Приозерский	плодоношение	4
5	2013-09-07_095958	Бокситогорский, Подпорожский, Тихвинский	плодоношение	1
6	2013-09-07_101703	Гатчинский, Лужский, Приозерский	плодоношение	5

На территории, охватываемой снимками, были выделены зоны произрастания БС, подтвержденные специалистами Агрофизического института, ГУАП, ЦНИИ РТК, Россельхозцентра и лично автором. Географические координаты и внешний вид выбранных тестовых участков по спутниковым снимкам приведены в приложении Б.

Для каждого тестового участка при помощи модуля Objective ПО ERDAS Imagine Professional были рассчитаны статистические характеристики распределений значений

спектральных яркостей во всех пяти каналах съемки: математическое ожидание и средне-квадратическое отклонение (СКО):

$$M(L) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i, \quad (2.11)$$

$$s(L) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - M(L))^2}, \quad (2.12)$$

где $M(L)$ – математическое ожидание величины спектральной яркости; $L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ – множество спектральных яркостей пикселей снимка; L_i – спектральная яркость i -го пикселя; n – количество исследованных пикселей снимка (размер выборки); i – номер пикселя снимка; $s(L)$ – СКО величины спектральной яркости.

Информационная модель зон произрастания БС, составленная по результатам анализа спутниковых снимков КА RapidEye, представляет собой совокупность значений $(M(L_j), s(L_j), \lambda_j)$, где j – номер спектрального поддиапазона, $\lambda \in ((0,44-0,51); (0,52-0,59); (0,63-0,685); (0,69-0,73); (0,76-0,88))$ нм.

Результаты расчетов для тестовых участков приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей БС на тестовых участках

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	0,44- 0,51 нм	0,52- 0,59 нм	0,63- 0,685 нм	0,69- 0,73 нм	0,76- 0,88 нм
2013-07-27_103357-1 (86)	M(L) s(L)	4639.29 166.45	4288.87 376.17	2407.24 273.55	4690.91 551.63	9438.98 924.39
2013-07-27_103357-2 (105)	M(L) s(L)	4711.94 123.49	4865.91 268.03	2649.17 168.58	5311.96 328.60	9526.83 599.06
2013-07-27_103357-3 (150)	M(L) s(L)	4258.10 987.45	4025.88 1153.24	1999.93 546.35	4337.31 1494.60	9120.06 3123.69
2013-07-30_101547-1 (399)	M(L) s(L)	3976.43 1475.81	3734.95 1393.97	2749.74 1031.34	5056.72 1878.09	8579.84 3182.11
2013-07-30_101547-2 (39)	M(L) s(L)	4662.64 181.97	4488.36 375.22	2767.41 155.20	4532.74 417.87	8064.44 712.12
2013-07-30_101547-3 (22)	M(L) s(L)	4633.23 140.96	4305.91 251.02	2658.68 173.62	4380.91 313.46	8036.68 502.63
2013-08-07_102850-1 (143)	M(L) s(L)	4267.32 2090.67	3993.43 1927.62	2609.89 1413.07	3693.08 1796.98	6943.56 3350.73
2013-08-07_102850-2 (48)	M(L) s(L)	4755.63 224.49	4487.69 246.34	2778.44 279.72	4689.00 242.41	7775.75 400.82

Продолжение таблицы 2.8

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	0,44- 0,51 нм	0,52- 0,59 нм	0,63- 0,685 нм	0,69- 0,73 нм	0,76- 0,88 нм
2013-08-07_102850-3 (196)	M(L) s(L)	4641.78 585.84	4332.69 616.19	2538.06 934.37	4419.18 453.60	8693.49 1091.11
2013-09-06_101359-1 (273)	M(L) s(L)	3849.85 133.46	3612.08 431.68	2155.67 180.45	3689.48 567.66	6254.79 689.92
2013-09-06_101359-2 (99)	M(L) s(L)	3950.49 230.60	3962.09 304.47	2358.81 457.46	4170.72 470.78	7047.83 1354.69
2013-09-06_101359-3 (80)	M(L) s(L)	3937.86 392.14	3914.61 529.65	2393.93 516.69	3916.00 503.00	6365.14 843.73
2013-09-07_095958-1 (80)	M(L) s(L)	3765.94 140.80	3507.35 221.62	1546.14 83.77	4181.38 378.96	9027.76 758.21
2013-09-07_095958-2 (116)	M(L) s(L)	3831.27 90.56	3619.23 165.63	1720.18 89.72	4018.64 233.64	7667.49 567.89
2013-09-07_095958-3 (34)	M(L) s(L)	3752.65 83.33	3362.29 57.20	1487.29 75.56	3919.18 92.40	9212.15 676.64
2013-09-07_101703-1 (233)	M(L) s(L)	3641.23 503.29	3202.49 669.34	1599.11 303.69	3472.67 1088.68	7190.53 2312.51
2013-09-07_101703-2 (271)	M(L) s(L)	3645.29 605.52	3431.00 664.69	1589.12 282.78	3854.69 959.45	7661.21 2211.12
2013-09-07_101703-3 (212)	M(L) s(L)	3610,61 1036,04	3467,12 1028,9	2041,57 596,76	3460,96 1073,35	6620,42 1714,59

С точки зрения математической статистики выделенные зоны произрастания БС являются выборочными совокупностями (выборками). Для каждой выборки в отдельности, помимо количества пикселей выборки, рассчитываются следующие статистические характеристики спектральных яркостей пикселей: математическое ожидание, СКО.

При расчете математического ожидания могут возникнуть ошибки двух видов: систематическая и случайная. Систематическая ошибка зависит от различных факторов, оказывающих постоянное воздействие на исследование и смещающих результаты исследования в определенную сторону [207]. В качестве систематической ошибки может рассматриваться различие параметров и настроек отдельных спутников в группировке КА RapidEye.

$$L_{изм} - \Delta L \leq L_{ист} \leq L_{изм} + \Delta L, \quad (2.13)$$

где $L_{ист}$ – истинное значение величины спектральной яркости, $L_{изм}$ – измеренное значение величины спектральной яркости, ΔL – ошибка измерений.

Принимая во внимание официальную информацию владельцев группировки, подчеркивающих, что показатели снимков с различных КА группировки, приведенных к уровню обработки L1B, не имеют различий, вопрос наличия систематической ошибки далее не анализировался. Случайная ошибка вызывается, как правило, большим количеством различных причин, такими как неоднородность атмосферы, различное состояние растений БС, различный процент площади соцветий. Следует отметить, что размер пикселей снимков КА RapidEye — 6,5 метров — превышает размер одного растения БС. Каждый пиксель снимка содержит интегральную спектральную яркость всех объектов, охватываемых им. Таким образом, значение одного пикселя может формироваться из объектов различных типов подстилающей поверхности: почвы, теней и прочего – что можно считать случайной ошибкой при расчете характеристик спектрального отражения БС. С целью исключения подобных ошибок выборки формировались только для участков с густо растущим БС, причем края засоренных зон не использовались из-за высокой вероятности попадания других объектов и ландшафтов. Для рассмотренных участков БС была рассчитана стандартная ошибка среднего, зависящая от размера выборки и рассчитываемая по формуле:

$$S_E(L) = \frac{s(L)}{\sqrt{n}}, \quad (2.14)$$

где $S_E(L)$ - стандартная ошибка среднего; $s(L)$ - СКО выборки; n – размер выборки. В таблице 2.9 приведены результаты расчета стандартной ошибки среднего для тестовых участков БС в каждом канале КА RapidEye.

Таблица 2.9 – Результаты расчета стандартной ошибки среднего для тестовых участков БС (округление до первого знака после запятой)

№ участка (кол-во пикселей)	0,44-0,51 нм	0,52-0,59 нм	0,63-0,685 нм	0,69- 0,73 нм	0,76- 0,88 нм
2013-07-27_103357-1 (86)	17,9	40,6	29,5	59,5	99,7
2013-07-27_103357-2 (105)	12	26,2	16,5	32,1	58,5
2013-07-27_103357-3 (150)	80,6	94,2	44,6	122	255
2013-07-30_101547-1 (399)	73,9	69,8	51,6	94	159,3
2013-07-30_101547-2 (39)	29,1	60,1	24,9	66,9	114
2013-07-30_101547-3 (22)	30,1	53,5	37	66,8	107,2
2013-08-07_102850-1 (143)	174,8	161,2	118,2	150,2	280,2
2013-08-07_102850-2 (48)	32,4	35,6	40,4	35	57,9

Продолжение таблицы 2.9

№ участка (кол-во пикселей)	0,44-0,51 нм	0,52-0,59 нм	0,63-0,685 нм	0,69- 0,73 нм	0,76- 0,88 нм
2013-08-07_102850-3 (196)	41,8	44	66,7	32,4	77,9
2013-09-06_101359-1 (273)	8,1	26,1	10,9	34,4	41,8
2013-09-06_101359-2 (99)	23,2	30,6	46	47,3	136,2
2013-09-06_101359-3 (80)	41,6	56,1	54,8	53,3	89,4
2013-09-07_095958-1 (80)	15,7	24,8	9,4	42,4	84,8
2013-09-07_095958-2 (116)	8,4	15,4	8,3	21,7	52,7
2013-09-07_095958-3 (34)	14,3	9,8	13	15,8	116
2013-09-07_101703-1 (233)	33	43,8	19,9	71,3	151,5
2013-09-07_101703-2 (271)	36,8	40,4	17,2	58,3	134,3
2013-09-07_101703-3 (212)	71,2	70,7	41	73,7	117,8

Величина стандартной ошибки среднего для участка БС 2013-08-07_102850-1 оказалась наибольшей среди всех измерений для каждого канала в отдельности. При этом в отдельных каналах ее величина более чем в 2 раза превышает следующее по величине значение стандартной ошибки. Результат может быть объяснен наличием объектов других классов в выделенном участке, например, почвы или травянистой растительности. Тем не менее, данный эталонный участок не будет исключен из рассмотрения в связи с подтвержденным фактом наличия БС.

Для остальных эталонных участков значения стандартной ошибки в синем канале съемки находятся в поддиапазоне от 8,4 до 80,6; в зеленом – от 9,8 до 94,2; в красном – от 8,3 до 66,7; в крайнем красном – от 15,8 до 122; в ближнем инфракрасном – от 41,8 до 255. Следует заметить, что наибольшее значение стандартной ошибки среднего, приведенное в таблице 2.9 составляет 4% от значения математического ожидания, что считалось приемлемым в данном исследовании.

Все тестовые участки разделены на две группы в соответствии с фенологической фазой, то есть с периодом съемки. Периодом смены фенологической фазы БС, как показано в разделе 1, является середина августа. На рисунках 2.18-2.19 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости БС от поддиапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye для фенологических фаз цветения и плодоношения соответственно.

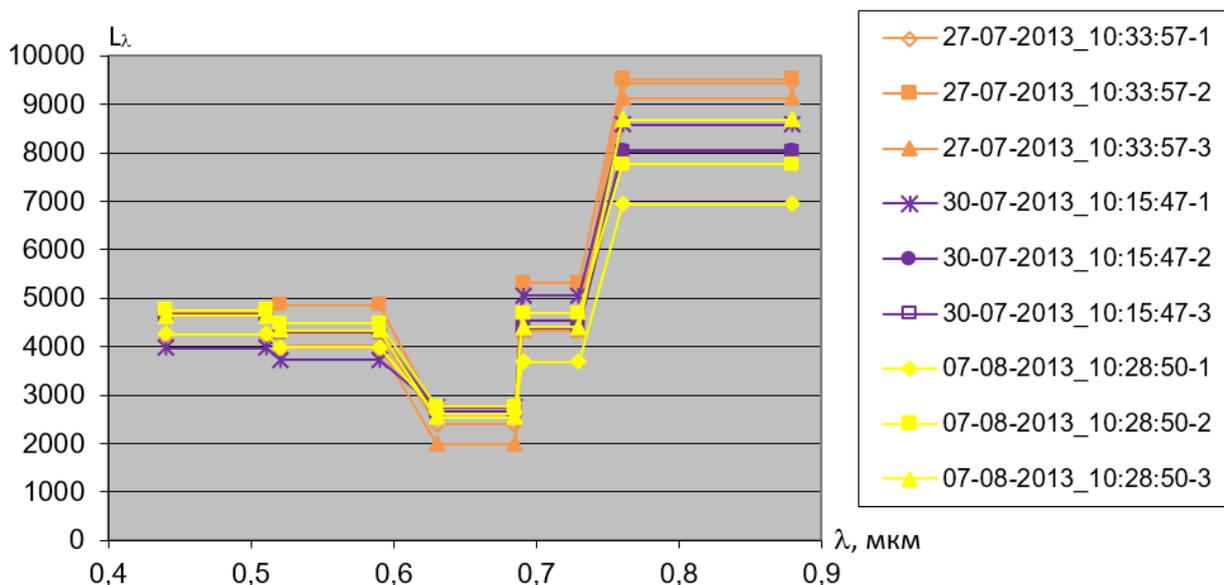


Рисунок 2.18 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости БС от поддиапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, фенологическая фаза цветения

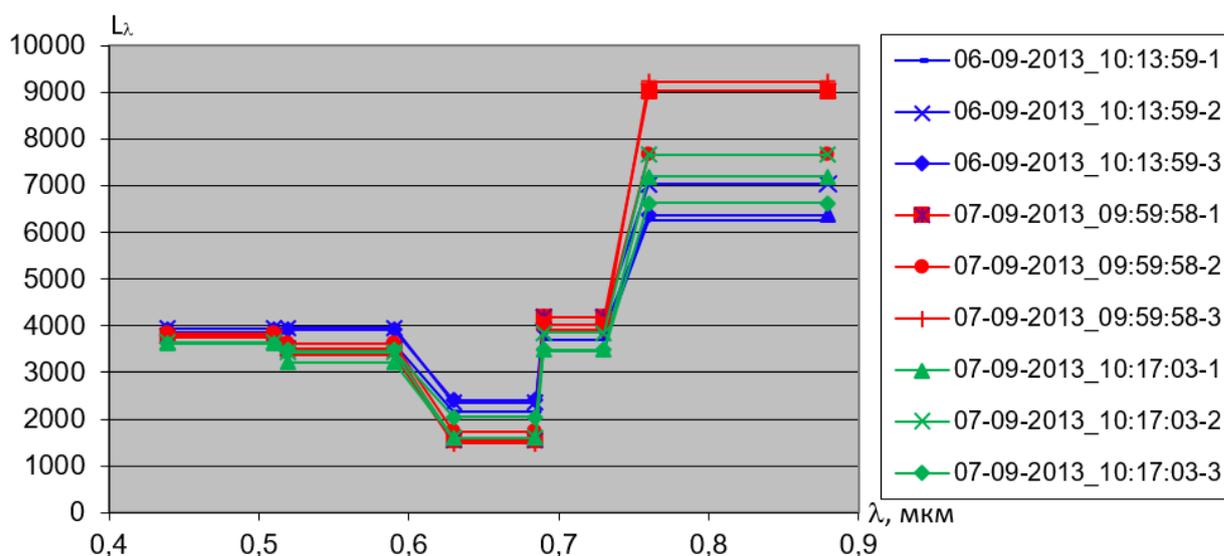


Рисунок 2.19 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости БС от поддиапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, фенологическая фаза плодоношения

В результате анализа зависимостей, приведенных на рисунках 2.18-2.19, можно сделать следующие выводы:

- 1) характеристики спектрального отражения тестовых участков БС разных фенологических фаз визуально схожи;
- 2) характеристики спектрального отражения тестовых участков БС фазы цветения имеют меньший на 20% диапазон значений математических ожиданий, чем характеристики тестовых участков БС фазы плодоношения в красном и ближнем инфракрасном кана-

лах, и большой диапазон значений в синем, зеленом и крайнем красном канале – таблица 2.10.

Таблица 2.10 – Диапазоны значений математических ожиданий в различных каналах съемки КА RapidEye для фаз цветения и плодоношения БС (округление до четвертого значимого разряда)

Канал съемки	Фаза цветения БС			Фаза плодоношения БС		
	Мин. мат.ож.	Макс. мат.ож.	Разность	Мин. мат.ож.	Макс. мат.ож.	Разность
BLUE	3976	4756	780	3611	3950	339
GREEN	3735	4866	1131	3202	3962	760
RED	2000	2778	778	1487	2394	907
RED EDGE	3693	5312	1619	3461	4181	720
NIR	6944	9527	2585	6255	9212	2957

3) в фазе цветения БС имеет большие значения во всех каналах, кроме ближнего инфракрасного, что объясняется наличием белых зонтичных соцветий;

4) характеристики спектрального отражения тестовых участков БС в синем, зеленом и крайнем красном каналах съемки имеют близкие значения вне зависимости от фазы цветения.

Информационная модель зон произрастания БС, построенная по спутниковым снимкам КА RapidEye для фенологических фаз цветения и плодоношения БС, приведена в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Информационная модель зон произрастания БС, построенная по спутниковым снимкам КА RapidEye

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	0,44-0,51 нм	0,52-0,59 нм	0,63-0,685 нм	0,69-0,73 нм	0,76-0,88 нм
фенологическая фаза цветения	M[L]	4335,95	4107,19	2569,68	4648,01	8556,27
	s[L]	1009,27	1025,32	793,93	1208,92	2215,23
фенологическая фаза плодоношения	M[L]	3742,60	3517,35	1876,53	3758,81	7149,13
	s[L]	440,80	560,42	307,20	746,50	1459,96

Значения спектральных яркостей зон произрастания БС по спутниковым снимкам КА RapidEye для фенологической фазы цветения выше во всех рассмотренных спектральных поддиапазонах. Полученный результат подтверждает результаты измерений полевым портативным спектрорадиометром.

Выводы по разделу 2

По результатам разработки информационной модели зон произрастания БС по данным полевого портативного спектрорадиометра и спутниковым данным КА RapidEye сформулированы следующие выводы:

1. Подходящими для распознавания БС и контроля зон произрастания БС по спутниковым снимкам являются мультиспектральные данные среднего и высокого ПР, в частности, полученные с КА RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A, исходя из недостаточной детальности данных низкого ПР и недостаточного покрытия территорий данными сверхвысокого ПР.

2. Для разработки информационной модели зон произрастания БС по спутниковым снимкам целесообразно использовать яркостные информативные признаки ввиду того, что данный объект контроля имеет случайную форму и только в редких случаях соответствуют контурам отдельных полей, имеющих правильную геометрическую форму, но при этом имеет отличия в характеристиках отражения волн оптического диапазона.

3. По результатам проведения полевых экспедиций по данным полевого портативного спектрорадиометра PSR-1100 была разработана информационная модель зон произрастания БС в виде упорядоченных пар значений (r_i, λ_j) , $\lambda \in (320; 1100)$ нм, которая позволяет проводить контроль состояния растений БС и является опорной для составления информационной модели зон произрастания БС по спутниковым снимкам.

4. Структурные элементы БС (соцветия, листья) отличаются по показателям СПЭЯ и КСЯ от травянистой растительности в каждой из рассмотренных фенологических фаз.

5. По результатам анализа спутниковых снимков КА RapidEye построена информационная модель зон произрастания БС, представляющая собой совокупность значений $(M(L_j), s(L_j), \lambda_j)$, где j – номер спектрального поддиапазона, $\lambda \in ((0,44-0,51); (0,52-0,59); (0,63-0,685); (0,69-0,73); (0,76-0,88))$ нм.

3. РАЗРАБОТКА СПОСОБА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗОН ПРОИЗРАСТАНИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО

Как было показано в разделе 2, из всего многообразия дешифровочных признаков объектов подстилающей поверхности по мультиспектральным спутниковым снимкам для задач распознавания БС и контроля зон произрастания БС информативными являются яркостные характеристики. В разделе 3 с использованием разработанной информационной модели зон произрастания БС определены и проанализированы яркостные информативные признаки зон произрастания БС, на основе которых разработано спектральное отношение – индекс БС – HSI.

3.1. Информативные признаки зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным космической системы RapidEye

Для определения спектрального отношения по мультиспектральным данным космической съемки, отражающего информативные признаки БС, проанализированы характеристики отражения волн оптического диапазона от различных элементов подстилающей поверхности и их отличия от характеристик информационной модели зон произрастания БС. Задача поиска информативных признаков зон произрастания БС решается с использованием теории распознавания образов. Тестовые участки являются эталонами выбранных классов объектов. Эталон для каждого класса объектов по обучающей выборке определяется выражением:

$$x_i^0 = \{x_{i1}^0, x_{i2}^0, \dots, x_{ij}^0, \dots, x_{iM}^0\}, \quad (3.1)$$

где i – номер класса объектов; X – признаковое (выборочное) пространство; X^0 – набор признаков эталона; M – размерность признакового пространства (количество признаков, характеризующих распознаваемые объекты); x_{ij}^0 – признак i -го класса объектов; j – номер признака.

Принимая во внимание тот факт, что эталоны состоят из совокупности пикселей спутниковых снимков, каждый признак в отдельности описывается выражением:

$$x_{ij}^0 = \{x_{ij1}^0, x_{ij2}^0, \dots, x_{ijk}^0, \dots, x_{ijn}^0\}, \quad (3.2)$$

где k – номер пикселя эталона; n – количество пикселей эталона.

Информативные признаки далее используются при формировании спектральных признаков зон произрастания БС. В качестве информативных признаков используются спектральные яркости пикселей в съемочных каналах КА RapidEye.

Далее в данном подразделе приведены результаты расчета статистических характеристик распределения значений спектральных яркостей по снимкам КА RapidEye, перечень которых приведен в таблице 2.6 (п. 2.4), для следующих классов объектов:

- сельскохозяйственные поля (2 тестовых примера, отражающие различные возделываемые сельскохозяйственные культуры или стадии сельскохозяйственных работ);
- смешанные леса;
- обнаженный грунт/почва;
- болотистая растительность;
- урбанизированные зоны;
- водные объекты;
- облака.

Географические координаты и внешний вид по спутниковым снимкам выбранных тестовых участков приведены в приложении В.

Далее, на рисунках 3.1-3.6, не приведены графики спектральных яркостей облачности, поскольку их значения расширяют диапазон значений по оси ординат, что приводит к трудностям визуального анализа характеристик других классов объектов.

В таблице 3.1 приведены результаты расчета статистических характеристик (математическое ожидание и СКО) распределений значений спектральных яркостей классов объектов, приведенных выше, по снимку 27.07.2013 10:33:57 GMT (Greenwich Mean Time).

Таблица 3.1 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей типов подстилающей поверхности на тестовых участках, снимок КА RapidEye, 27.07.2013 10:33:57 GMT

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
С/х поля-1 (94)	$M(L)$ $s(L)$	4380.30 706.55	3743.28 799.19	2285.70 627.74	3677.54 977.76	7780.24 1689.55
С/х поля-2 (381)	$M(L)$ $s(L)$	4588.25 183.04	4122.85 155.77	2591.42 328.20	4084.20 129.38	8090.79 969.71
Смешанный лес (962)	$M(L)$ $s(L)$	3802.40 807.76	2546.75 555.77	1318.86 289.85	1828.40 454.05	3891.12 1278.01
Обнаженный грунт/почва (229)	$M(L)$ $s(L)$	4547 367,89	3523,05 404,84	2587,59 767	3189,41 505,35	5142,07 773,35

Продолжение таблицы 3.2

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
Болотная растительность (9251)	$M(L)$	3771.51	3174.96	2223.18	2825.11	4658.38
	$s(L)$	1957.49	1652.02	1184.93	1483.23	2496.98
Урбанизированные зоны (46)	$M(L)$	6133.24	5185.70	4379.50	4206.11	4943.67
	$s(L)$	772.71	723.93	1009.17	761.83	1005.41
Водные объекты (8543)	$M(L)$	3578.69	2186.12	1121.32	805.10	478.39
	$s(L)$	1353.92	827.95	426.92	306.58	185.56
Облака (4980)	$M(L)$	24133.54	22977.06	21176.73	18552.60	16622.64
	$s(L)$	7920.35	7619.71	6825.08	5970.02	5311.21

На рисунке 3.1 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye. Для удобства визуального восприятия графиков, характеристики облачности, многократно превышающие по значениям характеристики других классов, на рисунке не отображены.

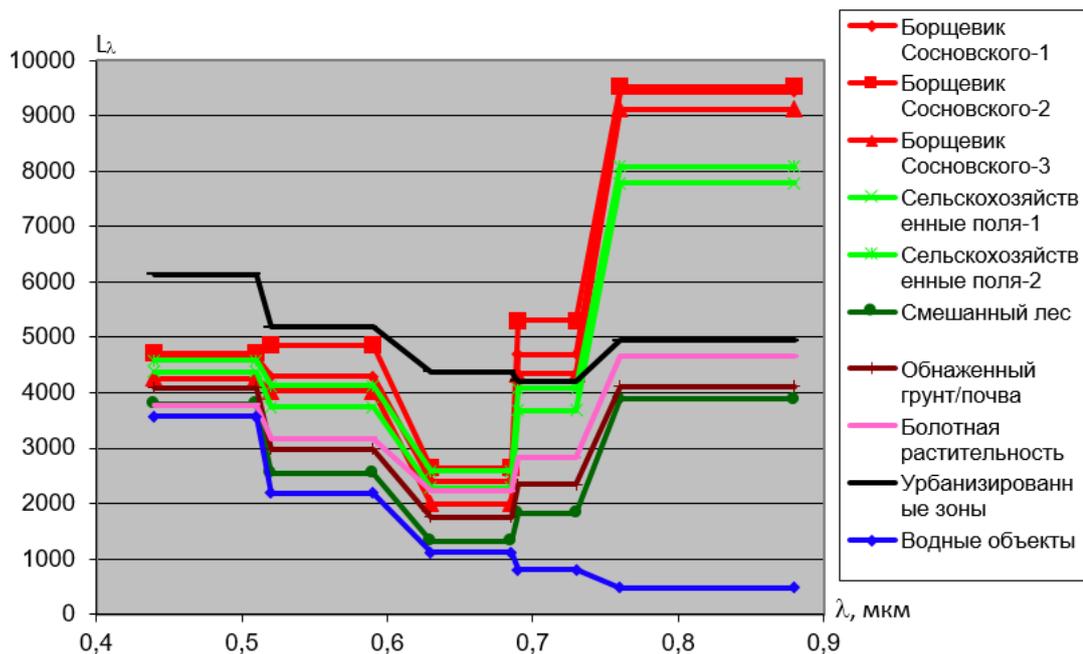


Рисунок 3.1 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, 27.07.2013

10:33:57 GMT

В таблице 3.2 приведены результаты расчета статистических характеристик (математическое ожидание и СКО) распределений значений спектральных яркостей классов объектов, приведенных выше, по снимку 30.07.2013 10:15:47 GMT.

Таблица 3.2 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей типов подстилающей поверхности на тестовых участках снимок КА RapidEye, 30.07.2013 10:15:47 GMT

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
С/х поля-1 (3081)	$M(L)$ $s(L)$	3567,33 1919,8	3153,36 1719,45	1960,6 1105,21	3165,69 1741,15	5462,12 3081,8
С/х поля-2 (3859)	$M(L)$ $s(L)$	4104,75 1066,68	3608,17 968,37	1801,81 549,71	3928,03 1067,83	9727,74 2902,36
Смешанный лес (7839)	$M(L)$ $s(L)$	3776,26 1083,28	2782,67 803,71	1457,41 422,03	2438,24 717,96	6951,64 2098,84
Обнаженный грунт/почва (450)	$M(L)$ $s(L)$	4143,05 100,11	3093,11 163,64	2657,53 126,6	3052,21 238,32	5149 648,07
Болотная расти- тельность (4737)	$M(L)$ $s(L)$	4057,97 1305,01	3440,03 1107,65	2407,84 782,06	3811,34 1241,64	6665,29 2198,14
Урбанизированные зоны (57)	$M(L)$ $s(L)$	5133,51 1696,18	4277,44 2079,64	3258,16 2437,84	3253,89 1667,49	4696,58 1289,61
Водные объекты (21416)	$M(L)$ $s(L)$	2954,18 1818,76	1807,7 1113,06	989,12 609,98	677,52 418,01	350,22 217,42
Облака (22437)	$M(L)$ $s(L)$	16224,17 5404,99	15165,96 5077,89	12927,33 4361,26	12174,62 4045,87	12175,4 3965,94

На рисунке 3.2 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye.

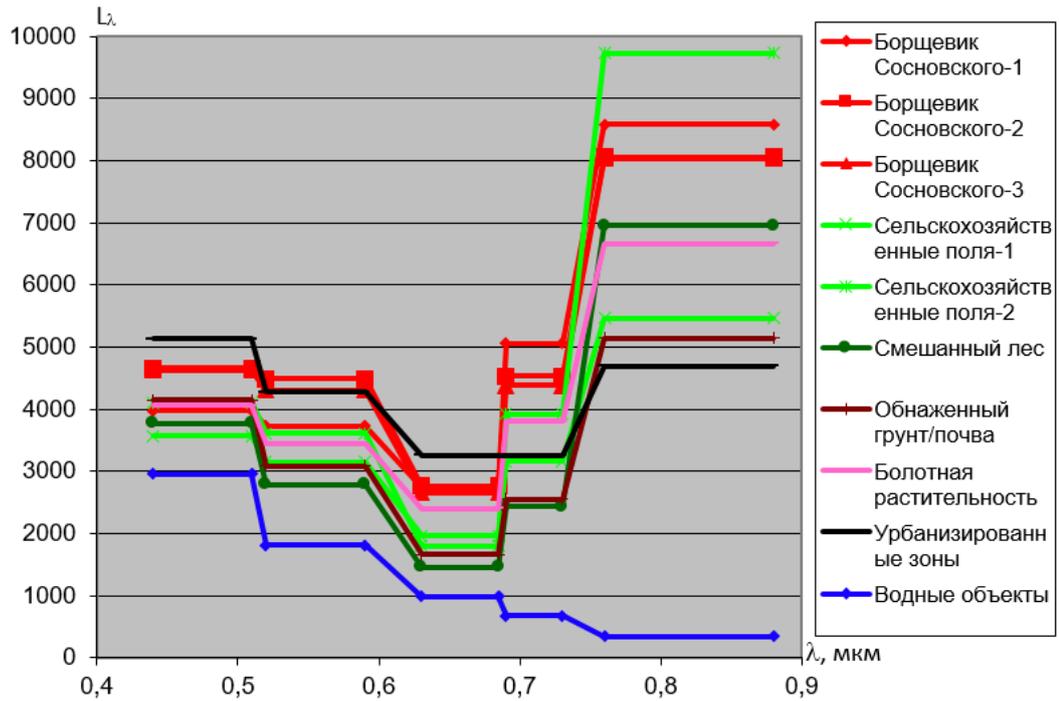


Рисунок 3.2 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, 30.07.2013

10:15:47 GMT

В таблице 3.3 приведены результаты расчета статистических характеристик (математическое ожидание и СКО) распределений значений спектральных яркостей классов объектов, приведенных выше, по снимку 07.08.2013 10:28:50 GMT.

Таблица 3.3 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей типов подстилающей поверхности на тестовых участках снимок КА RapidEye, 07.08.2013 10:28:50 GMT

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
С/х поля-1 (2016)	$M(L)$	4638,8	3973,28	2705,05	3600,6	6975,53
	$s(L)$	1018,1	916,2	758,22	862,79	1415,36
С/х поля-2 (3906)	$M(L)$	4191,58	3515,41	1883,43	3287,94	7798,64
	$s(L)$	1342,58	1136,04	646,36	1087,08	2844,91
Смешанный лес (2759)	$M(L)$	4412,77	3309,25	1754,06	2870,71	6974,93
	$s(L)$	1125,17	850,95	461,49	778,12	1991,26
Обнаженный грунт/почва (334)	$M(L)$	4364,03	3481,84	2795,04	3122,7	4956,06
	$s(L)$	1197,74	1029,08	1078,23	1026,71	1441,86
Болотная расти- тельность (13185)	$M(L)$	4162,16	3601,18	2635,35	3871,02	6304,65
	$s(L)$	1775,53	1553,38	1171,87	1711,08	2810,65

Продолжение таблицы 3.3

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
Урбанизированные зоны (85)	$M(L)$	7665,68	6836,32	5801,09	4687,29	4695
	$s(L)$	1406,03	1548,52	1458,63	928,85	963,85
Водные объекты (3507)	$M(L)$	3335,59	2015,26	1113,46	732,89	440,59
	$s(L)$	1426,15	863,92	476,51	321,18	193,96
Облака (47632)	$M(L)$	27099,62	25562,06	23772,57	19661,18	17427,73
	$s(L)$	13854,59	13329,02	12536,48	10268,33	9117,3

На рисунке 3.3 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye.

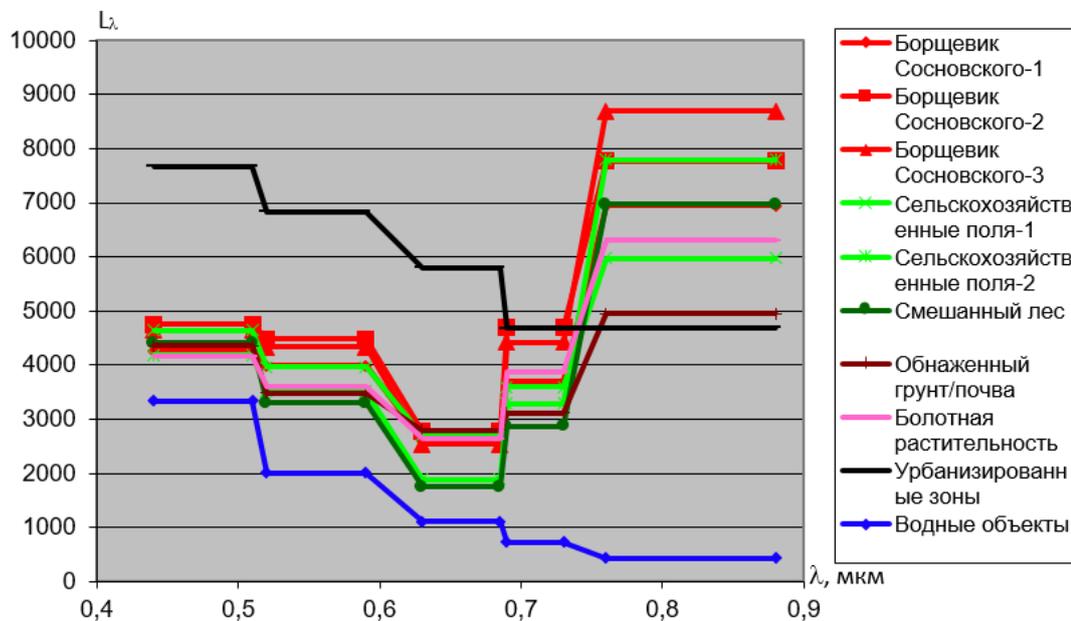


Рисунок 3.3 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, 07.08.2013

10:28:50 GMT

В результате анализа графиков, приведенных на рисунках 3.1-3.3, можно сделать следующие выводы об информативных признаках БС:

- БС имеет наибольшие значения спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне, наряду с сельскохозяйственными полями;

- БС имеет наибольшие значения спектральной яркости в крайнем красном поддиапазоне за исключением результатов анализа снимка 07.08.2013 10:28:50 GMT, по которым высокие значения также имеют урбанизированные зоны и болотная растительность;

- БС имеет большие значения спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах наряду с сельскохозяйственными полями среди всех рассматриваемых классов объектов кроме урбанизированных зон;

- БС имеет наиболее близкие значения спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах по сравнению с другими классами объектов.

В таблице 3.4 приведены результаты расчета статистических характеристик (математическое ожидание и СКО) распределений значений спектральных яркостей классов объектов, приведенных выше, по снимку 06.09.2013 10:13:59 GMT.

Таблица 3.4 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей типов подстилающей поверхности на тестовых участках снимок КА RapidEye, 06.09.2013 10:13:59 GMT

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
С/х поля-1 (1687)	$M(L)$	4489.23	3946.33	3533.15	3359.82	3599.22
	$s(L)$	1499.07	1321.63	1250.88	1113.00	1388.42
С/х поля-2 (3769)	$M(L)$	3217.95	2935.90	1604.59	2895.84	6075.35
	$s(L)$	1248.99	1141.44	626.79	1127.16	2379.94
Смешанный лес (4495)	$M(L)$	3294.68	2381.58	1326.61	1971.98	4397.92
	$s(L)$	743.77	553.77	310.60	504.79	1282.34
Обнаженный грунт/почва (240)	$M(L)$	3666,59	2828,85	2040,54	2500	3443,79
	$s(L)$	92,33	138,63	157,37	214,93	490,12
Болотная расти- тельность (21340)	$M(L)$	3422.41	2671.46	2097.88	2957.76	4318.12
	$s(L)$	949.16	742.71	590.50	832.82	1248.18
Урбанизированные зоны (81)	$M(L)$	6542.14	5720.74	4352.40	3898.85	4234.85
	$s(L)$	1681.29	1793.21	1223.86	727.13	732.87
Водные объекты (88456)	$M(L)$	2800.10	1679.57	931.85	598.09	330.86
	$s(L)$	1315.01	794.98	439.59	283.41	158.24

На рисунке 3.4 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye.

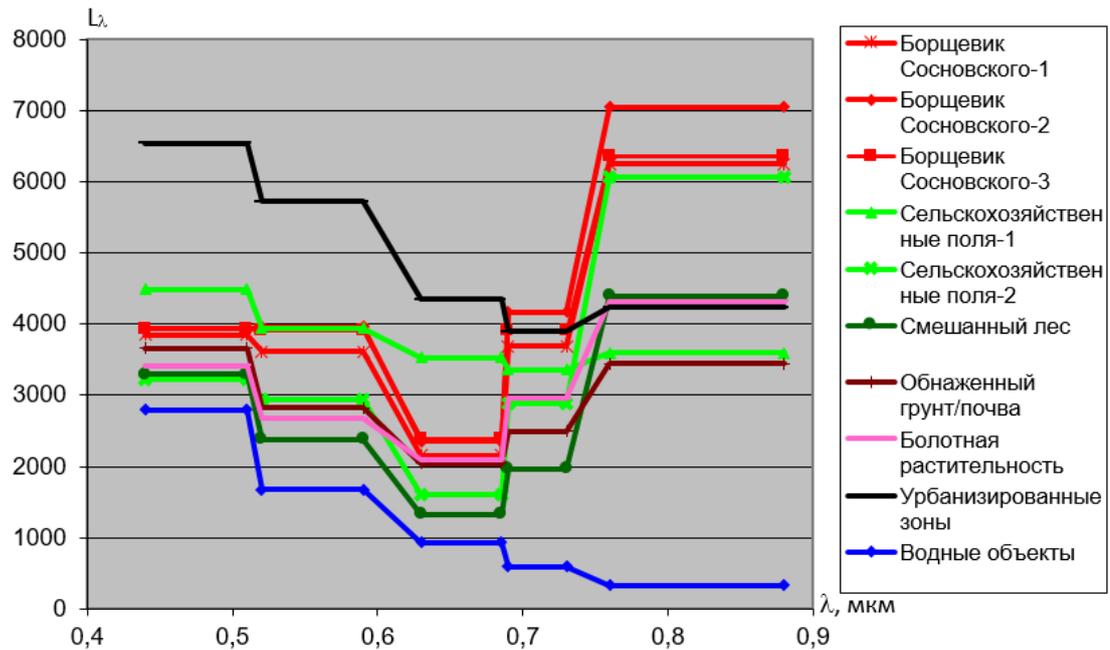


Рисунок 3.4 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, 06.09.2013 10:13:59 GMT

В таблице 3.5 приведены результаты расчета статистических характеристик (математическое ожидание и СКО) распределений значений спектральных яркостей классов объектов, приведенных выше, по снимку 07.09.2013 09:59:58 GMT.

Таблица 3.5 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей типов подстилающей поверхности на тестовых участках снимок КА RapidEye, 07.09.2013 09:59:58 GMT

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
С/х поля-1 (578)	$M(L)$	3669.17	2820.56	1687.09	2999.27	5289.51
	$s(L)$	168.96	237.61	377.84	300.42	452.23
С/х поля-2 (232)	$M(L)$	4127.72	3290.06	2578.24	3124.87	4125.09
	$s(L)$	228.04	185.21	378.25	207.81	662.76
Смешанный лес (2519)	$M(L)$	3450.46	2342.93	1202.64	2131.24	4734.54
	$s(L)$	427.17	325.43	177.21	421.86	1135.14
Обнаженный грунт/почва (128)	$M(L)$	3522,11	2436,84	1792,91	2099,99	3915,11
	$s(L)$	120,78	178,18	148,48	358,93	810,28
Болотная раститель- ность (464)	$M(L)$	3907,29	3352,81	2511,21	3551,19	5538,44
	$s(L)$	578,39	519,18	534,58	620,34	866,64

Продолжение таблицы 3.5

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
Урбанизированные зоны (54)	$M(L)$	4718.37	3838.69	3259.67	3112.04	3291.30
	$s(L)$	471.87	521.85	672.55	519.20	572.92
Водные объекты (843)	$M(L)$	3399.42	2177.77	1081.16	1582.41	281.04
	$s(L)$	255.54	403.05	263.44	950.36	287.66

На рисунке 3.5 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye.

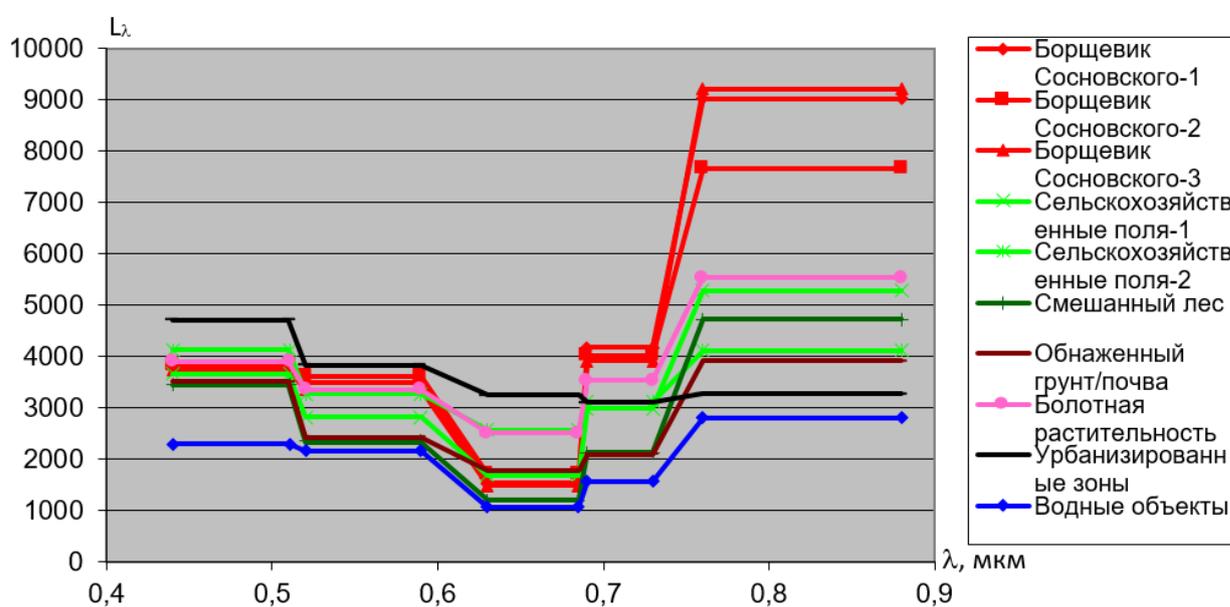


Рисунок 3.5 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, 07.09.2013

09:59:58 GMT

В таблице 3.6 приведены результаты расчета статистических характеристик (математическое ожидание и СКО) распределений значений спектральных яркостей классов объектов, приведенных выше, по снимку 07.09.2013 10:17:03 GMT.

Таблица 3.6 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей типов подстилающей поверхности на тестовых участках снимок КА RapidEye, 07.09.2013 10:17:03 GMT

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	BLUE	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
С/х поля-1 (5944)	$M(L)$ $s(L)$	4745,26 1018,89	4171,28 905,41	3942,19 854,48	3452,97 754,14	3322,04 726,67
С/х поля-2 (13516)	$M(L)$ $s(L)$	3514,52 869,49	2997,86 797,16	1727,92 488,6	2927,96 858,7	5188,1 1499,77
Смешанный лес (4184)	$M(L)$ $s(L)$	3314,32 838,83	2524,67 732,31	1328,16 385,59	2481,17 834,7	5282,5 1631,73
Обнаженный грунт/почва (127)	$M(L)$ $s(L)$	4206,94 245,02	3302,98 292,95	2772,95 506,22	3120,33 396,53	3983,80 583,24
Болотная расти- тельность (34870)	$M(L)$ $s(L)$	3008,71 1473,5	2225,48 1091,39	1738,42 854,76	2471,27 1218,35	3814,78 1891,83
Урбанизированные зоны (61)	$M(L)$ $s(L)$	5415,08 757,44	4281,36 846,76	3295,3 835,45	2691,74 683,03	2487,61 688
Водные объекты (127387)	$M(L)$ $s(L)$	2895,06 1393,24	1727,86 832,42	820,02 396,88	604,47 296,75	303,2 150,78
Облака (7290)	$M(L)$ $s(L)$	13881,97 7906,66	12759,09 7497,63	10912,26 6441,58	9170,13 5394,83	8248,34 4749,96

На рисунке 3.6 приведены графики зависимостей математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye.

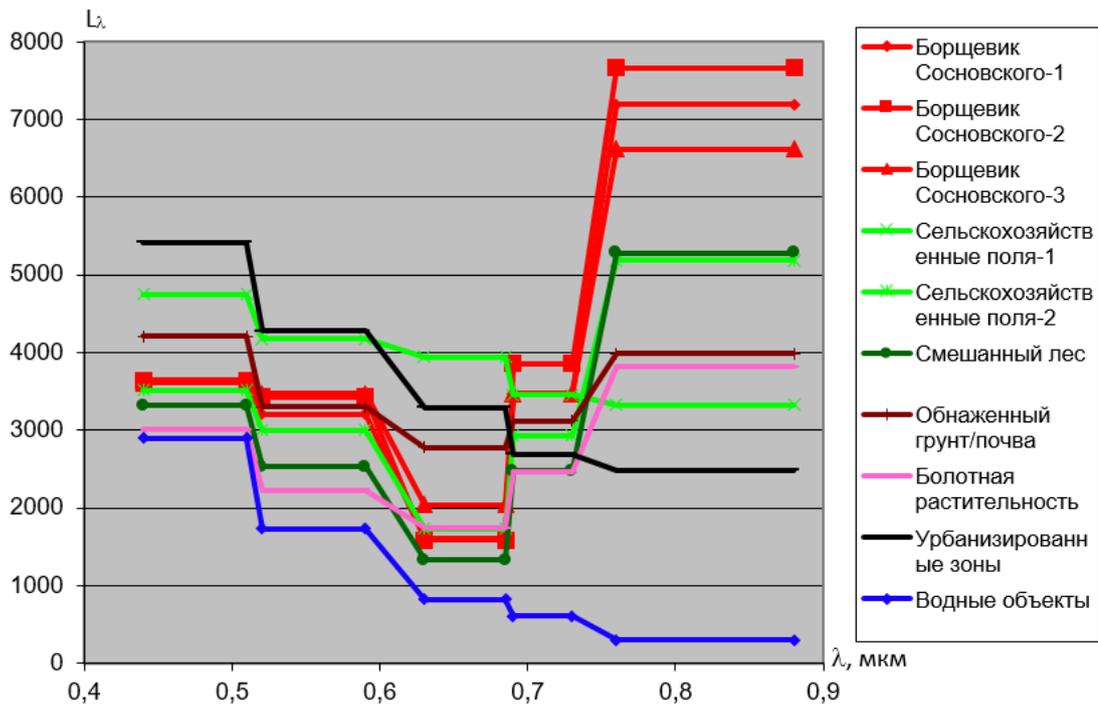


Рисунок 3.6 – Зависимости математических ожиданий значений спектральной яркости тестовых участков элементов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, 07.09.2013

10:17:03 GMT

В результате анализа графиков, приведенных на рисунках 3.4-3.6 можно сделать следующие выводы об информативных признаках БС:

- БС имеет наибольшие значения спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне;

- БС имеет наиболее близкие значения спектральной яркости в синем, зеленом и крайнем красном поддиапазонах по сравнению с другими классами объектов.

Далее представлен анализ соответствия информативных признаков БС, выявленных по результатам полевых спектрорадиометрических измерений и обработки мультиспектральных спутниковых снимков КА RapidEye.

В результате обработки изменений портативным спектрорадиометром PSR-1100 были выделены характерные особенности показателей спектрального отражения БС, отличающие его от окружающей растительности, вне зависимости от даты проведения экспедиции:

- в синей и красной области спектра БС имеет схожие показатели отражения электромагнитного излучения, что и окружающая травянистая растительность; различия зависят от количества и состояния соцветий, а также степени угнетенности листы;

- в зеленой и инфракрасной области спектра БС имеет показатели отражения электромагнитного-излучения, превышающие показатели окружающей травянистой растительности.

Найденные особенности также проявились при анализе результатов расчета характеристик спектрального отражения различных компонентов ландшафта по мультиспектральным спутниковым снимкам КА RapidEye. В результате были выявлены характерные особенности БС вне зависимости от фенологической фазы по спутниковой съемке:

- БС имеет наиболее близкие значения спектральной яркости в синем и зеленом спектральных поддиапазонах съемки, что объясняется более высокими значениями в зеленом поддиапазоне относительно синего по сравнению с другими рассмотренными классами объектов;

- БС имеет наибольшие значения спектральной яркости в ближнем инфракрасном спектральном поддиапазоне съемки (в некоторых случаях, наряду с сельскохозяйственными полями);

- красный и крайний красный спектральные поддиапазоны съемки являются наименее информативными при обнаружении БС.

Таким образом, показатели спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки и модуль разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки могут рассматриваться как информативные признаки в задаче распознавания БС по спутниковым данным.

В таблице 3.7 приведены статистические характеристики распределений значений модуля разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки для рассмотренных снимков КА RapidEye.

Таблица 3.7 – Статистические характеристики распределений значений модуля разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки для рассмотренных снимков КА RapidEye

Класс объектов	Параметр	Снимок № 6	Снимок № 5	Снимок № 4	Снимок № 3	Снимок № 2	Снимок № 1
БС	$M(L)$	440,54	272,54	308,03	352,86	242,65	370,37
	$s(L)$	416,92	183,08	181,99	325,15	153,01	259,11
БС	$M(L)$	274,14	215,76	273,94	276,60	346,47	218,94
	$s(L)$	285,44	143,40	194,42	190,70	185,89	131,95
БС	$M(L)$	222,96	390,35	225,30	328,92	342,86	343,41
	$s(L)$	204,85	82,58	157,22	190,46	169,79	429,04

Продолжение таблицы 3.7

Класс объектов	Параметр	Снимок № 6	Снимок № 5	Снимок № 4	Снимок № 3	Снимок № 2	Снимок № 1
Сельскохозяйственные поля	$M(L)$ $s(L)$	573,99 193,13	848,61 134,79	543,07 224,31	527,02 272,10	505,17 282,46	778,64 116,72
Сельскохозяйственные поля	$M(L)$ $s(L)$	516,88 291,89	837,66 137,47	282,24 151,14	665,51 234,74	415,51 320,98	637,02 337,02
смешанные леса	$M(L)$ $s(L)$	790,65 355,39	1107,53 192,04	913,10 238,15	1103,52 312,05	933,59 303,12	1255,64 290,76
обнаженный грунт/почва	$M(L)$ $s(L)$	737,65 237,93	658,12 334,36	709,02 167,69	1046,41 358,39	1049,94 139,29	1110,39 147,01
болотистая растительность	$M(L)$ $s(L)$	783,23 394,22	644,48 206,91	750,95 228,41	561,09 315,38	617,93 223,92	596,55 354,17
урбанизированные зоны	$M(L)$ $s(L)$	1133,72 196,21	879,69 201,33	821,40 229,79	838,40 350,08	889,16 425,16	947,54 239,87
Водные объекты	$M(L)$ $s(L)$	1167,20 575,76	1221,65 263,78	1120,54 545,93	1320,34 586,87	1146,48 708,58	1362,57 532,81

В таблицах 3.8-3.9 приведены рассчитанные статистические характеристики модуля разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки ($|L_{GREEN} - L_{BLUE}|$) и спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки (L_{NIR}) для исследуемых классов объектов вне зависимости от конкретного спутникового снимка.

Таблица 3.8 – Статистические характеристики распределений модуля разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки для снимков КА RapidEye

Класс объектов	$M(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	$s(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	$\min(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	$\max(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	Кол-во пикселей
БС	296,88	229,21	0	508	2586
Сельскохозяйственные поля	517,20	252,51	141	889	39072
смешанные леса	956,73	284,49	720	1184	22758
обнаженный грунт/почва	944,52	218,37	602	1145	1508
болотистая растительность	709,38	324,55	487	892	83847
урбанизированные зоны	908,14	277,28	779	1175	384
Водные объекты	1157,93	574,22	1068	1415	250152

Таблица 3.9 – Статистические характеристики распределений значений спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки для снимков КА RapidEye

Класс объектов	$M(L_{NIR})$	$s(L_{NIR})$	$\min(L_{NIR})$	$\max(L_{NIR})$	Кол-во пикселей
БС	7795,56	1806,93	4089	11405	2586
Сельско-хозяйственные поля	5774,13	1830,23	3038	10811	39072
смешанные леса	5768,43	1697,29	3115	8148	22758
обнаженный грунт/почва	4630,94	826,08	3180	5431	1508
болотистая растительность	4598,08	1950,89	4383	8256	83847
урбанизированные зоны	4079,91	1947,79	2050	7009	384
Водные объекты	324,84	205,64	297	3314	250152

Эталон i -го объекта представляет собой в m -мерном пространстве признаков гиперэллипс с центром в точке, определяемом выражением:

$$L_i^0 = \{M(L_{i,1}^0), M(L_{i,2}^0), \dots, M(L_{i,j}^0), \dots, M(L_{i,m}^0)\}, \quad (3.3)$$

где i – номер класса объектов; L – признаковое пространство спектральных яркостей; L^0 – набор признаков эталона; m – размерность признакового пространства; $M(L_{ij}^0)$ – математическое ожидание спектральной яркости i -го класса объектов; j – номер признака; и полуосями, заданными вектором:

$$s(x_i^0) = \{s_{i,1}^0(L_{i,1}^0), s_{i,2}^0(L_{i,2}^0), \dots, s_{i,m}^0(L_{i,m}^0)\}, \quad (3.4)$$

где $s(L_{ij}^0)$ – СКО спектральной яркости i -го класса объектов.

На рисунке 3.7 а, б приведены эталоны выбранных классов объектов по признакам L_{NIR} и $|L_{GREEN} - L_{BLUE}|$ в отдельности, где L_{GREEN} и L_{BLUE} – спектральная яркость в зеленом и синем поддиапазонах съемки, а L_{NIR} – спектральная яркость в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки; рисунок 3.7 в – условные обозначения.

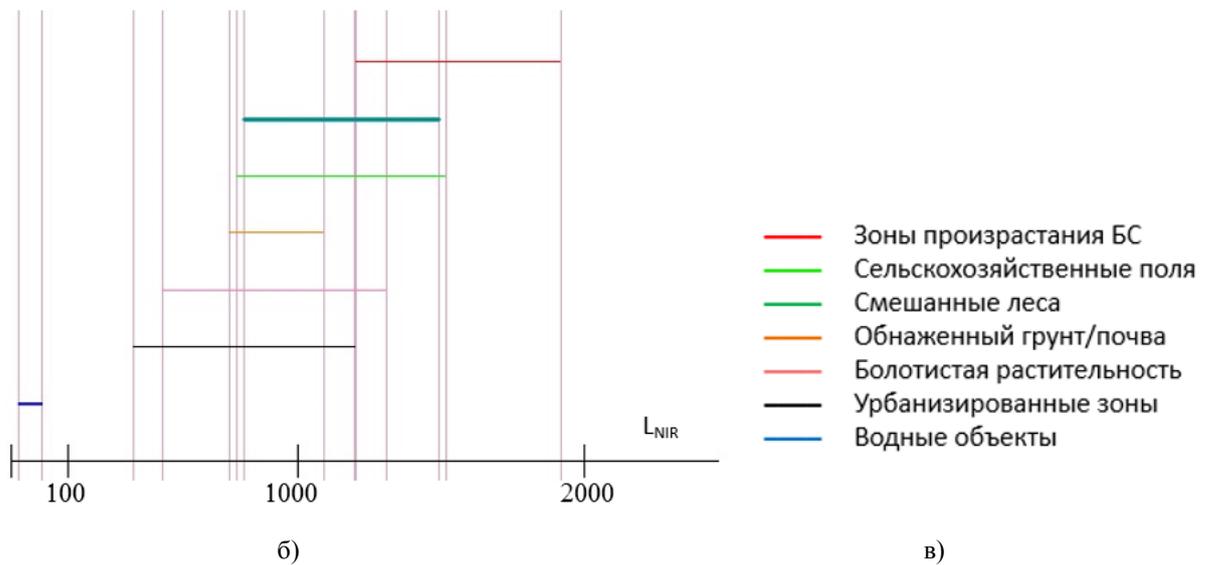
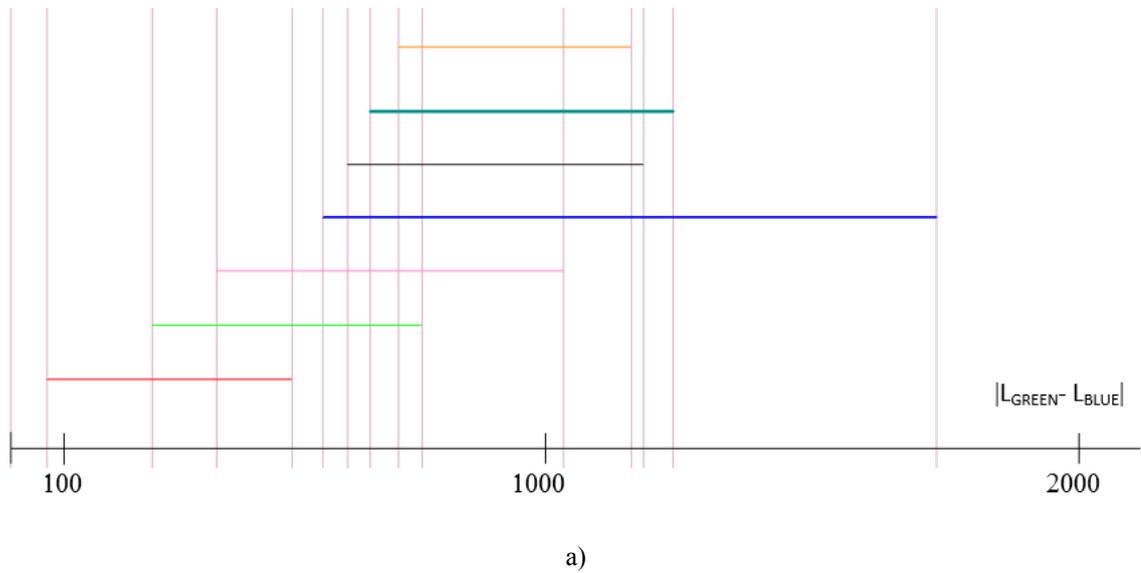


Рисунок 3.7 – Эталоны выбранных классов объектов по признакам: а) $|L_{GREEN} - L_{BLUE}|$; б) L_{NIR} ; в) условные обозначения

В результате анализа рисунков 3.7 а, б можно утверждать, что эталоны зон произрастания БС имеют пересечения с эталонами сельскохозяйственных полей, смешанных лесов и болотной растительности по признаку L_{NIR} , а также пересечения с эталонами сельскохозяйственных полей и болотной растительности по признаку $|L_{GREEN} - L_{BLUE}|$.

На рисунке 3.8 приведены эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{|L_{GREEN} - L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$.

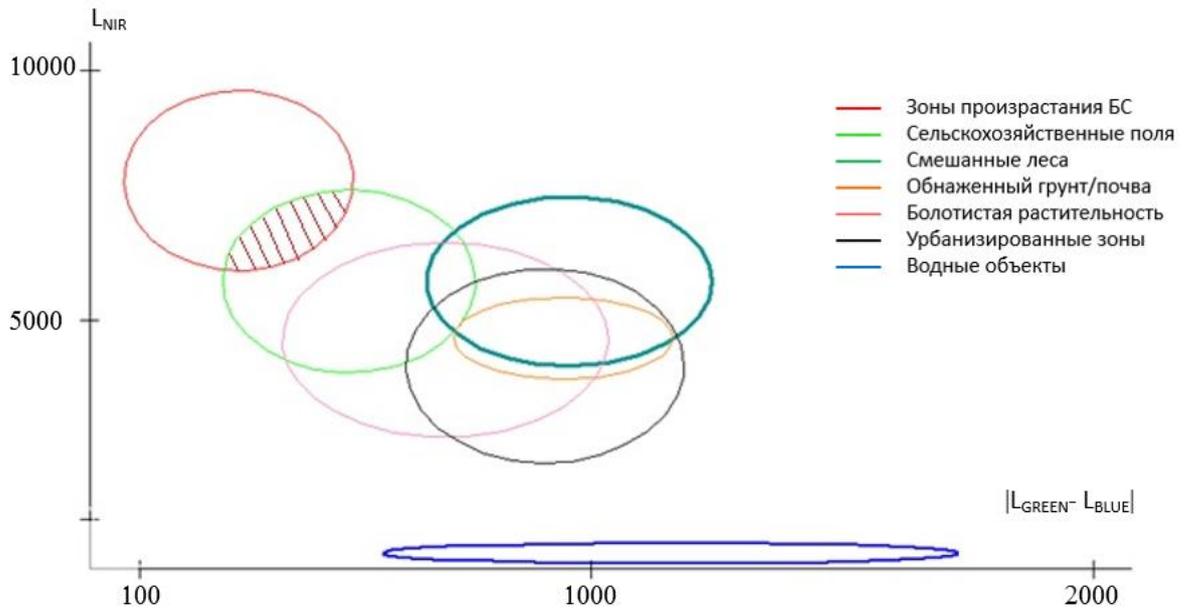


Рисунок 3.8 – Эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{|L_{GREEN} - L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$.

В пространстве признаков $\{|L_{GREEN} - L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$ зоны произрастания БС имеют область пересечения лишь с сельскохозяйственными полями. При этом центры эллипсов находятся на расстоянии 2021,43 по оси L_{NIR} и 220,32 по оси $|L_{GREEN} - L_{BLUE}|$. Таким образом, использование признакового пространства $\{|L_{GREEN} - L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$ приводит к сокращению количества классов объектов, пересекающихся с зонами произрастания БС, по сравнению с использованием признаков в отдельности.

3.2. Вегетационный индекс борщевика Сосновского на основе спутниковых данных

Анализ спектральных характеристик зон произрастания БС и других классов объектов подстилающей поверхности позволил выделить информативные признаки данного вида растений. Следует заметить, что использование на практике информативных признаков по отдельности в некоторых случаях не приводит к отделению зон произрастания БС от других классов объектов (рисунки 3.1-3.6). Это обусловлено флуктуацией абсолютных значений спектральной яркости в зависимости от фенологической фазы, региона, факторов почвы и прочего. В мировой практике широкое распространение получила группа методов тематической обработки мультиспектральных спутниковых данных, называемая спектральными преобразованиями и отношениями (см. раздел 1). Расчет индексов, т.е. анализ относительных величин, сокращает влияние атмосферы, межгодовой изменчивости и прочих факторов на результаты спутникового мониторинга [208-210]. Следует отметить, что вегетационные индексы, приведенные в п.1.5 не позволяют обнаружить БС, так как не учитывают характеристики отражения БС. В настоящей работе разработано спектральное

преобразование, определенные диапазоны значений которого для снимков различных систем ДЗЗ, соответствуют наличию зон произрастания БС. Данный индекс может быть назван вегетационным (растительным), так как имеет целью распознавание БС и контроль растительности конкретного вида.

Исходя из необходимости сокращения влияния атмосферы, межгодовой изменчивости и прочих факторов автором была выбрана относительная структура индекса, т.е. наличие в расчетной формуле операции деления. Существующие индексы, описанные, например, в [209-211], рассчитываются по формулам:

$$k_{RVI} = \frac{L_{NIR}}{L_{RED}}, \quad (3.5)$$

$$k_{NDVI} = \frac{L_{NIR} - L_{RED}}{L_{NIR} + L_{RED}}, \quad (3.6)$$

$$k_{NDWI} = \frac{L_{NIR} - L_{SWIR}}{L_{NIR} + L_{SWIR}}, \quad (3.7)$$

где k_{RVI} , k_{NDVI} , k_{NDWI} – значения Ratio vegetation index (RVI), NDVI, Normalized difference water index (NDWI) соответственно; L_{SWIR} – спектральная яркость пикселя в коротковолновом инфракрасном канале съемки. Описанные индексы принимают наибольшие значения именно для целевого объекта. Придерживаясь данной парадигмы, составлен индекс борщевика Сосновского (ИБС, HSI) следующего вида:

$$k_{HSI} = \frac{R_4 \rightarrow \max}{R_3 \rightarrow \min}, \quad (3.8)$$

где k_{HSI} – значения индекса HSI, R_4 – спектральный диапазон съемки или спектральное преобразование, принимающее наибольшее значение для БС относительно других классов объектов, R_3 – спектральный диапазон съемки или спектральное преобразование, принимающее наименьшее значение для БС относительно других классов объектов. При выполнении данных условий, пиксели, соответствующие БС, в результате расчета вегетационного индекса примут наибольшие значения индекса.

При решении задачи разработки вегетационного индекса БС рассматривались спектральные поддиапазоны съемки, наиболее распространенных среди систем ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения (синий, зеленый, красный, ближний ИК). Таким образом, крайний красный канал, являющийся уникальным для КА RapidEye, рассматривался только в качестве возможного дополнительного критерия. При разработке вегетаци-

онного индекса БС были использованы следующие информативные признаки, описанные в п.3.1:

- значения спектральной яркости БС в ближнем ИК поддиапазоне превышают значения для других классов объектов (за исключением облачности);
- значения спектральной яркости БС в синем и зеленом поддиапазонах имеют наиболее близкие друг к другу значения по сравнению с другими классами объектов.

Следует отметить, что для различных систем ДЗЗ существуют алгоритмы создания облачных масок. Вследствие этого характеристики облачности при составлении вегетационного индекса не рассматривались.

В качестве числителя был выбран ближний ИК канал съемки, постольку он удовлетворяет требованиям, предъявляемым к числителю. В качестве знаменателя использовалась разность зеленого и синего каналов, взятая по абсолютному значению. Таким образом, формула HSI, основанная на информативных признаках БС, имеет следующий вид:

$$k_{HSI} = \frac{L_{NIR}}{|L_{GREEN} - L_{BLUE}|}, \quad (3.9)$$

где k_{HSI} – значения индекса HSI.

Наличие данных синего съемочного канала, в соответствии с результатами исследований, приведенных в [208], могут сокращать влияние различий в состоянии атмосферы для разных моментов съемки. Однако оценка влияния атмосферы на характеристики разработанного индекса не является задачей данной работы.

Результатом расчета индекса HSI является растровый слой данных, пикселям которого соответствуют числа с плавающей запятой (float). Для обнаружения зон произрастания БС необходимым условием является определение порогового значения индекса. Превышение порогового значения является показателем соответствия спектральной яркости конкретного пикселя характеристикам БС. Для определения порогового значения индекса HSI был рассчитан для тестовых участков снимков RapidEye, приведенных в таблице 3.4. Полученные статистические характеристики распределений индекса HSI для различных классов приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Статистические характеристики распределений значений индекса HSI по данным КА RapidEye

Класс объектов	Параметр	Снимок № 6	Снимок № 5	Снимок № 4	Снимок № 3	Снимок № 2	Снимок № 1
БС	$M(L)$	68,05	86,97	29,82	85,37	74,72	106,58
	$s(L)$	121,31	170,17	82,66	400,59	503,72	199,82
БС	$M(L)$	143,80	102,83	114,16	95,65	191,59	104,5
	$s(L)$	463,73	289,38	274,72	168,2	626,56	301,31
БС	$M(L)$	104,84	34,53	69,35	81,05	80,5	160,39
	$s(L)$	290,62	5,19	104,39	243,97	183,83	331,03
Сельскохозяйственные поля	$M(L)$	6,75	6,41	7,37	9,47	17,50	21,9
	$s(L)$	48,93	1,38	13,74	4,48	53,66	45,77
Сельскохозяйственные поля	$M(L)$	14,64	5,19	24,03	11,09	29,77	19,47
	$s(L)$	78,80	1,81	51,99	5,05	99,74	8,52
смешанные леса	$M(L)$	12,01	6,02	10,74	6,06	6,55	3,02
	$s(L)$	79,43	2,62	8,8	2,06	2,18	1,16
обнаженный грунт/почва	$M(L)$	4,39	4,33	4,72	6,16	5,05	3,82
	$s(L)$	2,59	1,41	1,73	3,75	1,29	1,06
болотистая растительность	$M(L)$	3,98	5,42	7,24	11,49	10,07	6,9
	$s(L)$	2,06	2,98	2,21	13,37	3,90	5,23
урбанизированные зоны	$M(L)$	2,34	9,76	5,44	11,56	16,16	6
	$s(L)$	0,89	7,39	1,84	43,49	45,99	3,4
Водные объекты	$M(L)$	0,3	0,22	0,3	0,25	0,31	0,22
	$s(L)$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01

Минимальное математическое ожидание индекса HSI среди всех эталонных образцов БС равно 29,82, тогда как следующее по величине равно 68,05. Среди всех других объектов максимальное математическое ожидание индекса HSI равно 29,77 (сельскохозяйственные поля). Минимальное рассчитанное значение математического ожидания индекса HSI для БС может быть обусловлено разреженностью покрытия площади эталона БС. В свою очередь, максимальное значение для сельскохозяйственных полей – наличием объектов других классов, меньших по размеру, чем размер пикселя снимка RapidEye и неразличимых визуально, что подтверждается значением дисперсии значений HSI, равным 99,74 – максимальным среди значений дисперсий, не относящихся к БС.

В таблице 3.11 приведены рассчитанные статистические характеристики в пространстве признаков $\{k_{HSI}\}$ для исследуемых классов объектов вне зависимости от конкретного спутникового снимка.

Таблица 3.11 – Статистические характеристики распределений значений индекса HSI для снимков КА RapidEye

Класс объектов	$M(k_{HSI})$	$s(k_{HSI})$	Количество пикселей
БС	92,95	294,72	2586
Сельскохозяйственные поля	14,99	57,55	39072
смешанные леса	8,11	17,68	22758
обнаженный грунт/почва	4,94	1,99	1508
болотистая растительность	7,73	6,34	83847
урбанизированные зоны	8,59	17,79	384
Водные объекты	0,23	0,01	250152

На рисунке 3.9 приведены гистограммы распределения количества пикселей в зависимости от значения индекса HSI для эталонных участков сельскохозяйственных полей и зон произрастания БС. Шкала по оси абсцисс для БС является нерегулярной для удобства отображения.

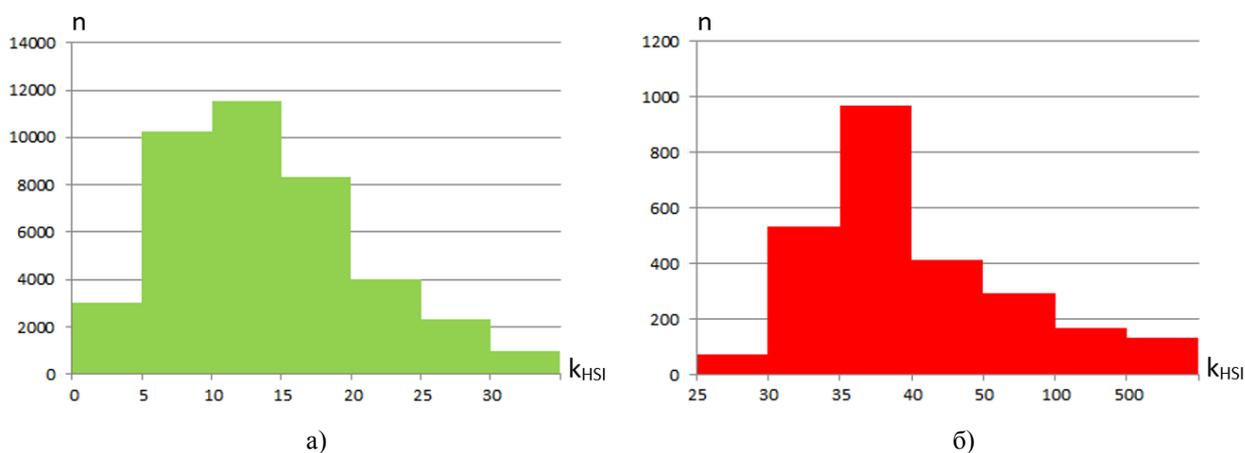


Рисунок 3.9 – Гистограммы распределения количества пикселей в зависимости от значения индекса HSI:

а) сельскохозяйственные поля; б) зоны произрастания БС

Индекс HSI среди пикселей эталонной выборки, соответствующей сельскохозяйственным полям, превысил значение 30 в 2,42 % случаев. В то же время значения индекса HSI, соответствующие БС, оказались ниже 30 в 2,82 % случаев. Таким образом, в качестве порогового значения индекса HSI, отделяющего БС от объектов других классов, было выбрано значение 30 ед., что является необходимым условием обнаружения зон произрастания БС.

В качестве примера индекс HSI был рассчитан для всего снимка RapidEye 09.07.0213 10:17:03, после чего пороговым методом был составлен бинарный растровый слой данных – рисунок 3.10.

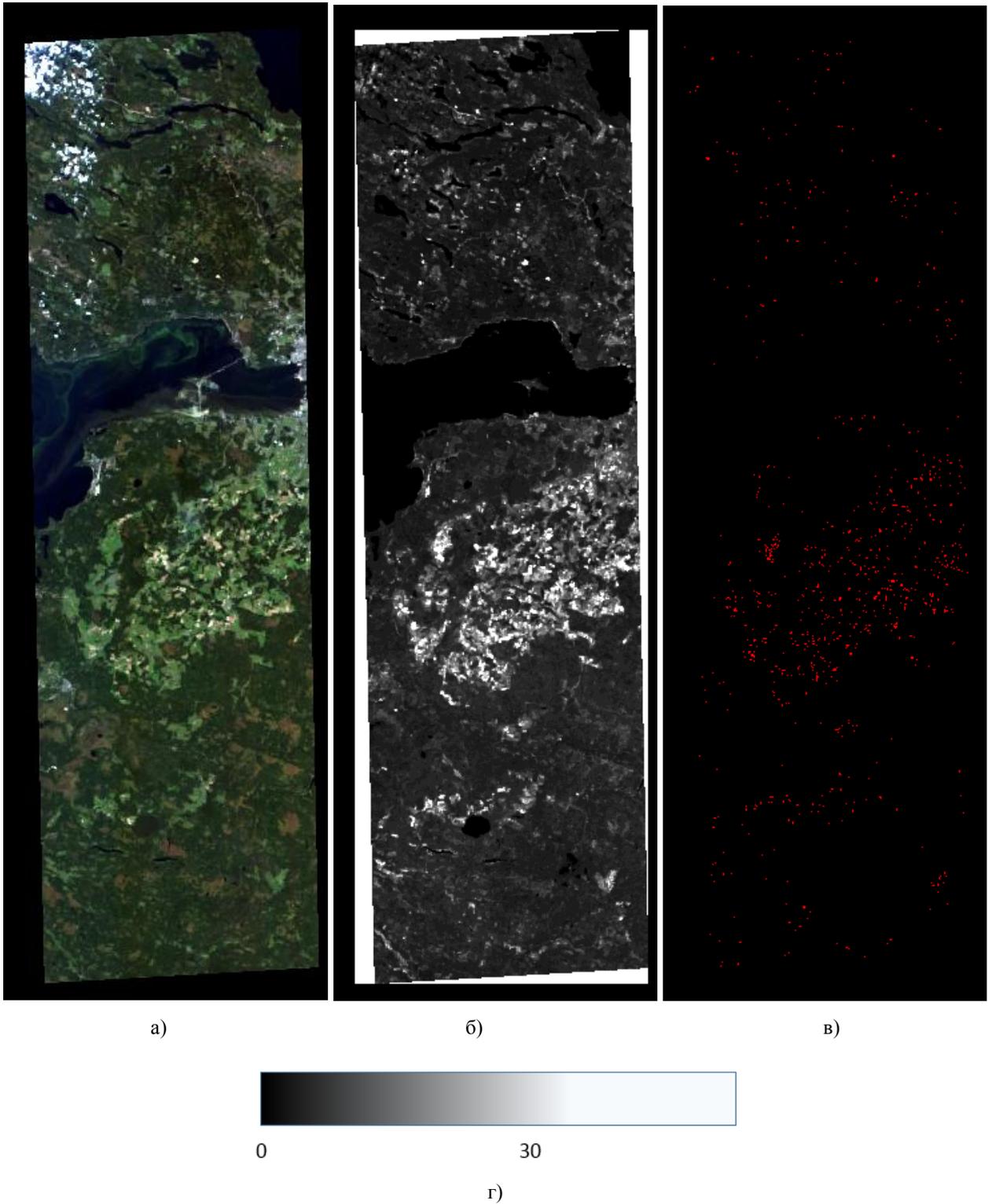
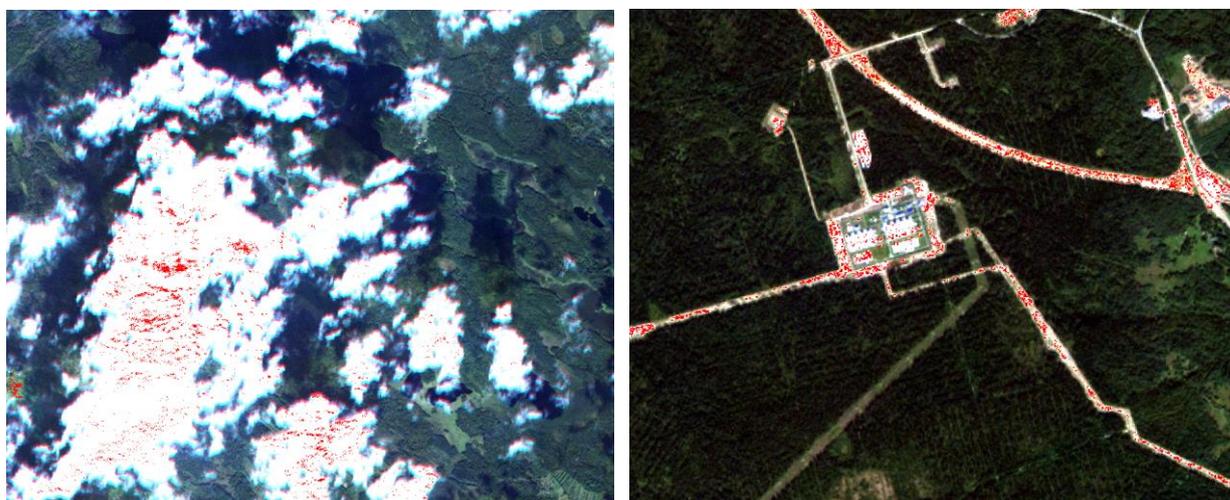


Рисунок 3.10 – Исходный спутниковый снимок RapidEye, RGB 3-2-1, 09.07.0213 10:17:03 (а), индекс HSI (б), бинарный слой зон произрастания БС (в) и цветовая шкала индекса HSI (г)

Визуальный анализ результатов, приведенных на рисунке 3.10, позволяет сделать вывод об обнаружении объектов, не являющихся БС. Объектами, приводящими к ложным срабатываниям порогового метода обработки индекса HSI, являются элементы облачного покрова и антропогенные объекты, при RGB-комбинации каналов RapidEye принимающие белый цвет – рисунок 3.11.



а)

б)

Рисунок 3.11 – Пример ложного определения БС: а) облачность, б) антропогенные объекты

Факт того, что данные объекты были отмечены, как результат обнаружения БС, объясняется тем, что значения яркости пикселей в синем и зеленом спектральных каналах, охватываемых ими, близки, что приводит к низкому значению знаменателя в расчете HSI и, как следствие, значению индекса, превышающему установленный порог. В качестве решения выявленной проблемы не может быть использовано увеличение порогового значения, поскольку могут быть исключены из результата территории, соответствующие БС. Кроме того, значения HSI в «ложных» объектах может принимать значения более 100 ед. при наиболее близких значениях яркостей пикселей в зеленом и синем каналах. Однако введение дополнительного критерия соответствия пикселя зоне произрастания БС способно исключить ложные обнаружения. Поскольку «ложные» объекты являются либо облачностью, либо антропогенными объектами, отделить их от БС, являющегося типичным представителем растительности, можно при помощи индекса NDVI, подробно описанного в разделе 1. На рисунке 3.12 приведены фрагменты рассчитанного растрового слоя индекса NDVI по снимку RapidEye, 09.07.0213 10:17:03.

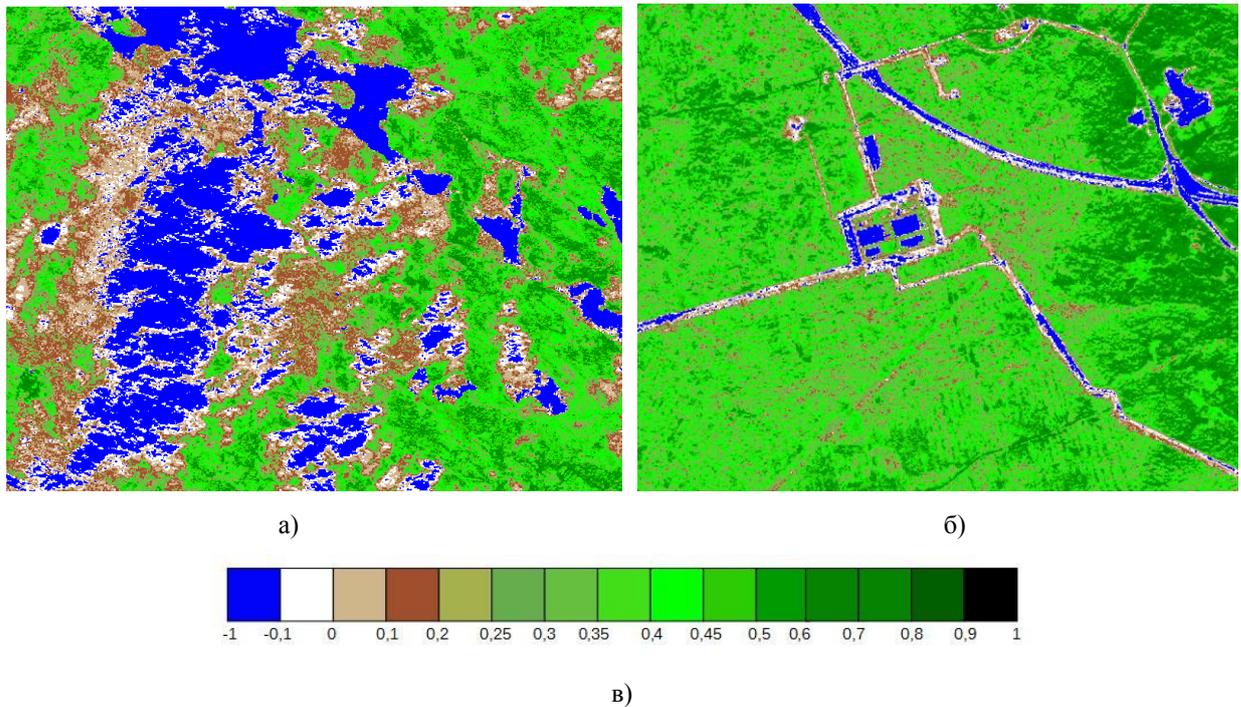


Рисунок 3.12 – Результаты расчета индекса NDVI: а) облачность, б) антропогенные объекты и смешанный лес, в) легенда индекса NDVI

Значения NDVI для «ложных» объектов, являющихся облачностью, не превысили значения $-0,1$, а являющихся антропогенными объектами – $0,06$. Для эталонных участков БС значения NDVI были не менее $0,4$. Таким образом, в качестве дополнительного критерия было выбрано условие: значения индекса NDVI должны быть выше чем $0,3$, что соответствует растительности.

Предложено решающее правило обнаружения растительности по спутниковому снимку по малому числу признаков, принимающее следующий вид:

$$p_i \in x_{расм}, \text{ если } f(p_i, x_{расм}) = K_i - K_{расм} > 0, \quad (3.10)$$

где p_i – пиксель снимка, $x_{расм}$ – класс «растительность», j – номер признака, K_i – признак обнаружения растительности для i -го пикселя снимка. Признаком для обнаружения растительности является индекс NDVI, пороговое значение равно $0,3$.

Для распознавания БС по спутниковым снимкам предложен вектор признаков K , определяемый следующим образом:

$$K = \begin{vmatrix} k_{HSI} \\ k_{NDVI} \end{vmatrix}. \quad (3.11)$$

Вектор пороговых значений K_p приведен ниже:

$$K_p = \begin{vmatrix} 30 \\ 0,3 \end{vmatrix}. \quad (3.12)$$

Предложено решающее правило распознавания БС по спутниковым снимкам, принимающее следующий вид:

$$p_i \in x_{BC}, \text{ если } f(p_i, x_{BC}) = \prod_{j=1}^n (K_{ij} - K_{BCj}) > 0, \quad (3.13)$$

где p_i – пиксель снимка, x_{BC} – класс «борщевик Сосновского», j – номер признака, n – количество признаков, K_{ij} – значение j -го признака i -го пикселя снимка.

Предложен критерий достоверности принятия решения, основанный на результатах анализа спектральных яркостей пикселей обучающих выборок:

$$D = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,976 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (3.14)$$

где D – вектор критерия достоверности, d_1 , d_2 – коэффициенты доверия по показателям k_{HSI} и k_{NDVI} соответственно.

С учетом дополнительного критерия для снимка КА RapidEye 09.07.0213 10:17:03 была повторно проведена обработка, результаты которой представлены на рисунке 3.13.

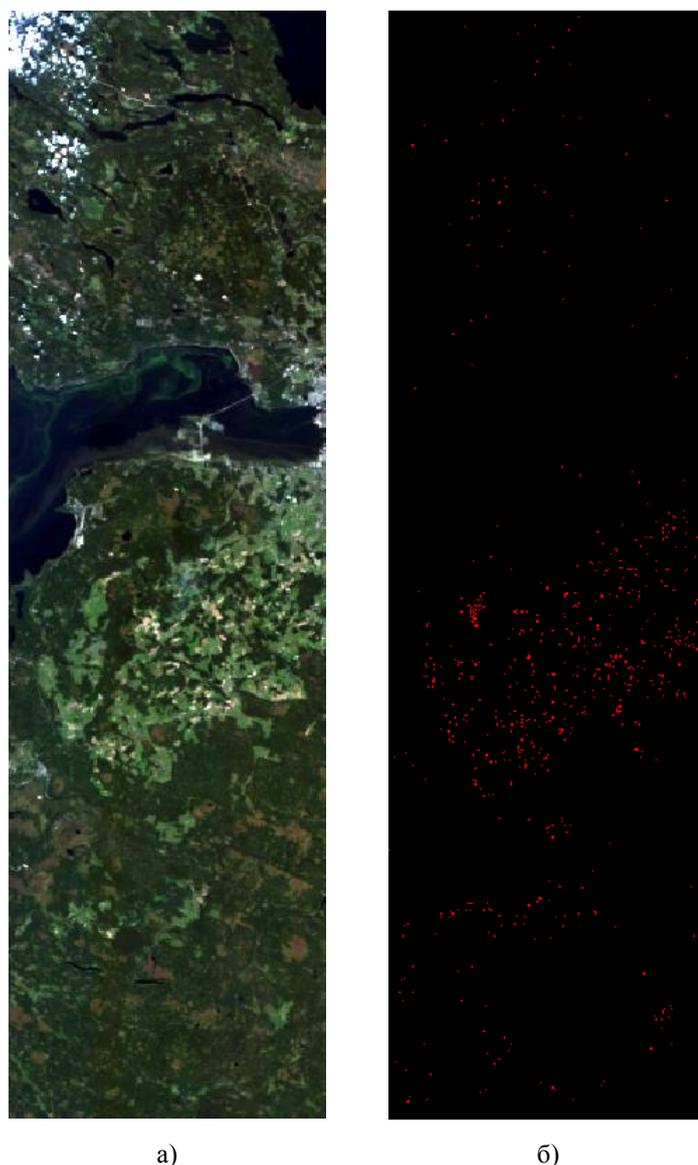


Рисунок 3.13 – Исходный спутниковый снимок RapidEye, RGB 3-2-1, 09.07.0213 10:17:03 (а) и бинарный слой распространения БС (б)

Наличие решающего правила на основе NDVI позволило исключить из результата распознавания БС не только облака и антропогенные объекты, но и пиксели эталонов сельскохозяйственных полей, превысивших порог по индексу HSI, но имеющих значения индекса NDVI меньших установленного порога. Наличие таких пикселей ранее приводило к высокому значению СКО и завышенным значениям HSI для сельскохозяйственных полей. Таким образом, использование индекса NDVI в качестве критерия обнаружения растительности позволяет устранить возможные ошибки распознавания БС.

3.3. Структурная схема алгоритма, реализующего способ неразрушающего контроля зон произрастания борщевика Сосновского

Способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным включает в себя несколько процедур: получение спутниковой информации; решение

задачи обнаружения растительности и распознавания БС по спутниковым данным; контроль зон произрастания БС, отслеживание и анализ изменений местоположения и площади зон произрастания БС при помощи разновременных данных [212].

Выбранный для обработки спутниковый снимок рассматривается как совокупность дискретов – пикселей изображения, каждый из которых анализируется в отдельности. Для решения задачи обнаружения растительности и распознавания БС для последующей обработки отбираются данные, полученные в спектральных поддиапазонах длин волн, соответствующих синей, зеленой, красной и ближней инфракрасной зонам спектра. Распознавание БС производится на основе решающего правила, приведенного в формуле (3.13) и учитывающего информативные признаки зон произрастания БС. Набор дискретов, соответствующих БС, рассматривается как зоны произрастания БС, для которых определяются координаты и площади. Количественные характеристики для каждого объекта, хранятся в виде рассчитанных статистик и метаданных файла-результата. Результаты обработки единичного спутникового снимка позволяют проводить контроль распространения БС в конкретный момент времени. Обработка ряда разновременных спутниковых снимков определяет возможность построения карт зон произрастания БС с определением динамики распространения данного вида растений, определять вектора их распространения. Результаты контроля зон произрастания БС представляются как в графическом виде в ГИС, так и в виде количественных оценок. Таким образом, управленческие решения, принимаемые на основе результатов дистанционного контроля с использованием предлагаемого способа, будут иметь в качестве основы показатели по целым районам и регионам. Результаты управленческих решений также могут быть проконтролированы дистанционно с применением предлагаемого способа.

Использование картографических материалов, учет рельефа местности, наличия рек и автомобильных дорог в перспективе может служить для моделирования распространения зон произрастания БС. Эта задача может рассматриваться как перспективная и выходит за рамки настоящего исследования.

На рисунке 3.14 представлена структурная схема алгоритма, реализующего способ контроля зон произрастания БС.

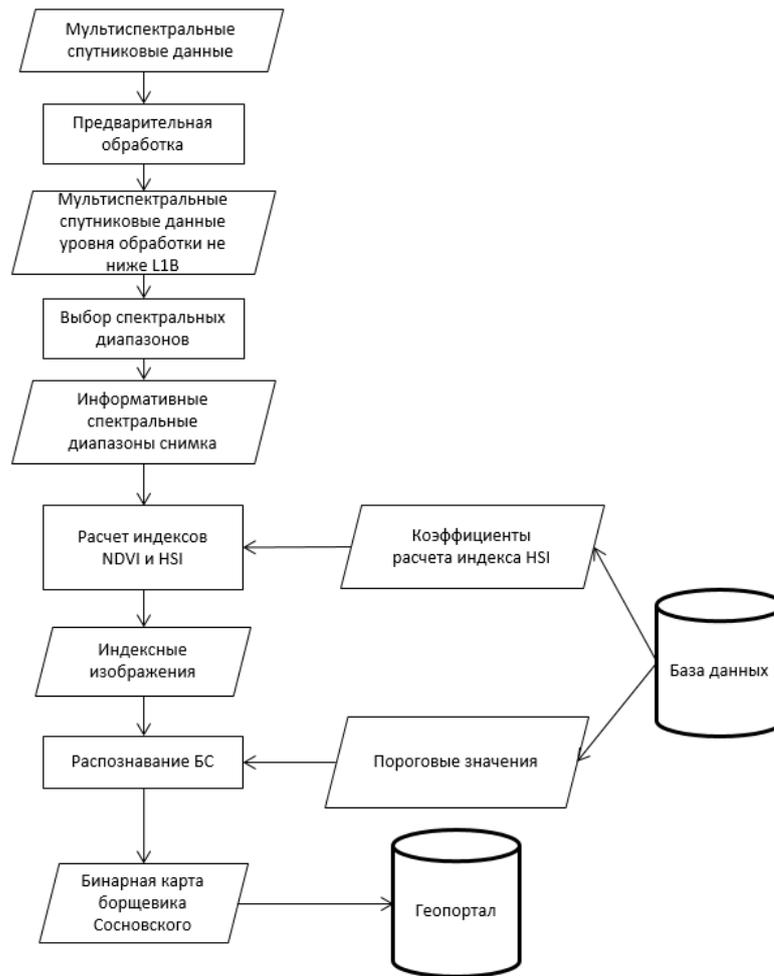


Рисунок 3.14 - Структурная схема алгоритма, реализующего способ контроля зон произрастания БС

В настоящее время в качестве исходной спутниковой информации для расчета индексов HSI и NDVI реализованным алгоритмом используются данные КА LandSat-8, Sentinel-2A и RapidEye, приведенные к уровню обработки L0 или L1B. Так, например, для приведения исходных данных КА LandSat-8 к уровню обработки L1B необходимо применять стандартные алгоритмы радиометрической калибровки.

Найденные информативные признаки БС использованы в качестве базовых для распознавания БС. На их основе рассчитывается индекс HSI. Как будет показано в разделе 4, разработанный индекс подразумевает определение коэффициентов и пороговых значений для различных КА, которые хранятся в БД.

В результате выполнения обработки спутниковых снимков создается бинарный слой результатов распознавания БС, который размещается в геопортале. Представленный алгоритм позволяет осуществлять контроль зон произрастания БС посредством обработки регулярно обновляющихся разновременных данных о зонах произрастания БС, полученных на основе анализа спутниковой информации различных КА ДЗЗ. На следующих этапах контроля производится обнаружение изменений и определение динамики распростра-

нения БС. Все полученные результаты размещаются в геопортале в виде геопространственных слоев информации и позволяют производить анализ динамики и контроль зон произрастания БС.

3.4. Алгоритм обработки спутниковых данных космической системы RapidEye для распознавания борщевика Сосновского

Разработанный вегетационный индекс HSI, а также дополнительные критерии обнаружения БС, представляют собой результат заданных математических операций с исходными съемочными каналами, являющимися растровыми данными. В современных геоинформационных системах существуют возможности по автоматизации процесса расчета спектральных индексов. В настоящей работе в качестве инструмента проведения расчетов был выбран модуль Model Maker ПО ERDAS Imagine Professional – рисунок 3.15.

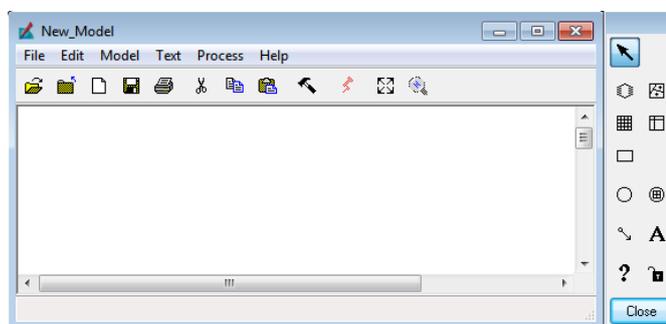


Рисунок 3.15 – ERDAS Imagine Professional, интерфейс модуля Model Maker

Model Maker – объектно-ориентированный графический редактор алгоритмов ERDAS Imagine Professional. Он позволяет конструировать модели обработки растровых или векторных данных путем выбора операций из графического меню и последовательности их выполнения. С использованием принципов, заложенных в Model Maker, реализовано большинство функций обработки данных в ERDAS Imagine. Model Maker содержит более двухсот операций по обработке спутниковых снимков и векторных графических данных [102].

Для реализации разработанного способа контроля зон произрастания БС по мультиспектральным данным космической системы RapidEye был составлен алгоритм с его последующей реализацией в Model Maker. В качестве исходных данных используются данные в синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном поддиапазонах съемки КА RapidEye. Результатом является бинарный растровый слой зон произрастания БС. Структурная схема алгоритма обнаружения БС по мультиспектральным данным космической системы RapidEye приведена на рисунке 3.16.

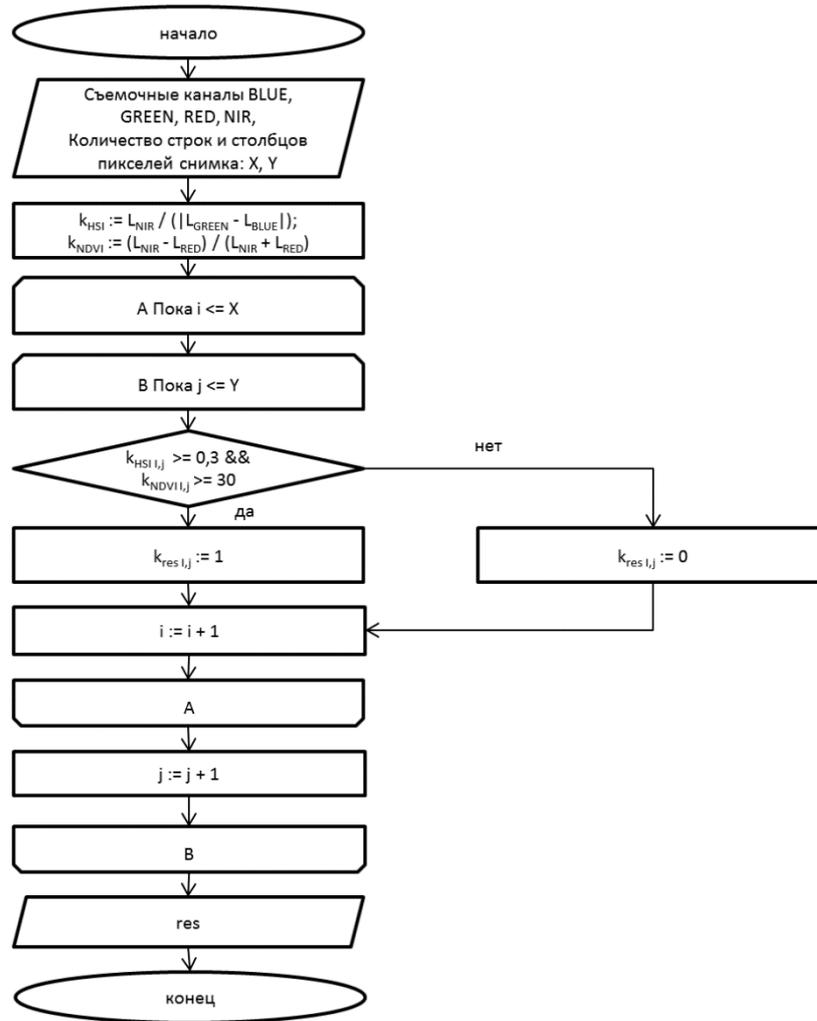


Рисунок 3.16 – Структурная схема алгоритма обработки спутниковых данных КА RapidEye

Исходный снимок КА RapidEye должен содержать как минимум синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный каналы. Параметры X и Y – ширина и высота снимка в пикселях - рассчитываются в ERDAS Imagine автоматически. Для исходных данных рассчитываются индексы HSI и NDVI по формулам (3.8) и (1.2) соответственно. Затем для каждого пикселя в отдельности проверяется одновременное превышение заданных порогов. В случае выполнения данного условия соответствующий пиксель результирующего растрового слоя принимает значение 1, в противном случае – 0. Растровый слой результата сохраняется на жестком диске компьютера по завершении работы алгоритма.

3.5. Программная реализация алгоритма обработки спутниковых данных для контроля зон произрастания борщевика Сосновского

Для реализации алгоритма обработки спутниковых данных для контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным были использованы следующие типы функциональных элементов Model Maker: растровое изображение и функция – рисунок 3.17.

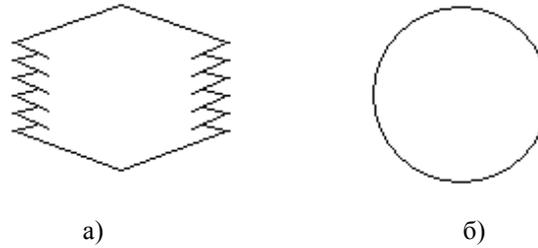


Рисунок 3.17 – Функциональные элементы Model Maker: а) растровое изображение, б) функция

На рисунке 3.18 приведена структура реализации алгоритма контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным, разработанная в ERDAS Imagine Professional Model Maker. Растровые изображения обозначены литерой «R», функции – литерой «F». Блок R1 – исходный мультиспектральный спутниковый снимок, блок R12 – результирующий бинарный растровый слой распространения БС.

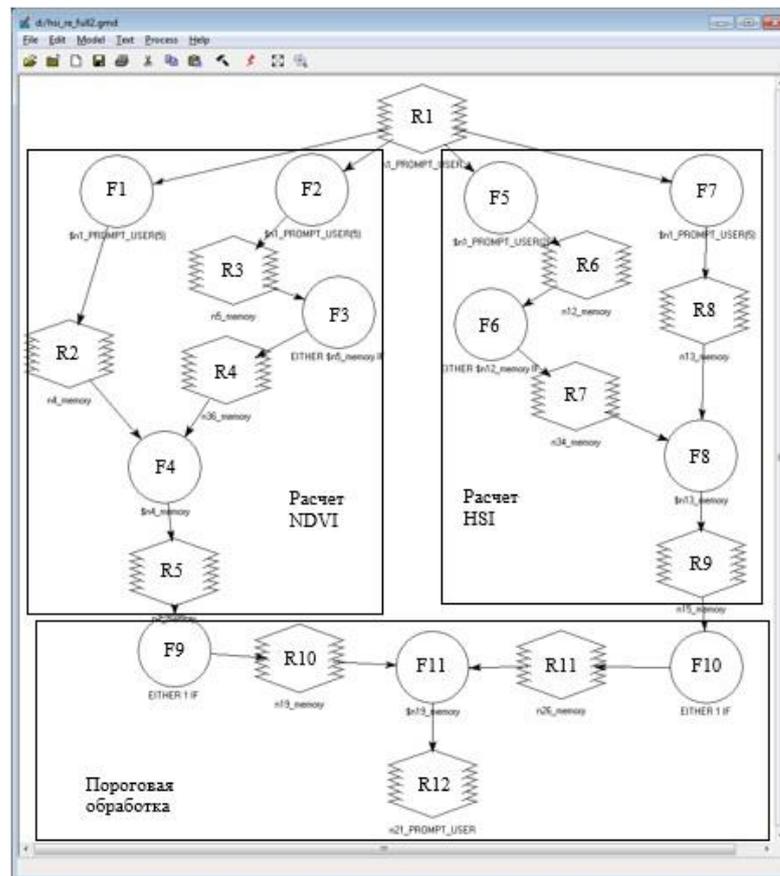


Рисунок 3.18 – Реализация алгоритма контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным в ERDAS Imagine Professional Model Maker

В таблицах 3.12-3.13 приведены параметры настройки блоков растровых изображений и блоков функций соответственно.

Таблица 3.12 – Параметры настройки блоков растровых изображений

Блок	Обозначение в Model Maker	Временный растр	Тип растра	Тип данных	Комментарии
R1	n1_PROMPT_USER	Нет	Continuous	Integer	Исходный спутниковый снимок
R2	n4_memory	Да	Continuous	Integer	
R3	n5_memory	Да	Continuous	Integer	
R4	n36_memory	Да	Continuous	Integer	
R5	n7_memory	Да	Continuous	Float	Результат расчета NDVI
R6	n12_memory	Да	Continuous	Integer	
R7	n34_memory	Да	Continuous	Integer	
R8	n13_memory	Да	Continuous	Integer	
R9	n15_memory	Да	Continuous	Float	Результат расчета HSI
R10	n19_memory	Да	Continuous	Binary	
R11	n26_memory	Да	Continuous	Binary	
R12	n21_PROMPT_USER	Нет	Thematic	Binary	Результат обнаружения БС

Под временным растром понимаются растровые данные, создаваемые в процессе работы модуля Model Maker и удаляемые по ее завершению. Растровые данные типа «Continuous», как правило, представляют собой исходные данные и отображаются в градациях серого в зависимости от значений пикселей (либо в цветном варианте при комбинации трёх съемочных каналов). Растровые данные типа «Thematic», как правило, представляют собой результат обработки исходных данных; цветовая палитра отображения пикселей задается в зависимости от выбранного параметра. Тип данных «Integer» соответствует целочисленным значениям, «Float» - числам с плавающей точкой, «Binary» - данным, принимающим значения 0 или 1.

Таблица 3.13 – Параметры настройки блоков функций

Блок	Функция	Комментарий
F1	$\$n1_PROMPT_USER(5) - \$n1_PROMPT_USER(3)$	Разность ближнего инфракрасного и красного каналов
F2	$\$n1_PROMPT_USER(5) + \$n1_PROMPT_USER(3)$	Сумма ближнего инфракрасного и красного каналов
F3	EITHER \$n5_memory IF (\$n5_memory > 0) OR (1) OTHERWISE	Если в знаменателе NDVI значение 0, заменить его на 1
F4	$\$n4_memory / \$n36_memory$	Вычисление NDVI

Продолжение таблицы 3.13

F5	$\$n1_PROMPT_USER(2) - \$n1_PROMPT_USER(1)$	Разность зеленого и синего каналов
F6	$EITHER \$n12_memory \text{ IF } (\$n12_memory > 0) \text{ OR } ((-1) * \$n12_memory) \text{ OTHERWISE}$	Операция расчета абсолютных значений
F7	$\$n1_PROMPT_USER(5)$	Операция выбора ближнего инфракрасного канала
F8	$\$n13_memory / \$n34_memory$	Вычисление HSI
F9	$EITHER 1 \text{ IF } (\$n7_memory > 0.3) \text{ OR } 0 \text{ OTHERWISE}$	Отбор пикселей, удовлетворяющих условию по NDVI
F10	$EITHER 1 \text{ IF } (\$n15_memory > 30) \text{ OR } 0 \text{ OTHERWISE}$	Отбор пикселей, удовлетворяющих условию по HSI
F11	$\$n19_memory * \$n26_memory$	Перемножение бинарных слов

В результате работы алгоритма, реализованного в Model Maker, на жестком диске компьютера сохраняется бинарный тематический растровый слой данных, отражающий зоны произрастания БС в пределах территории исходного снимка.

Выводы по разделу 3

По результатам разработки способа неразрушающего контроля и алгоритма обработки спутниковых данных для контроля зон произрастания борщевика Сосновского сформулированы следующие выводы:

1. В результате анализа разработанной в разделе 2 информационной модели зон произрастания БС определены информативные признаки данного класса объектов: наиболее близкие значения разности спектральных яркостей в синем и зеленом съемочных каналах КА RapidEye (уровень обработки исходных данных L1B) и наиболее высокие значения спектральной яркости в ближнем инфракрасном съемочном канале среди всех рассмотренных классов объектов.

2. В пределах исследованных эталонных объектов информативные признаки зон произрастания БС не зависят от фенологической фазы БС.

3. По результатам анализа пространства признаков $\{|L_{GREEN}-L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$ был сделан вывод о том, что наиболее близким БС оказался класс объектов «сельскохозяйственные поля».

4. Разработан спектральный индекс HSI, позволяющий производить распознавание БС по отраженному сигналу оптического диапазона, зафиксированному в спутниковых данных информативных признаков зон произрастания БС на КА RapidEye.

5. Разработано решающее правило обнаружения травянистой растительности и распознавания БС на основе индексов HSI и NDVI и пороговой методики, учитывающие

информативные признаки зон произрастания БС и исключаящие из рассмотрения заведомо ложные объекты, такие как облака и антропогенные объекты.

6. Разработана структурная схема алгоритма, реализующего способ контроля зон произрастания БС. Разработанный алгоритм применим для распознавания БС, определения динамики и направления распространения БС. Критерии обнаружения, коэффициенты и пороговые значения вегетационных индексов хранятся в БД для каждой из рассматриваемых систем ДЗЗ. Данные о расположении зон произрастания БС размещаются в геопортале, являющимся инструментом визуализации результатов и хранилищем данных для контроля динамики распространения БС.

7. Разработан алгоритм распознавания БС по мультиспектральным данным космической системы RapidEye и реализован в программной среде ERDAS Imagine Professional Model Maker. Алгоритм осуществляет преобразование данных КА ДЗЗ уровня обработки не ниже L1B к бинарному слою геопространственных данных, характеризующих зоны произрастания БС на основе рассчитанных индексов HSI и NDVI и пороговой обработки.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ СПОСОБА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗОН ПРОИЗРАСТАНИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО И ЕГО АДАПТАЦИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Способ, разработанный в разделе 3, может быть использован для распознавания БС и контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым снимкам, что было показано на примере анализа снимков КА RapidEye. В разделе 4 приведен анализ особенностей применения разработанного способа к снимкам КА LandSat-8 и Sentinel-2A, а также приведены результаты его применения с использованием данных КА RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A.

4.1. Тестирование способа контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным о территории Ленинградской области

Разработанный способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым снимкам КА RapidEye был протестирован для территории СПб и ЛО. Из доступного автору исследования архива спутниковых снимков выбраны безоблачные фрагменты снимков 2013 года [213]. В результате данными оказалось покрыто 75% исследуемой территории. Непокрытые съемкой участки были заполнены фрагментами снимков за 2010 год, доля площади которых составила 15% от суммарной площади СПб и ЛО. Таким образом, покрыто облаками на имевшихся в распоряжении автора снимках оказалось 10% площади исследуемой территории. Распределение снимков в зависимости от года съемки приведено на рисунке 4.1.

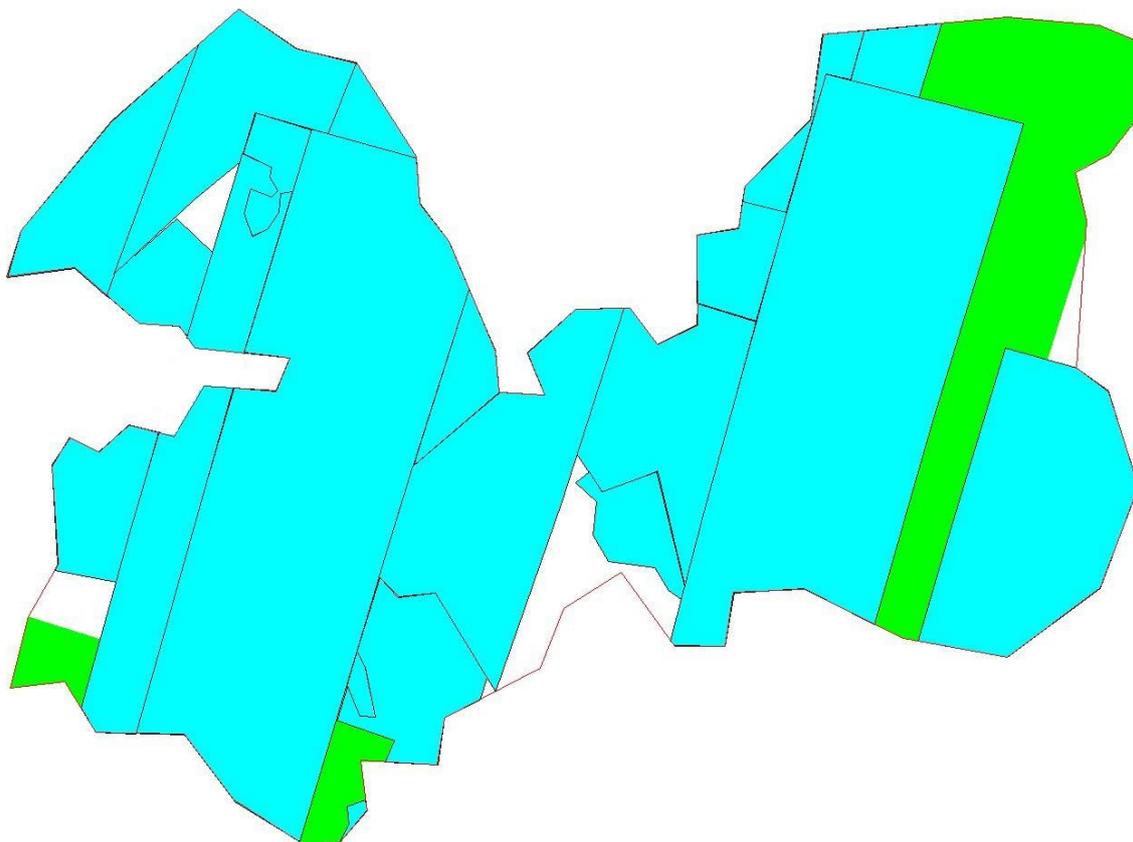


Рисунок 4.1 – Распределение снимков КА RapidEye в зависимости от года съемки:

■ - 2013 год, ■ - 2010 год, прозрачный – участки, покрытые облачностью

В общей сложности были использованы 18 снимков КА RapidEye, выполненных всеми пятью спутниками группировки. Основные характеристики снимков приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики использованных снимков КА RapidEye

№	Дата, время съемки	Фенологическая фаза	№ RE
1	06.07.2010, 09:50:49	цветение	5
2	22.07.2010, 10:25:57	цветение	5
3	13.08.2010, 10:27:39	плодоношение	3
4	27.07.2013, 10:33:57	цветение	5
5	28.07.2013, 10:18:57	цветение	2
6	30.07.2013, 09:58:16	цветение	5
7	30.07.2013, 10:15:47	цветение	4
8	16.08.2013, 10:36:50	плодоношение	1
9	18.08.2013, 10:15:09	плодоношение	4
10	23.08.2013, 10:01:58	плодоношение	5
11	23.08.2013, 10:02:28	плодоношение	5

Продолжение таблицы 4.1

№	Дата, время съемки	Фенологическая фаза	№ RE
12	01.09.2013, 10:09:07	плодоношение	4
13	03.09.2013, 10:32:15	плодоношение	5
14	06.09.2013, 09:56:36	плодоношение	5
15	06.09.2013, 10:13:59	плодоношение	4
16	07.09.2013, 09:59:58	плодоношение	1
17	07.09.2013, 10:17:03	плодоношение	5
18	12.09.2013, 10:21:50	плодоношение	5

Разработанный способ применялся для каждого снимка в отдельности, в результате чего был получен набор бинарных геопространственных данных, соответствующих зонам произрастания БС. Далее составлена мозаика полученных результатов путем объединения отдельных файлов бинарных геопространственных данных в один файл, что необходимо для удобства использования полученного результата в современных ГИС.

Всего на обработанных фрагментах снимков в качестве БС было маркировано 14 780 449 пикселей, что, учитывая пространственное разрешение снимков, равное 6,5 м, соответствует площади 624.5 км². Суммарная площадь данных субъектов Российской Федерации составляет приблизительно 86,5 тыс. км² [214], площадь безоблачных фрагментов снимков – 77,5 тыс. км². Таким образом, доля зон произрастания БС от общей исследованной площади составила 0,806 %.

На рисунке 4.2 приведены результаты распознавания БС по обочине Мурманского шоссе вблизи поселка Разметелево, ЛО. Растения БС располагаются нерегулярно, отдельными скоплениями.

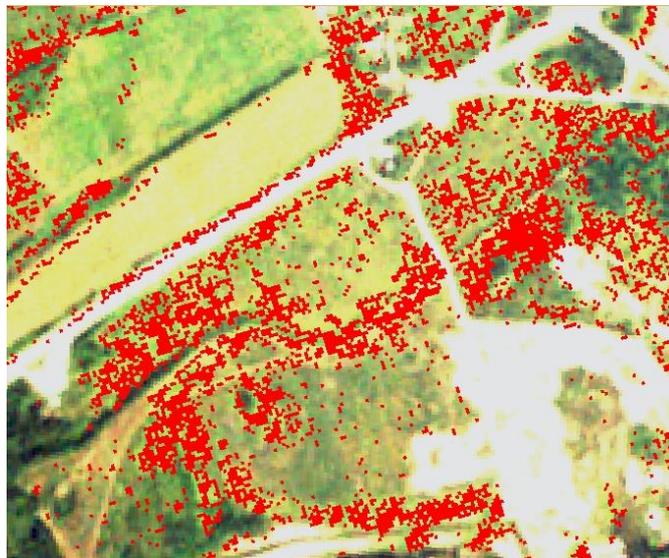


Рисунок 4.2 – Результаты обнаружения БС вблизи поселка Разметелево, КА RapidEye, ■ - БС

На рисунке 4.3 приведены результаты распознавания БС в юго-западном направлении от поселка Мельниково, ЛО.



Рисунок 4.3 – Результаты обнаружения БС вблизи поселка Мельниково, КА RapidEye, ■ - БС

На рисунке 4.4 приведены результаты распознавания БС в пределах городского поселка Янино, ЛО. Минимальное расстояние от распознанных зон произрастания БС до жилых домов составляет менее 50 метров.

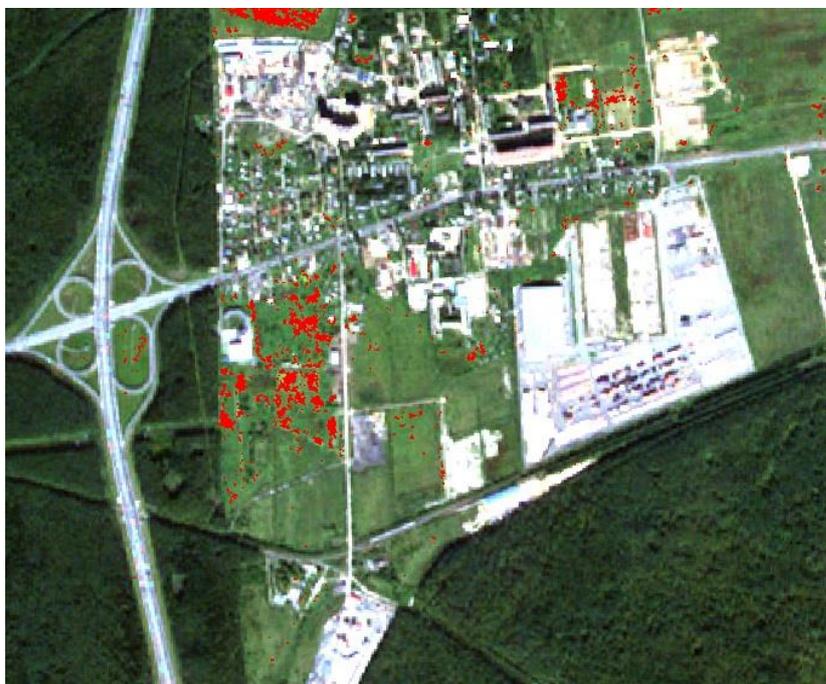


Рисунок 4.4 – Результаты обнаружения БС в поселке Янино, КА RapidEye, ■ - БС

На рисунке 4.5 приведены результаты распознавания БС для Федоровского сельского поселения Госненского района ЛО. Территории отдельных полей заполнены БС на 90-95%. Растения данного вида также примыкают к жилым постройкам.



Рисунок 4.5 – Результаты обнаружения БС к северу от Федоровского сельского поселения, ЛО, КА RapidEye, ■ - БС

Результаты распознавания БС после обработки снимков КА RapidEye 2013 год загружены в геопортал в соответствии со структурной схемой алгоритма, реализующего способ контроля зон произрастания БС разработанной в разделе 3. Полученная информация о распространении БС является базовой для оценки динамики и направления распространения данного вида растений.

4.2. Апробация результатов тестирования способа контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным космической системы RapidEye

Разработанный способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым снимкам, как и большинство методов, основанных на применении данных ДЗЗ, нуждается в проведении процедуры валидации [215]. Точность результатов применения данных дистанционных исследований может быть оценена в результате их сопоставления с данными полевых исследований. Однако, как показано в разделе 1, в открытых источниках информации приводятся суммарные характеристики площадей распространения БС в пределах ЛО. Карт, показывающих места произрастания БС, в результате исследований не обнаружено, однако в «Долгосрочной целевой программе "Борьба с борщевиком Сосновского в ЛО на 2011-2015 годы» (далее Программе) есть указание на существование таковых [216].

Результаты распознавания БС по спутниковым данным КА RapidEye по территории ЛО были апробированы по данным наземных наблюдений. Исследованы материалы «Заключения по результатам экспертной оценки» о результатах обнаружения БС за 2013 год по спутниковым данным, проведенной ФГБУ «Российский сельскохозяйственный центр» для ООО ЛенОблГИС, и предоставленного автору последними [217]. Ниже приведены выдержки из предоставленного документа:

«п. 6.3.1 ...В целом, данные, полученные о распространении борщевика Сосновского, относительно достоверно характеризовали фитосанитарное состояние на территории Ленинградской области. ...

п. 6.3.2 ... Сравнение степени засоренности борщевиком Сосновского, выявленной в 2011-2013 гг. [натурные наблюдения] и спутниковых наблюдений является не вполне корректным, т.к. фиксирование фаз развития и состояния каждого очага борщевика Сосновского не было предусмотрено методикой обследования в 2011-2013 гг.

п. 6.3.3 Рассмотрение векторного тематического слоя контуров полей и рабочих участков агропромышленных предприятий Ленинградской области, расположенной на территории Приозерского, Волосовского и Лужского муниципальных районов Ленинградской области не представляется корректным, т.к. обследования сельскохозяйственных угодий этих предприятий проводилось в 2011-2012 гг. Кроме того фитосанитарное состояние сельскохозяйственных угодий по борщевiku Сосновского многократно меняется в течение вегетации ввиду проведения механических, агротехнических и химических мероприятий...

п. 6.2.2 Обработка космической информации (спутниковых снимков)

п. 6.2.2.1 Преимущества:

п. 6.2.2.1.1 Минимальные трудозатраты при полном охвате территории региона благодаря автоматизации процесса.

п. 6.2.2.1.2 Возможность проведения многократных обследований территории региона за один вегетационный период.

п. 6.2.2.1.3 Автоматический расчет проективного покрытия выявленных очагов борщевика Сосновского.

п. 6.2.2.1.4 Возможность получения оперативных данных о неиспользуемых земельных участках по наличию борщевика Сосновского в фазе цветения.

п. 6.2.2.1.6 Возможность создания автоматизированных рабочих мест через личные кабинеты сотрудников агропромышленных предприятий Ленинградской области и сотрудников местного самоуправления Ленинградской области, что позволит оперативно принимать управленческие решения по различным направлениям.

п. 6.2.2.1 Недостатки:

п. 6.2.2.1.1 Не является возможным идентификация видового состава растений рода борщевик (*Heracleum*).

п. 6.2.2.1.2 Невозможна регистрация засоренных территорий с наличием единичных растений борщевика Сосновского и всходов при незначительном проективном покрытии» [217].

Первый выявленный недостаток обусловлен выбранной тематикой исследований и не нацелен на контроль растений других видов. Второй недостаток определяется выбором исходных спутниковых данных, проведенным в разделе 2. Для обнаружения единичных растений БС могут быть пригодны снимки сверхвысокого ПР, хотя этот вопрос не анализировался, однако данные сверхвысокого ПР имеют ряд недостатков, среди которых меньшая площадь покрытия, обновляемость данных и высокая стоимость.

Таким образом, анализ «Заключения по результатам экспертной оценки» позволяет говорить о качестве результатов применения разработанного способа, удовлетворяющих потребности надзорных организаций.

4.3. Адаптация разработанного способа для контроля зон произрастания борщевика Сосновского по данным других космических систем дистанционного зондирования Земли

Способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным был разработан с условием использования спектральных поддиапазонов, наиболее распространенных среди современных систем ДЗЗ высокого и среднего пространственного разрешения. В то же время анализ спектральных поддиапазонов съемочных каналов различных КА, приведенных на рисунке 2.2, позволил сделать вывод об уникальности характеристик сенсоров спутников. Данный факт определяет необходимость оценки особенностей контроля БС по снимкам КА, не относящихся к группировке КА RapidEye.

4.3.1. Адаптация разработанного способа для контроля зон произрастания борщевика Сосновского по данным LandSat-8

Мультиспектральные спутниковые снимки КА LandSat-8, доступные на портале USGS [55], не соответствуют уровню обработки данных L1B, т.к. для них не проведена процедура радиометрической калибровки. Однако в пакете данных, скачиваемых с портала, присутствует файл метаданных спутникового снимка *MTL.txt, содержащий необходимые поправочные коэффициенты. Для калибровки снимков LandSat-8 в ERDAS Imagine Model Maker был реализован алгоритм пересчета значений спектральных яркостей пикселей. Для каждого канала в отдельности выполнялась следующая арифметическая операция:

$$L_{ij} = L'_{ij} \cdot M_i + A_i, \quad (4.1)$$

где L_{ij} – спектральная яркость j -го пикселя i -го канала съемки, прошедшего процедуру радиометрической калибровки (уровень L1B); L'_{ij} – спектральная яркость j -го пикселя i -го канала съемки исходных растровых данных съемки; M_i – RADIANCE_MULT_BAND (мультипликативный коэффициент); A_i – RADIANCE_ADD_BAND (аддитивный коэффициент); i – номер канала съемки LandSat-8, j – номер пикселя снимка. Коэффициенты M_i и A_i учитывают состояние бортовой аппаратуры и параметры орбиты и являются уникальными для каждого произведенного спутником снимка. Их применение позволяет исключить влияние на результаты измерений факторов, связанных с функционированием съемочной аппаратуры. Использовались только те спектральные каналы съемки, которые были отобраны в соответствии с исследованиями, представленными в разделе 3 – рисунок 4.6.

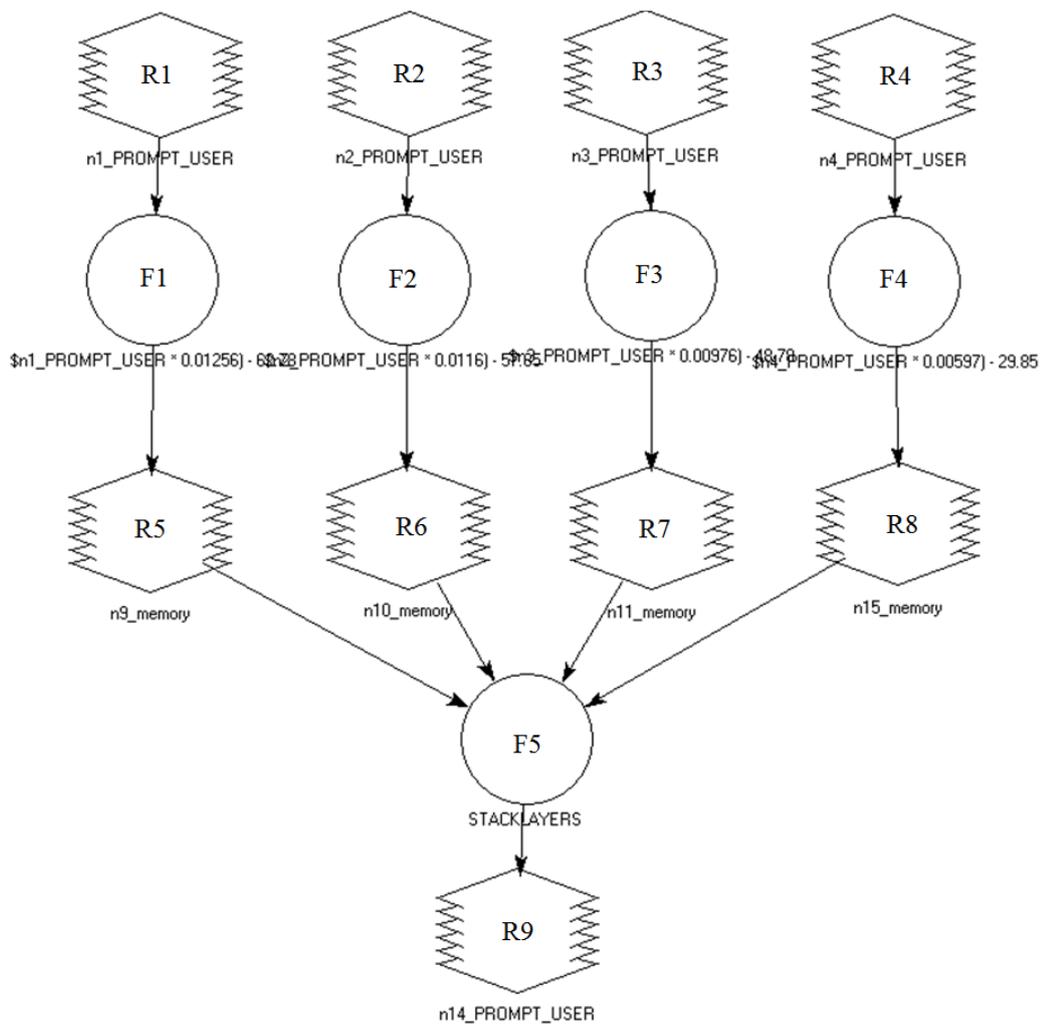


Рисунок 4.6 – Реализация алгоритма калибровки снимков KA LandSat-8 в ERDAS Imagine Professional Model
Maker

Для съемочных каналов, соответствующих синему, зеленому, красному и ближне-му инфракрасному поддиапазонам длин волн, выполняется радиометрическая калибровка в соответствии с формулой (4.1). Полученные одноканальные данные объединяются в единый четырехканальный файл. В таблицах 4.2-4.3 приведены параметры настройки блоков растровых изображений и блоков функций соответственно.

Таблица 4.2 – Параметры настройки блоков растровых изображений

Блок	Обозначение в Model Maker	Временный растр	Тип растра	Тип данных	Комментарии
R1	n1_PROMPT_USER	Нет	Continuous	Integer	Синий канал съемки
R2	n2_PROMPT_USER	Нет	Continuous	Integer	Зеленый канал съемки
R3	n3_PROMPT_USER	Нет	Continuous	Integer	Красный канал съемки
R4	n4_PROMPT_USER	Нет	Continuous	Integer	Ближний инфракрасный канал съемки
R5	n9_memory	Да	Continuous	Float	
R6	n10_memory	Да	Continuous	Float	
R7	n11_memory	Да	Continuous	Float	
R8	n15_memory	Да	Continuous	Float	
R9	n14_PROMPT_USER	Нет	Continuous	Integer	Результирующий 4ех-канальный растровый файл

Таблица 4.3 – Параметры настройки блоков функций

Блок	Функция	Комментарий
F1	$(\$n1_PROMPT_USER * M_2) + A_2$	Калибровка синего канала съемки
F2	$(\$n2_PROMPT_USER * M_3) + A_3$	Калибровка зеленого канала съемки
F3	$(\$n3_PROMPT_USER * M_4) + A_4$	Калибровка красного канала съемки
F4	$(\$n4_PROMPT_USER * M_5) + A_5$	Калибровка ближнего инфракрасного канала съемки
F5	STACKLAYERS (\$n9_memory , \$n10_memory , \$n11_memory , \$n15_memory)	Объединение четырех одноканальных растров в один четырехканальный растр

В результате работы алгоритма, реализованного в Model Maker, на жестком диске компьютера сохраняется четырехканальный растровый слой данных.

Особенностью сенсора Operational Land Imager (OLI) КА LandSat-8 является узкий по сравнению с аналогами ближний инфракрасный съемочный поддиапазон: 0,85-0,89 мкм. Использование инфракрасного съемочного канала при расчете индексов HSI и NDVI

определяет необходимость оценки особенностей зон произрастания БС по снимкам КА LandSat-8.

Для оценки выявленных информативных признаков БС в настоящей работе проанализированы снимки КА LandSat-8 в синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном съемочных каналах. С целью снижения влияния межгодовых отличий БС в качестве исходных данных использовались снимки за два года для обеих рассматриваемых фенологических фаз. Перечень использованных материалов приведен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Используемые многоспектральные спутниковые снимки КА LandSat-8

№	Название	Дата съемки	Фен. фаза	Год
1	LC08_L1TP_184018_20140729_20170420	29.07.2014	цветение	2014
2	LC08_L1TP_185018_20140805_20170420	05.08.2014	цветение /плодоношение	2014
3	LC08_L1TP_185018_20150723_20170406	23.07.2015	цветение	2015
4	LC08_L1TP_184019_20150817_20170406	17.08.2015	плодоношение	2015

Изображения используемых снимков приведены на рисунке 4.7.

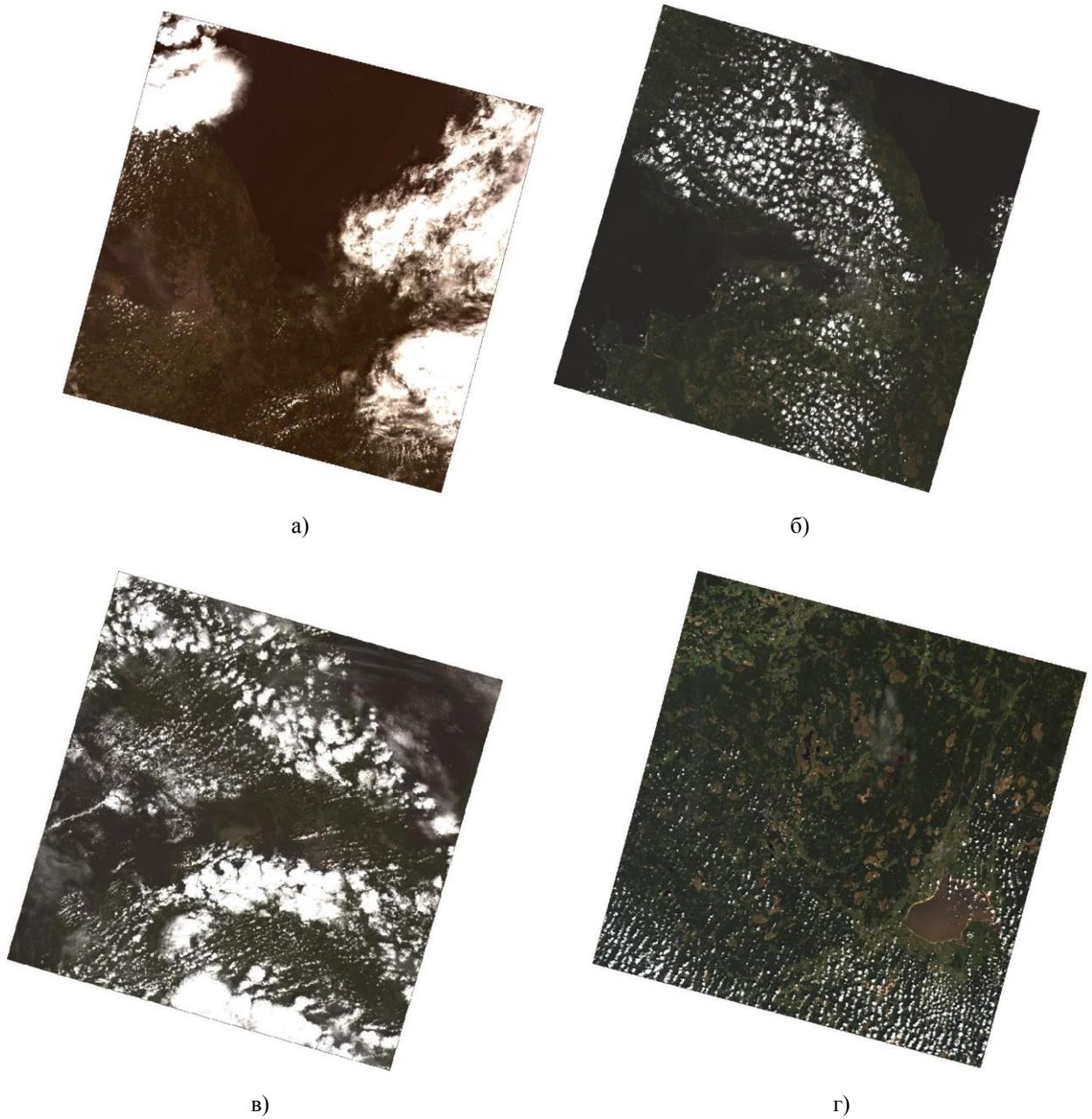


Рисунок 4.7 – Используемые мультиспектральные спутниковые снимки КА LandSat-8:
а) 29.07.2014, б) 05.08.2014, в) 23.07.2015, г) 17.08.2015

Для каждого из представленных снимков выбрано по два участка БС и два участка сельскохозяйственных полей, как наиболее близкого по спектральным яркостям к целевому классу. Характеристики текстовых участков приведены в приложении Г. Результаты расчетов для тестовых участков приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Статистические характеристики распределений значений спектральной яркости зон произрастания БС и сельскохозяйственных полей на тестовых участках

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	0,45-0,52 нм	0,53-0,6 нм	0,63-0,68 нм	0,85-0,89 нм
1: БС 1 (22)	$M(L)$	55,23	60,82	32,64	112,73
	$s(L)$	0,97	3,35	1,65	8,13
1: БС 2 (20)	$M(L)$	57,05	59,45	32,45	111,65
	$s(L)$	0,22	1,93	0,69	5,05
2: БС 1 (24)	$M(L)$	47,13	57,79	32,94	105,04
	$s(L)$	1,15	1,61	1,12	7,34
2: БС 2 (32)	$M(L)$	48,5	60,81	31,91	124,84
	$s(L)$	1,83	2,17	1,41	9,25
3: БС 1 (29)	$M(L)$	53,69	63,31	29,93	144,38
	$s(L)$	0,93	3,53	1,22	15,61
3: БС 2 (45)	$M(L)$	53,24	61,09	29,22	133,44
	$s(L)$	1,07	2,98	0,98	16,31
4: БС 1 (28)	$M(L)$	41,54	47,86	24,86	88,43
	$s(L)$	0,51	2,29	2,26	5,92
4: БС 2 (28)	$M(L)$	41,29	47,68	26,96	82,29
	$s(L)$	0,53	2,96	1,73	3,43
1: с/х поле 1 (290)	$M(L)$	53,11	43,43	23,55	110,27
	$s(L)$	0,48	0,56	0,61	3,64
1: с/х поле 2 (412)	$M(L)$	49,93	43,16	21,43	104,17
	$s(L)$	0,61	0,86	0,68	4,25
2: с/х поле 1 (167)	$M(L)$	43,52	35,93	20,12	85,46
	$s(L)$	0,51	0,48	0,53	5,17
2: с/х поле 2 (182)	$M(L)$	43,04	36,22	17,12	105,45
	$s(L)$	0,86	0,76	0,51	4,87
3: с/х поле 1 (118)	$M(L)$	47,05	41,12	18,07	116,28
	$s(L)$	1,12	1,41	0,75	6,11
3: с/х поле 2 (149)	$M(L)$	48,17	40,51	19,03	112,33
	$s(L)$	1,38	1,86	0,44	5,03
4: с/х поле 1 (440)	$M(L)$	38,03	32,31	15,51	80,53
	$s(L)$	0,18	0,67	0,74	6,39
4: с/х поле 2 (96)	$M(L)$	39,38	34,1	15,38	114,85
	$s(L)$	0,6	0,4	0,81	6,45

В таблицах 4.6-4.7 приведены рассчитанные статистические характеристики разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки ($L_{GREEN} - L_{BLUE}$) и спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки (L_{NIR}) для исследуемых классов объектов вне зависимости от конкретного спутникового снимка.

Таблица 4.6 – Статистические характеристики распределений разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки для снимков КА LandSat-8

Класс объектов	$M(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	$s(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	Кол-во пикселей
БС	7,93	2,75	228
Сельскохозяйственные поля	-6,99	0,91	1854

Таблица 4.7 – Статистические характеристики распределений значений спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки для снимков КА LandSat-8

Класс объектов	$M(L_{NIR})$	$s(L_{NIR})$	Кол-во пикселей
БС	114,92	9,65	228
Сельскохозяйственные поля	99,93	5,10	1854

На рисунке 4.8 приведены эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{(L_{GREEN} - L_{BLUE}), L_{NIR}\}$.

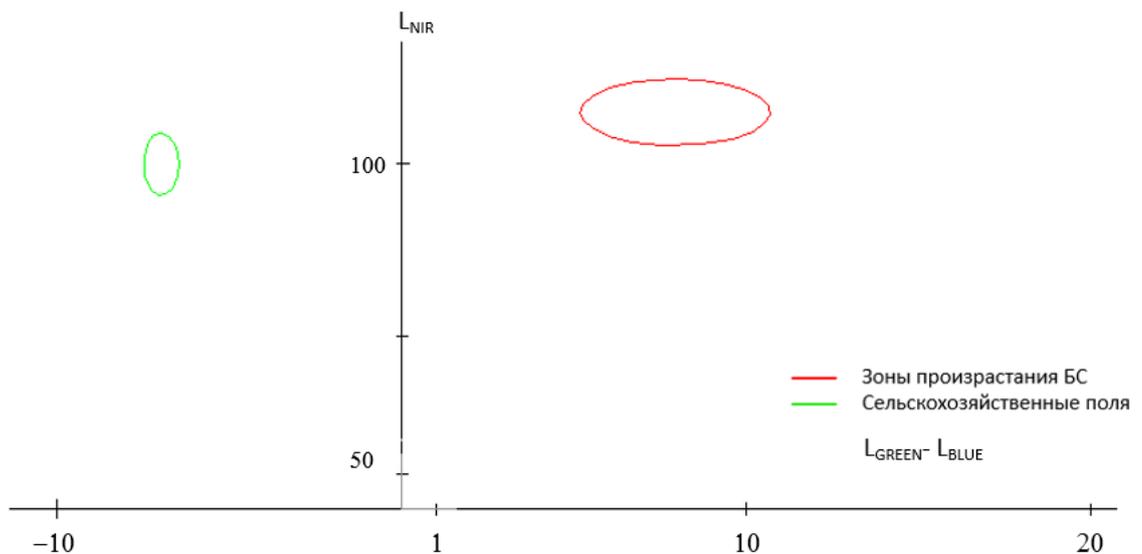


Рисунок 4.8 – Эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{(L_{GREEN} - L_{BLUE}), L_{NIR}\}$

Эталонные зоны произрастания БС и сельскохозяйственных полей не имеют пересечений в пространстве признаков $\{(L_{GREEN} - L_{BLUE}), L_{NIR}\}$. Однако индекс HSI, предложенный в разделе 3, основан на свойстве близости значений в зеленом и синем каналах для данных КА RapidEye, соответствующих уровню обработки L1B. Данная особенность обусловлена более высокими значениями спектральной яркости пикселей, соответствующих БС, в зеленом канале съемки относительно синего. Для данных, полученных при помощи КА LandSat-8, эта особенность сохраняется, но значения изменяются, что приводит к неверному определению пикселей, относящихся к БС, и, как следствие, необходимости уточне-

ния расчетной формулы. В связи с этим в формулу расчета индекса HSI вносится поправочный коэффициент, учитывающий отличительные особенности сенсора данного КА:

$$K_{\text{HSI}} = \frac{L_{\text{NIR}}}{|K_s + L_{\text{GREEN}} - L_{\text{BLUE}}|}, \quad (4.2)$$

где K_s – поправочный коэффициент, постоянный для каждого КА ДЗЗ.

С целью приведения знаменателя индекса HSI для БС к значениям, близким к нулю, исходя из рассчитанных статистических характеристик, приведенных в таблице 4.5, значение K_s было выбрано равным (-10).

В таблице 4.8 приведены статистические характеристики распределений значений индексов HSI и NDVI для тестовых участков.

Таблица 4.8 – Статистические характеристики распределений значений индексов HSI и NDVI для тестовых участков для снимков КА LandSat-8

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	k_{HSI}	k_{NDVI}
1: БС 1	$M(L)$	45,54	0,55
	$s(L)$	39,48	0,03
1: БС 2	$M(L)$	16,1	0,55
	$s(L)$	6,54	0,01
2: БС 1	$M(L)$	59,33	0,55
	$s(L)$	33,64	0,03
2: БС 2	$M(L)$	46,84	0,58
	$s(L)$	32,21	0,02
3: БС 1	$M(L)$	71,33	0,68
	$s(L)$	45,12	0,03
3: БС 2	$M(L)$	33,16	0,64
	$s(L)$	11,51	0,02
4: БС 1	$M(L)$	36,01	0,56
	$s(L)$	28,02	0,04
4: БС 2	$M(L)$	32,5	0,51
	$s(L)$	27,73	0,02
1: с/х поле 1	$M(L)$	5,61	0,65
	$s(L)$	0,23	0,01
1: с/х поле 2	$M(L)$	6,22	0,66
	$s(L)$	0,32	0,02
2: с/х поле 1	$M(L)$	5,12	0,61
	$s(L)$	0,28	0,03

Продолжение таблицы 4.8

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	k_{HSI}	k_{NDVI}
2: с/х поле 2	$M(L)$ $s(L)$	5,81 0,31	0,74 0,03
3: с/х поле 1	$M(L)$ $s(L)$	7,52 0,36	0,73 0,02
3: с/х поле 2	$M(L)$ $s(L)$	6,12 1,15	0,71 0,03
4: с/х поле 1	$M(L)$ $s(L)$	5,12 0,32	0,68 0,03
4: с/х поле 2	$M(L)$ $s(L)$	7,53 0,46	0,76 0,02

Для всех тестовых участков БС условие превышения порога по индексу NDVI, установленного в разделе 3 и равного 0,3, было выполнено. Средние значения индекса HSI для рассмотренных участков с/х полей не превышают значения 7,53, в то время как для БС – не менее 16,1. Следует отметить, что значения СКО индекса HSI для БС приняли значения от 6,54 до 45,12, что объясняется особенностями расчета индекса и, как следствие, наличием значений, в несколько раз превышающих математическое ожидание.

В таблице 4.9 приведены рассчитанные статистические характеристики в пространстве признаков $\{k_{HSI}\}$ для исследуемых классов объектов вне зависимости от конкретного спутникового снимка.

Таблица 4.9 – Статистические характеристики распределений значений индекса HSI для снимков КА LandSat-8

Класс объектов	$M(k_{HSI})$	$s(k_{HSI})$	Количество пикселей
БС	42,65	27,30	228
Сельскохозяйственные поля	5,87	0,38	1854

На рисунке 4.9 приведены гистограммы распределения количества пикселей в зависимости от значения индекса HSI для эталонных участков сельскохозяйственных полей и зон произрастания БС. Шкала по оси абсцисс для БС является нерегулярной для удобства отображения.

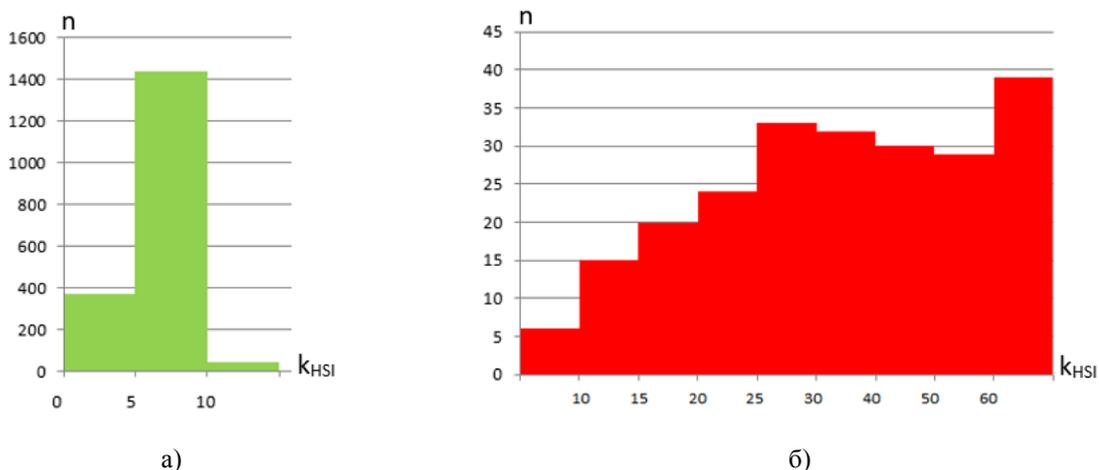


Рисунок 4.9 – Гистограммы распределения количества пикселей в зависимости от значения индекса HSI:
а) сельскохозяйственные поля; б) зоны произрастания БС

Индекс HSI среди пикселей эталонной выборки, соответствующей сельскохозяйственным полям, превысил значение 10 в 2,43% случаев. В то же время значения индекса HSI, соответствующие БС, оказались ниже 10 в 2,63% случаев.

В результате анализа результатов расчета индекса HSI для БС и наиболее близкого по характеристикам спектрального отражения класса – сельскохозяйственных полей – был сделан вывод о возможности применения HSI для решения задачи распознавания БС по данным LandSat-8. В соответствии с полученными результатами, приведенными на рисунке 4.9, пороговое значение для индекса HSI установлено равным 10.

Валидация способа контроля БС по мультиспектральным снимкам КА LandSat-8 проводилась путем их сопоставления с результатами обработки спутниковых снимков КА RapidEye. Необходимым условием являлся факт близких дат проведения съемок обоими КА.

Для анализа были выбраны снимок КА LandSat-8 27.08.2013 и снимок КА RapidEye 06.09.2013 территории Волосовского и Гатчинского районов ЛО – рисунок 4.10. Выбранная общая часть снимков составила 2500 км².

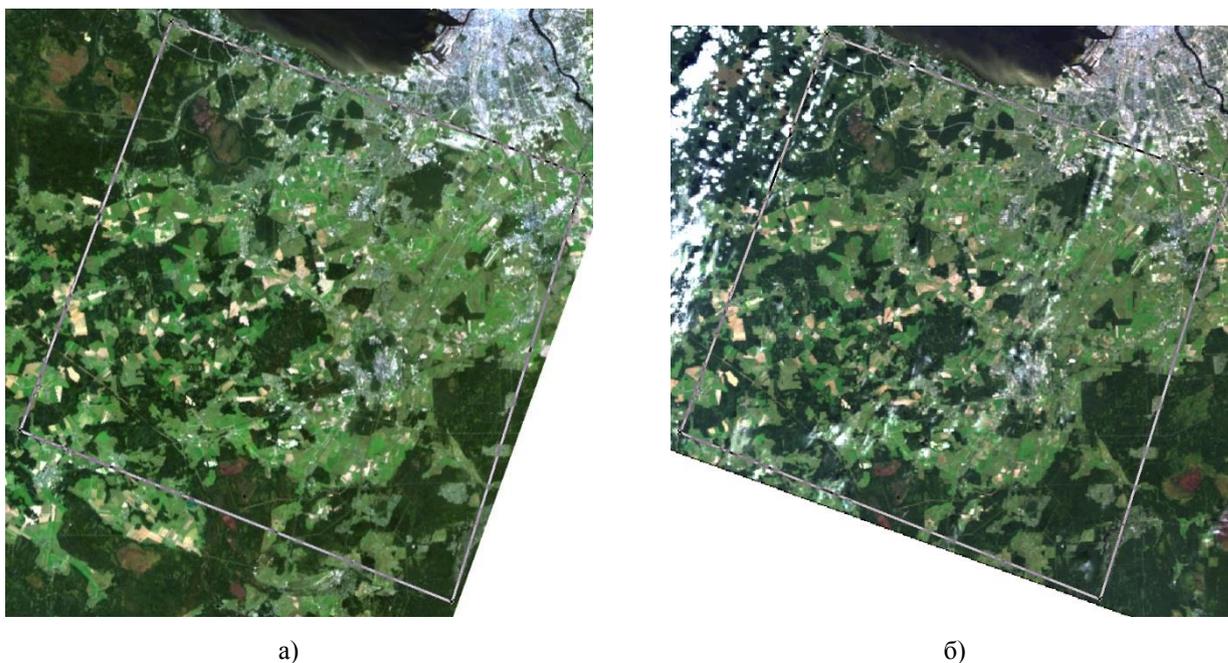


Рисунок 4.10 – Исходные данные для проведения валидации способа контроля БС по снимкам КА LandSat-8 (контуром показана зона, выбранная для анализа):
а) LandSat-8, 27-08-2013, б) КА RapidEye, 06-09-2013

Разработанный способ контроля БС был применен к обоим выбранным снимкам. Полученные результаты были наложены друг на друга и приведены на рисунке 4.11. Следует заметить, что слой БС, полученный по снимку КА RapidEye имеет приоритет отображения и частично перекрывает результат, полученный по снимку КА LandSat-8.

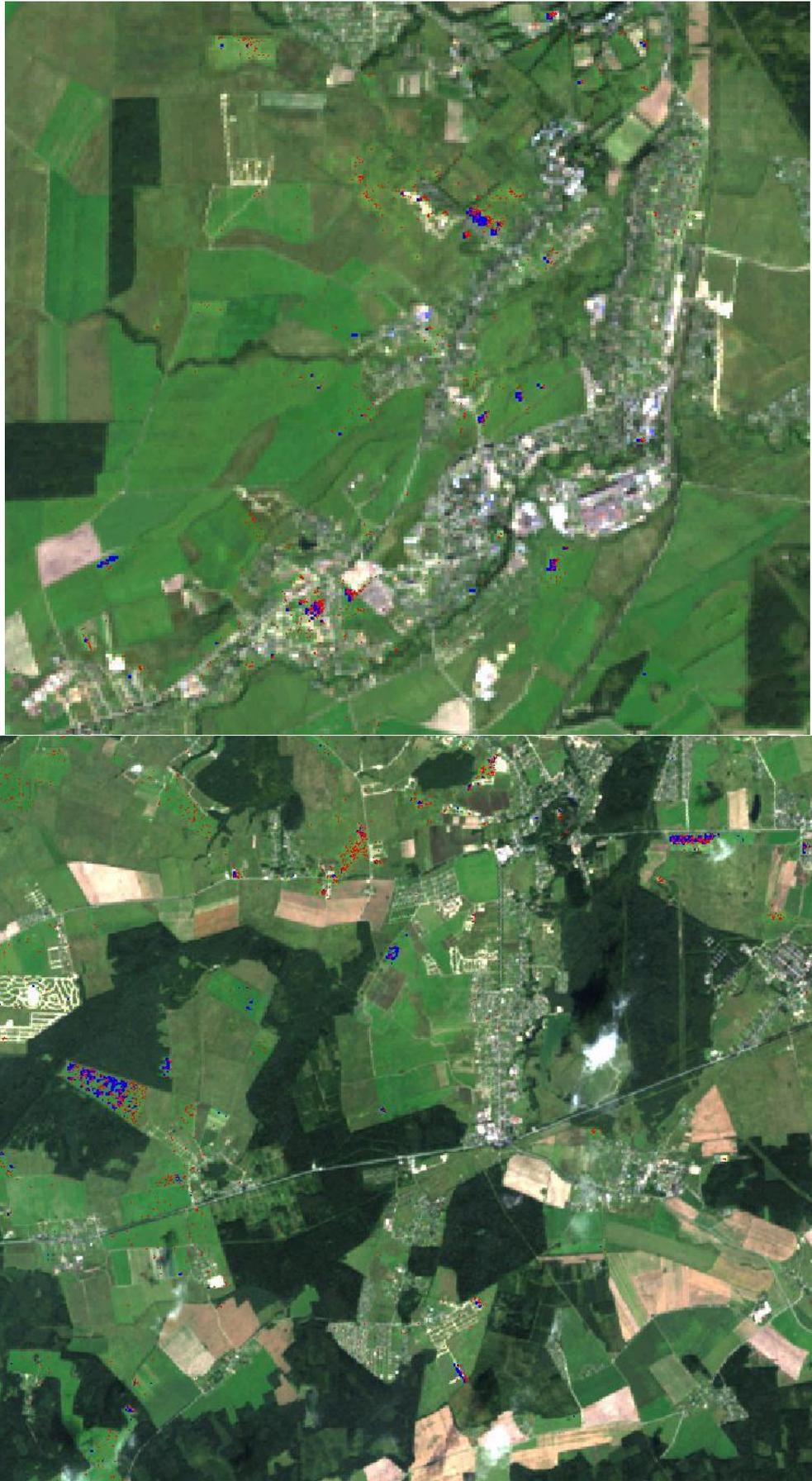


Рисунок 4.11 – Валидация способа контроля БС по снимкам КА LandSat-8, синий – результаты обработки снимка КА LandSat-8, красный – КА RapidEye

Для определения степени соответствия результатов контроля зон произрастания БС по данным КА RapidEye и LandSat-8 выполнено сравнение результатов, включающее следующие шаги:

- расчет площади зон произрастания БС для КА RapidEye и LandSat-8 в отдельности, исходя из количества пикселей;
- векторизация растровых слоев распределения БС;
- расчет площади зон произрастания БС;
- исключение из рассмотрения зон произрастания БС, меньших по площади 3600 м^2 (площадь четырех пикселей снимка КА LandSat-8), что необходимо для сокращения количества ошибок, связанных с несовпадением единичных пикселей;
- расчет суммарной площади векторных объектов для КА RapidEye и LandSat-8 в отдельности;
- расчет площади пересечения векторных слоев для КА RapidEye и LandSat-8.

В результате сравнения слоев распространения БС получены следующие результаты и сделаны следующие выводы:

- общая площадь обнаруженного БС на исследуемом участке по снимку КА LandSat-8 составила $4,04 \text{ км}^2$, по снимку КА RapidEye – $5,35 \text{ км}^2$. Несовпадение результатов объясняется более высоким ПР КА RapidEye и, как следствие, возможностью обнаружения объектов меньшей площади. Наиболее малые по площади зоны произрастания БС, обнаруженные по данным КА RapidEye, оказались меньшими по площади, чем один пиксель снимка LandSat-8, который в результате не был маркирован как БС.

- при рассмотрении обнаруженных зон произрастания БС площадью не менее 3600 м^2 (площадь четырех пикселей снимка КА LandSat-8) площадь обнаруженного БС на исследуемом участке по снимку КА LandSat-8 составила $3,56 \text{ км}^2$, по снимку КА RapidEye – $3,86 \text{ км}^2$. Площадь пересечения векторных слоев составила $3,19 \text{ км}^2$, что составляет 90% от площади, рассчитанной по данным LandSat-8.

Исходя из полученных результатов, сделан вывод, что снимки КА LandSat-8 могут использоваться в качестве исходных данных для разработанного способа контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным.

4.3.2. Адаптация разработанного способа для контроля зон произрастания борщевика Сосновского по данным Sentinel-2A

Особенностью сенсора КА Sentinel-2A является узкий по сравнению с аналогами зеленый съемочный поддиапазон: $0,54\text{-}0,58 \text{ мкм}$. Использование зеленого съемочного канала при расчете индекса HSI определяет необходимость оценки особенностей БС по снимкам КА Sentinel-2A.

Для оценки обнаруженных информативных признаков БС в настоящей работе проанализированы снимки КА Sentinel-2A в синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном поддиапазонах съемки. С целью снижения влияния межгодовых отличий БС в качестве исходных данных использовались снимки за два года для обеих рассматриваемых фенологических фаз. Перечень использованных материалов приведен в таблице 4.10.

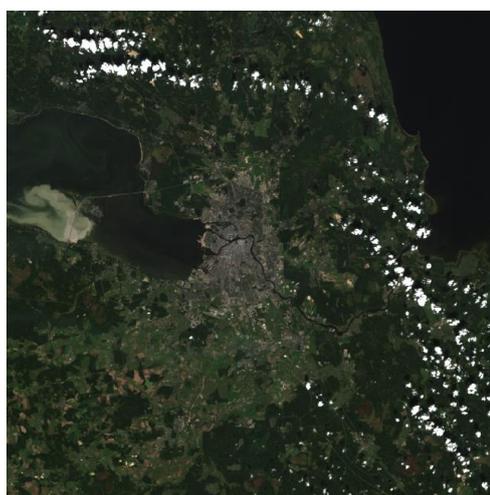
Таблица 4.10 – Используемые мультиспектральные спутниковые снимки КА Sentinel-2A

№	Дата съемки	Фен. фаза	Год
1	08.08.2015	цветение/плодоношение	2015
2	21.08.2015	плодоношение	2015
3	02.08.2016	цветение	2016
4	22.08.2016	плодоношение	2016

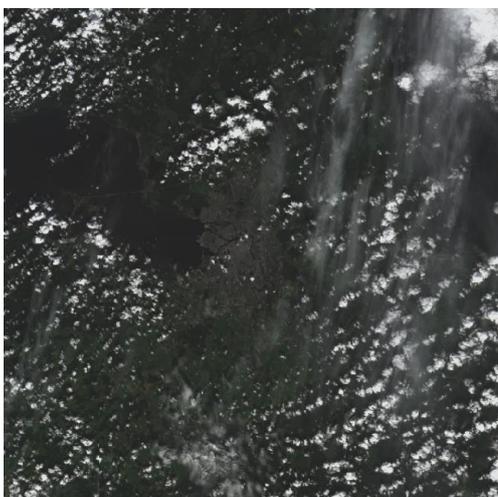
Изображения используемых снимков приведены на рисунке 4.12.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.12 – Используемые мультиспектральные спутниковые снимки КА Sentinel-2A:

а) 08.08.2015, б) 21.08.2015, в) 02.08.2016, г) 22.08.2016

Для каждого из представленных снимков был выбран один участок БС и один участок сельскохозяйственного поля как наиболее близкого по спектральным характеристикам объекта к БС. Характеристики текстовых участков приведены в приложении Д. Результаты расчетов статистических характеристик распределений значений спектральных яркостей для тестовых участков приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Статистические характеристики распределений значений спектральных яркостей для тестовых участков зон произрастания БС и сельскохозяйственных полей

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	0,45-0,53 нм	0,54-0,58 нм	0,65-0,68 нм	0,786-0,9 нм
1: БС (148)	$M(L)$	1125,09	1376,49	789,86	4116,32
	$s(L)$	13,01	57,01	31,65	224,81
2: БС (246)	$M(L)$	975,9	1215,44	763,69	3602,6
	$s(L)$	16,3	68,96	73,23	315,59
3: БС (47)	$M(L)$	988,36	1219,7	626,87	3832,47
	$s(L)$	13,7	62,1	28,12	165
4: БС (79)	$M(L)$	1011,65	1209,97	668,82	3598,51
	$s(L)$	24,7	24,29	35,63	172,09
1: с/х поле (572)	$M(L)$	1035,7	955,68	626,26	2816,42
	$s(L)$	10,81	22,61	23,08	164,07
2: с/х поле (468)	$M(L)$	967,28	1006,69	612,37	4294,85
	$s(L)$	16,61	17,01	34,5	256,88
3: с/х поле (6411)	$M(L)$	943,64	926,65	520,9	3551,11
	$s(L)$	21,72	42,97	41,47	314,94
4: с/х поле (399)	$M(L)$	960,19	982,98	546,03	3613,97
	$s(L)$	13,42	28,39	21,08	121,69

В таблицах 4.12-4.13 приведены рассчитанные статистические характеристики разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки ($L_{GREEN} - L_{BLUE}$) и спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки (L_{NIR}) для исследуемых классов объектов вне зависимости от конкретного спутникового снимка.

Таблица 4.12 – Статистические характеристики распределений модуля разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки для снимков КА Sentinel-2A

Класс объектов	$M(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	$s(L_{GREEN} - L_{BLUE})$	Кол-во пикселей
БС	235,87	60,63	520
Сельскохозяйственные поля	-16,21	45,47	7850

Таблица 4.13 – Статистические характеристики распределений значений спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки для снимков КА Sentinel-2A

Класс объектов	$M(L_{NIR})$	$s(L_{NIR})$	Кол-во пикселей
БС	3768,97	254,34	520
Сельскохозяйственные поля	3545,11	290,66	7850

На рисунке 4.13 приведены эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{(L_{GREEN} - L_{BLUE}), L_{NIR}\}$.

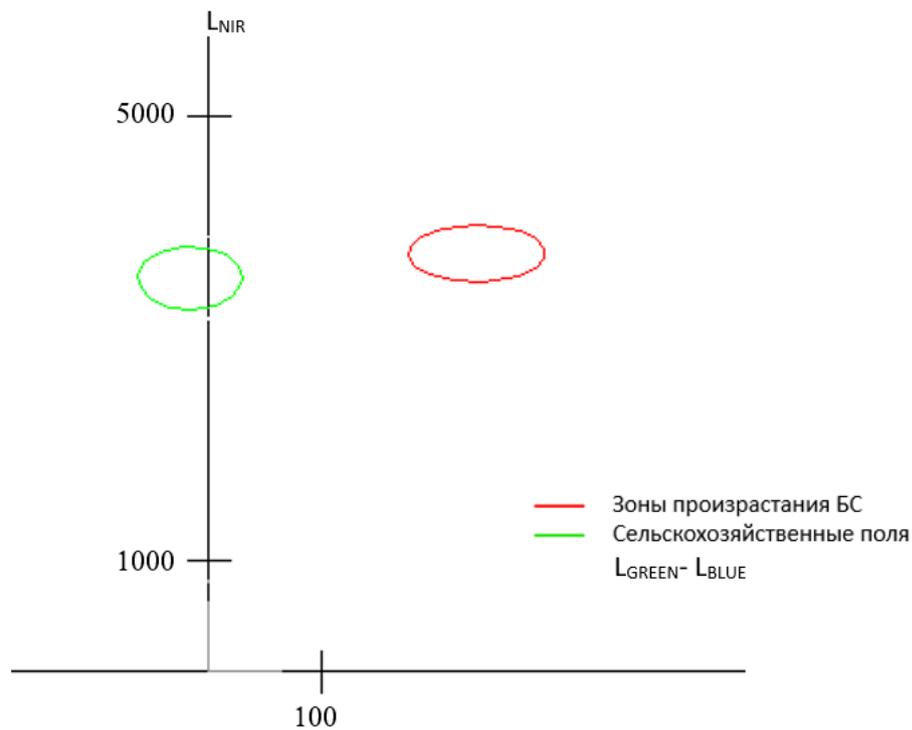


Рисунок 4.13 – Эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{(L_{GREEN} - L_{BLUE}), L_{NIR}\}$

По сравнению с результатами, полученными по данным КА RapidEye, для Sentinel-2A, значения в ближнем инфракрасном канале для двух рассматриваемых классов не являются информативными. При этом в зеленом канале БС в данном случае также имеет более высокие значения, относительно значений в синем канале по сравнению с сельскохозяйственными полями.

С целью приведения знаменателя индекса HSI для БС к значениям, близким к нулю, исходя из рассчитанных статистических характеристик, приведенных в таблице 4.11, значение K_s было выбрано равным (-250).

В таблице 4.14 приведены статистические характеристики распределений значений индексов HSI и NDVI для тестовых участков.

Для всех тестовых участков БС условие превышения порога по индексу NDVI, установленного в разделе 3 и равного 0,3, было выполнено. Средние значения индекса HSI для рассмотренных участков сельскохозяйственных полей не превышают значения 20,62, в то время как для БС – не менее 100,97. Следует отметить, что значения СКО индекса HSI для БС приняли значения от 101,32 до 777,74, что объясняется особенностями расчета индекса и, как следствие, наличием значений, в несколько раз превышающих математическое ожидание.

Таблица 4.14 – Статистические характеристики распределений значений индексов HSI и NDVI для тестовых участков

№ участка (кол-во пикселей)	Параметр	k_{HSI}	k_{NDVI}
1: БС (148)	$M(L)$	399,78	0,68
	$s(L)$	777,74	0,02
2: БС (246)	$M(L)$	137,88	0,65
	$s(L)$	129,04	0,04
3: БС (47)	$M(L)$	148,47	0,72
	$s(L)$	134,7	0,01
4: БС (79)	$M(L)$	100,97	0,69
	$s(L)$	101,32	0,03
1: с/х поле (572)	$M(L)$	8,58	0,64
	$s(L)$	0,86	0,02
2: с/х поле (468)	$M(L)$	20,62	0,75
	$s(L)$	2,71	0,02
3: с/х поле (6411)	$M(L)$	13,59	0,74
	$s(L)$	2,66	0,03
4: с/х поле (399)	$M(L)$	16,09	0,74
	$s(L)$	1,96	0,01

В таблице 4.15 приведены рассчитанные статистические характеристики в пространстве признаков $\{k_{HSI}\}$ для исследуемых классов объектов вне зависимости от конкретного спутникового снимка.

Таблица 4.15 – Статистические характеристики распределений значений индекса HSI для снимков КА Sentinel-2A

Класс объектов	$M(k_{HSI})$	$s(k_{HSI})$	Количество пикселей
БС	207,77	309,97	520
Сельскохозяйственные поля	13,77	2,50	7850

На рисунке 4.14 приведены гистограммы распределения количества пикселей в зависимости от значения индекса HSI для эталонных участков сельскохозяйственных полей

и зон произрастания БС. Шкала по оси абсцисс для БС является нерегулярной для удобства отображения.

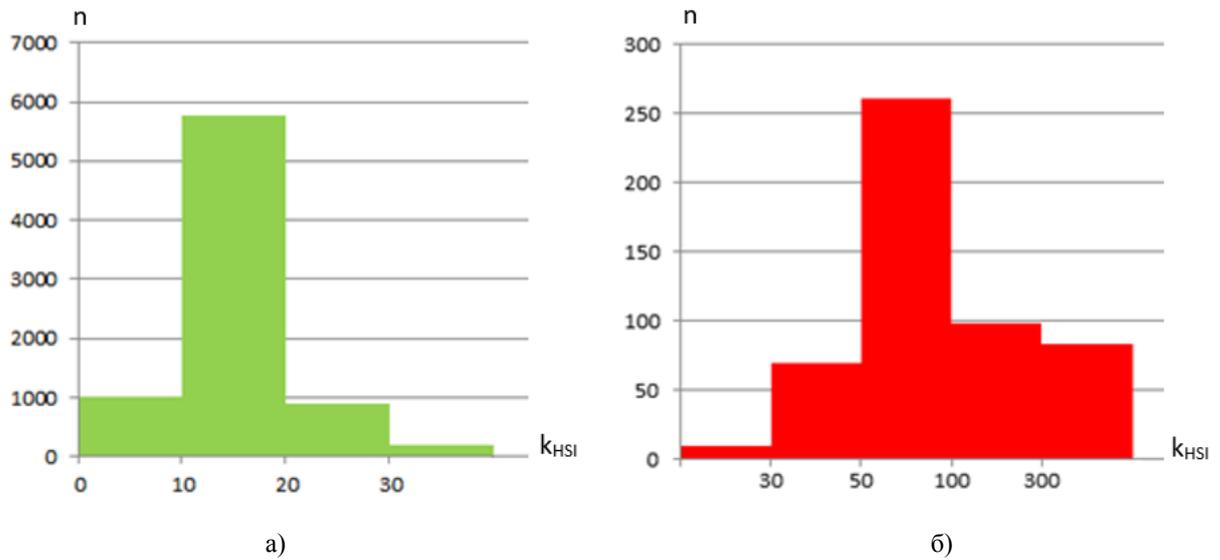


Рисунок 4.14 – Гистограммы распределения количества пикселей в зависимости от значения индекса HSI:
а) сельскохозяйственные поля; б) зоны произрастания БС

Индекс HSI для пикселей эталонной выборки, соответствующей сельскохозяйственным полям, превысил значение 30 в 2,38 % случаев. В то же время, значения индекса HSI, соответствующие БС, оказались ниже 30 в 1,73 % случаев.

В результате анализа результатов расчета индекса HSI для БС и наиболее близкого по характеристикам спектрального отражения класса – сельскохозяйственных полей – был сделан вывод о возможности применения HSI для решения задачи контроля БС по данным Sentinel-2A. В соответствии с полученными результатами, приведенными на рисунке 4.14, пороговое значение для индекса HSI было установлено равным 30.

Валидация способа контроля зон произрастания БС по мультиспектральным снимкам КА Sentinel-2A проводилась путем их сопоставления с результатами обработки спутниковых снимков КА LandSat-8. Необходимым условием являлся факт близких дат проведения съемок обоими КА.

Для анализа выбраны снимок КА Sentinel-2A 22.08.2016 и снимок КА LandSat-8 19.08.2016 территории Волосовского и Гатчинского районов ЛО – рисунок 4.15. Выбранная общая часть снимков составила 87 км² (облачность <10%).

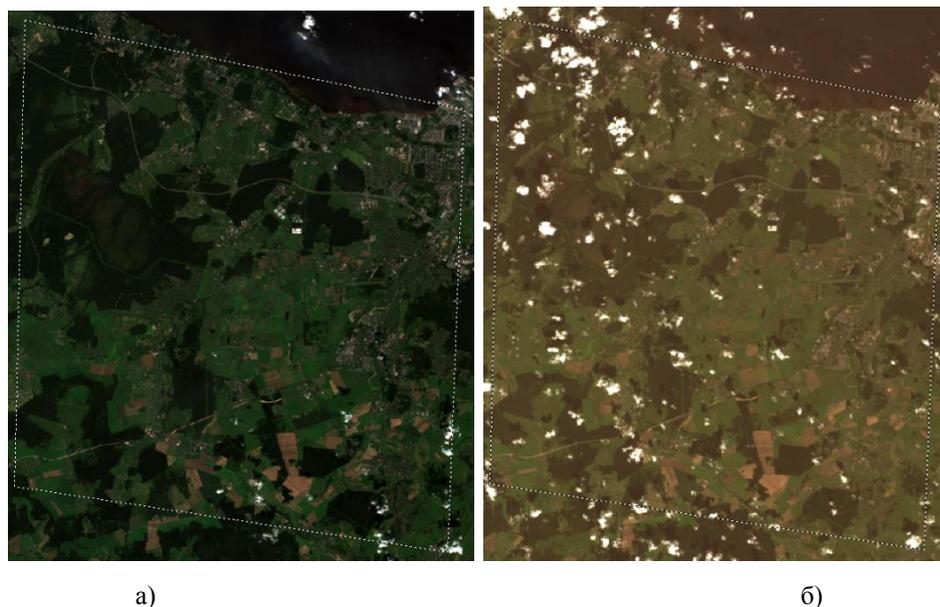


Рисунок 4.15 – Исходные данные для проведения валидации способа контроля БС по снимкам КА Sentinel-2A (контуром показана зона, выбранная для анализа):
 а) Sentinel-2A, 22-08-2016, б) КА LandSat-8, 19-08-2016

Разработанный способ контроля БС был применен к обоим выбранным снимкам. Фрагмент полученных результатов приведен на рисунке 4.16.

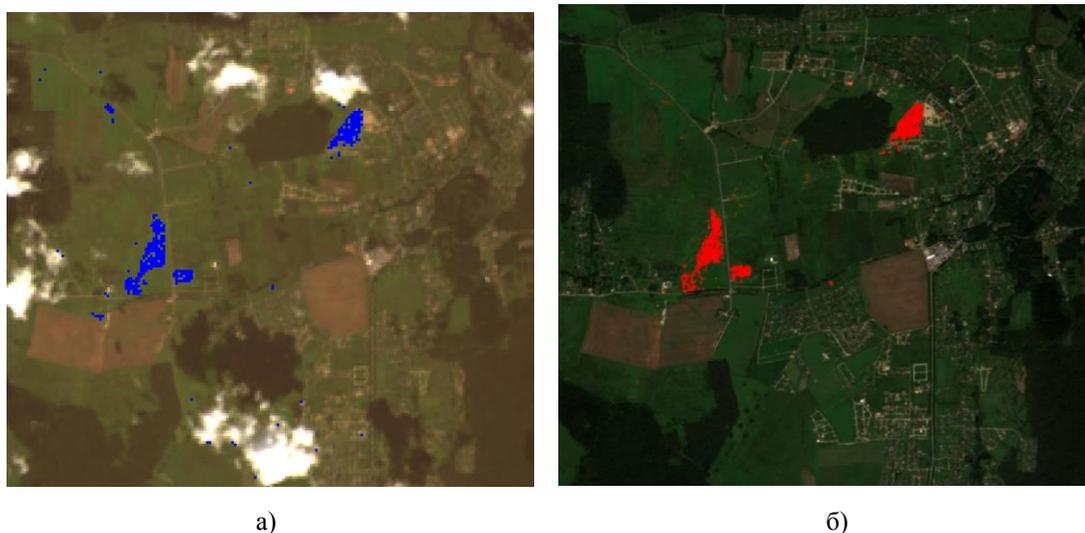


Рисунок 4.16 – Валидация способа контроля БС по снимкам КА Sentinel-2A, а) результаты обработки снимка КА LandSat-8 (выделено синим), б) результаты обработки снимка КА Sentinel-2A (выделено красным)

В результате анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы:

- общая площадь распознанного БС на исследуемом участке по снимку КА LandSat-8 составила $0,654 \text{ км}^2$, по снимку КА Sentinel-2A – $0,653 \text{ км}^2$. Несовпадение результатов незначительно и заключается в несовпадении положения единичных пикселей.

- при рассмотрении распознанных ареалов БС площадью не менее 3600 м^2 (площадь четырех пикселей снимка КА LandSat-8) степень соответствия составила 95%.

При рассмотрении зон произрастания БС площадью не менее 3600 м² (площадь четырех пикселей снимка КА LandSat-8) площадь распознанного БС на исследуемом участке по снимку КА LandSat-8 составила 0,573 км², по снимку КА Sentinel-2A – 0,585 км². Площадь пересечения векторных слоев составила 0,542 км², что составляет 95% от площади, рассчитанной по данным LandSat-8.

Исходя из полученных результатов, сделан вывод, что снимки КА Sentinel-2A могут использоваться в качестве исходных данных для разработанного способа контроля БС по мультиспектральным спутниковым данным.

4.4. Рекомендации по применению разработанного способа контроля зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным о территории Ленинградской области

Разработанный в настоящем исследовании способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным имеет ряд ограничений ввиду конечности выборки использованных исходных данных.

Мультиспектральные спутниковые снимки, результаты обработки которых приведены в разделах 2-4, получены с различных КА: RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A. Разработанный способ на основе индекса HSI, как было показано ранее, может быть применим для всех представленных КА, но при этом существует необходимость подбора пороговых коэффициентов для каждого КА в отдельности, что обусловлено рядом причин:

- различный уровень обработки исходных данных, получаемых с различных КА;
- различия границ используемых спектральных диапазонов съемки различных КА;
- различное пространственное разрешение снимков, выполненных различными КА;
- различия в параметрах орбиты и положения спутника на ней для различных КА.

Таким образом, разработанный способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным может применяться для КА, схожих по характеристикам с рассмотренными: SPOT-7, Ресурс-П/МВА, Ресурс-П/ШМСА-ВР, Канопус-В и другие. Совокупность снимков, полученных с каждого из представленных выше КА, должна быть рассмотрена в отдельности, для определения параметров применения индекса HSI.

Стационарность пороговых значений для трех рассмотренных КА вне зависимости от фенологической фазы БС не означает наличие данного свойства для других КА. Подбор параметров применения индекса HSI необходимо проводить с учетом изменчивости характеристик отражения БС в зависимости от даты проведения исследований.

В настоящей работе представлены результаты применения спутниковых снимков, выполненных в период с 06.07 по 12.09, что соответствует фенологическим фазам цвете-

ния и плодоношения БС. Возможность распознавания БС в период роста не рассматривалась. Тем не менее, большая по сравнению с окружающими растениями площадь листовой поверхности может являться фактором, порождающим отличительные особенности характеристик отражения БС. Данное предположение требует отдельных исследований и выходит за рамки поставленных задач.

Способ контроля зон произрастания БС, разработанный в настоящем исследовании, прошел апробацию только для региона ЛО. Однако можно утверждать, что он может быть использован для смежных с ЛО регионов, отличающихся аналогичными характеристиками природной зоны, например, Псковская, Новгородская, Вологодская области. Решение задачи контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным для других регионов РФ, например, территории Урала или дальнего Востока, требует проведения апробации способа.

Принципы, лежащие в основе разработанного способа контроля БС и индекса HSI, могут быть использованы для распознавания и контроля зон произрастания других природных объектов, имеющих схожие характеристики отражения, обусловленные наличием зеленой листвы и белых цветков. Так, например, индекс HSI может рассматриваться как опорный вариант решения задачи контроля яблонь в период цветения. Следует заметить, что периоды цветения яблони и БС не пересекаются [218].

Выводы по разделу 4

По результатам тестирования способа неразрушающего контроля зон произрастания БС и его адаптации для использования спутниковых данных различных космических систем сформулированы следующие выводы:

1. Разработанный в разделе 3 способ неразрушающего контроля зон произрастания БС применен для расчета площадей занятых растениями данного вида. В результате установлено, что в 2013 году общая площадь ЛО, занятая БС была равна 624.5 км² (0,806% от исследованной территории).

2. В результате анализа «Заключения по результатам экспертной оценки», выполненного ФГБУ «Российский сельскохозяйственный центр», сделан вывод о результатах применения разработанного способа, удовлетворяющих потребности надзорных организаций.

3. В результате адаптации разработанного способа к использованию данных КА LandSat-8 выявлена необходимость модернизации индекса HSI путем добавления в знаменатель коэффициента K_s , постоянного для данного КА ДЗЗ. Для LandSat-8 значение K_s установлено равным (-10). Индекс HSI для пикселей эталонной выборки, соответствующей

щей сельскохозяйственным полям, превысил значение 10 в 2,43% случаев. В то же время, значения индекса HSI, соответствующие БС, оказались ниже 10 в 2,63% случаев. Пороговые значения для индексов NDVI и HSI, используемые в разработанном ранее решающем правиле, установлены на значениях 0,3 и 10 соответственно.

4. В результате сравнения результатов контроля зон произрастания БС по данным КА LandSat-8 и КА RapidEye для областей площадью не менее 3600 м² (площадь четырех пикселей снимка КА LandSat-8) площадь пересечения результирующих слоев составила 90% от площади, рассчитанной по данным LandSat-8.

5. В результате адаптации разработанного способа к использованию данных КА LandSat-8 выявлена необходимость модернизации индекса HSI путем добавления в знаменатель коэффициента K_s , постоянного для данного КА ДЗЗ. Для Sentinel-2A значение K_s установлено равным (-250). Индекс HSI для пикселей эталонной выборки, соответствующей сельскохозяйственным полям, превысил значение 30 в 2,38 % случаев. В то же время, значения индекса HSI, соответствующие БС, оказались ниже 30 в 1,73 % случаев. Пороговые значения для индексов NDVI и HSI, используемые в разработанном ранее решающем правиле, установлены на значениях 0,3 и 30 соответственно.

6. В результате контроля зон произрастания БС по данным КА LandSat-8 и КА Sentinel-2A для областей площадью не менее 3600 м² (площадь четырех пикселей снимка КА LandSat-8) площадь пересечения результирующих слоев составила 95% от площади, рассчитанной по данным LandSat-8.

7. Разработанный способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным может применяться для КА, схожих по характеристикам с рассмотренными: SPOT-7, Ресурс-П/МВА, Ресурс-П/ШМСА-ВР, Канопус-В и другие.

8. Принципы, положенные в основу разработанного способа контроля зон произрастания БС и индекса HSI, могут быть использованы для распознавания и контроля зон произрастания других объектов природной среды, имеющих схожие характеристики отражения, обусловленные наличием зеленой листвы и белых цветков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании разработан способ контроля БС по спектральным характеристикам отражения оптического диапазона. В процессе выполнения работы были получены следующие основные результаты, имеющие научное и практическое значение:

1. Подходящими для распознавания БС и контроля зон произрастания БС по спутниковым снимкам являются мультиспектральные данные среднего и высокого ПР, в частности, полученные с КА RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A. Для разработки информационной модели зон произрастания БС по спутниковым снимкам целесообразно использовать яркостные информативные признаки ввиду того, что зоны произрастания БС имеют случайную форму и только в редких случаях соответствуют контурам отдельных полей, имеющих правильную геометрическую форму, но при этом имеют отличия в характеристиках отражения волн оптического диапазона. По результатам проведения полевых экспедиций по данным полевого портативного спектрорадиометра PSR-1100 была разработана информационная модель зон произрастания БС в виде упорядоченных пар значений (r_i, λ_j) , $\lambda \in (320; 1100)$ нм. По результатам анализа спутниковых снимков КА RapidEye построена информационная модель зон произрастания БС, представляющая собой совокупность значений $(M(L_j), s(L_j), \lambda_j)$, где j – номер спектрального поддиапазона, $\lambda \in ((0,44-0,51); (0,52-0,59); (0,63-0,685); (0,69-0,73); (0,76-0,88))$ нм. Структурные элементы БС (соцветия, листья) отличаются по показателям СПЭЯ и КСЯ от окружающей травянистой растительности в каждый из рассмотренных фенологических фаз.

2. Разработан спектральный индекс HSI, позволяющий производить распознавание БС по отраженному сигналу оптического диапазона, зафиксированному в спутниковых данных информативных признаков зон произрастания БС на КА RapidEye. В пределах исследованных эталонных объектов информативные признаки зон произрастания БС не зависят от фенологической фазы БС. По результатам анализа пространства признаков $\{|L_{GREEN}-L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$ был сделан вывод о том, что наиболее близким к БС оказался класс объектов «сельскохозяйственные поля».

3. Разработаны решающие правила обнаружения растительности и распознавания БС на основе индексов HSI и NDVI и пороговой методики, учитывающие информативные признаки зон произрастания БС и исключаящие из рассмотрения заведомо ложные объекты, такие как облака и антропогенные объекты.

4. Разработана структурная схема алгоритма, реализующего способ контроля зон произрастания БС. Разработанный алгоритм применим для распознавания БС, определения динамики и направления распространения БС. Критерии обнаружения, коэффициенты

и пороговые значения вегетационных индексов хранятся в БД для каждой из рассматриваемых систем ДЗЗ. Данные о расположении зон произрастания БС размещаются в геопортале, являющимся инструментом визуализации результатов и хранилищем данных для контроля динамики распространения БС.

5. Разработан алгоритм распознавания БС по мультиспектральным данным космических систем RapidEye, LandSat-8, Sentinel-2A и реализован в программной среде ERDAS Imagine Professional Model Maker. Алгоритм осуществляет преобразование данных КА ДЗЗ уровня обработки не ниже L1B к бинарному слою геопространственных данных, характеризующих зоны произрастания БС на основе рассчитанных индексов HSI и NDVI и пороговой обработки. В процессе разработки и реализации алгоритма было разработано и зарегистрировано ПО анализа данных ДЗЗ [219-222].

6. Разработанный способ контроля зон произрастания БС применен для расчета площадей, занятых растениями данного вида. В результате установлено, что в 2013 году общая площадь ЛО, занятая БС, была равна 624.5 км² (0,806% от исследованной территории). В результате анализа «Заключения по результатам экспертной оценки», выполненного ФГБУ «Российский сельскохозяйственный центр», сделан вывод о полученных результатах применения разработанного способа, удовлетворяющих потребности надзорных организаций.

Полученные результаты соответствуют паспорту специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» в части пунктов:

п.1. научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий;

п.4. разработка методического, технического, приборного и информационного обеспечения для локальных, региональных и глобальных систем экологического мониторинга природных и техногенных объектов;

п.6. разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля.

Перспективными направлениями дальнейших исследований в области контроля зон произрастания БС, являются:

1. Апробация способа контроля зон произрастания БС для других регионов Российской Федерации, анализ особенностей произрастания БС и другой растительности в данных регионах;

2. Анализ возможности использования для решения данной задачи контроля спутниковой съемки других КА, например, SPOT-7, Ресурс-П/МВА, Ресурс-П/ШМСА-ВР, Канопус-В и других;

3. Анализ применимости разработанного в настоящей работе способа для контроля зон произрастания БС в других фенологических фазах;

4. Автоматизация построения, анализа и моделирования векторов распространения БС на заданных территориях.

Разработанный способ контроля зон произрастания БС может быть взят за основу и адаптирован для контроля растительности других видов.

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены в практику оперативно-го мониторинга природных сред, осуществляемого в настоящее время территориальными управлениями по сельскому хозяйству, а также рядом академических и отраслевых организаций и институтов, выполняющих исследования в области экологии, природопользования и сельского хозяйства. Полученные результаты контроля зон произрастания борщевика Сосновского могут быть положены в основу новых разработок по обнаружению, распознаванию и контролю компонентов природной среды, моделированию и анализу динамики их распространения на основе обработки мультиспектральных спутниковых данных.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БД	-	База данных
БС	-	Борщевик Сосновского
ГИС	-	Географическая информационная система
ДЗЗ	-	Дистанционное зондирование Земли
ИК	-	Инфракрасный
КА	-	Космический аппарат
ЛДР	-	Лаборатории реактивного движения НАСА
ЛО	-	Ленинградская область
КСЯ	-	Коэффициент спектральной яркости
НС	-	Нейронные сети
ОО	-	Объектно-ориентированный
ПО	-	Программное обеспечение
СКО	-	Среднеквадратическое отклонение
СПб	-	Санкт-Петербург
СПЭЯ	-	Спектральная плотность энергетической яркости
ASL	-	ASTER Spectral Library
DN	-	Digital number
EOSDIS	-	Earth Observation System Data Information System
GMT	-	Greenwich mean time
HSI	-	Heracleum Sosnowskyi Index
МОВ	-	Метод опорных векторов
NASA (НАСА)	-	Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства
OLI	-	Operational Land Imager
RGB	-	(Red-Green-Blue – Красный-Зеленый-Синий)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56542–2015 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М. : Стандартиформ, 2016. – 15 с.
2. Лупян, Е.А., Барталев, С.А., Мельник, Н.Н, Темников, В.Н. Состояние и перспективы развития Российской системы спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель / Е.А. Лупян, С.А. Барталев [и др.] // Сборник тезисов докладов Третьей всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2005. - С. 9.
3. Барталев, С.А., Лупян, Е.А., Нейштадт, И.А., Савин, И.Ю. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Лупян [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2005. - выпуск 2, том 2. - С. 228-236.
4. Толпин, В.А., Барталев, С.А., Матвеев, А.М., Лупян, Е.А. Возможности анализа архивов спутниковых данных для выбора годов аналогов в системе дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель агропромышленного комплекса (СДМЗ АПК) / В.А. Толпин, С.А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2009. – выпуск 6, том 2. – С. 560-571.
5. Толпин, В.А. Система обработки и визуализации данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга состояния сельскохозяйственной растительности : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.01 / Толпин Владимир Аркадьевич. - Рязань, 2013. - 17 с.
6. Чичкова, Е.Ф., Григорьев, А.Н., Зайцев, В.В., Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С. Геопортальная технология на основе результатов обработки данных на территорию береговой зоны Печорского моря / Е.Ф. Чичкова [и др.] // Применение космических технологий для развития арктических регионов: сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. – С. 270-271.
7. Чичкова, Е.Ф., Григорьев, А.Н., Зайцев, В.В., Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С. Опыт использования геопортальной технологии «Scanex GeoMixer» для геоэкологического мониторинга при решении задач недропользования / Е.Ф. Чичкова [и др.] // «Средства и технологии ДЗЗ из космоса в науке, образовании, бизнесе»: сборник тезисов международной научно-практической конференции 10 – 11 апреля 2014 г. — М. : Инженерно-технологический Центр СканЭкс, 2014. — С. 259-265.

8. Чичкова, Е.Ф., Григорьев, А.Н., Зайцев, В.В., Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С., Рыбалко, А.Е., Басова, С.Л. Геопортальная технология для мониторинга опасных геологических процессов / Е.Ф. Чичкова [и др.] // Материалы Второй Международной конференции «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов». – СПб. : ФГУП «ВСЕГЕИ», 2014. — С. 113-117.

9. Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция «современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)» [Электронный ресурс] : Институт космических исследований Российской академии наук. – Режим доступа : http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/ - Дата обращения: 25.03.2018. – язык русский.

10. VII международная конференция «Земля из космоса» 1-2 декабря 2016 года [Электронный ресурс] : Сканэкс. - Режим доступа : conference2016.scanex.ru/ru - Дата обращения: 10.12.2016. – язык русский.

11. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль: Справочник : в 8 т. / Под общ. редакцией В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2006. – 8 т.

12. Синёва, А.А. Поляризационная радиолокация для обнаружения и идентификации пленочных загрязнений моря / А.А. Синева // Труды МФТИ. - М., 2014. – том 6, №3. – С. 129-141.

13. Чимитдоржиев, Т.Н., Базаров, А.В., Кирбижекова, И.И., Дмитриев, А.В., Гармаев, А.М., Емельянов, К.С., Гусев, М.А. Создание и применение базовых продуктов ДЗЗ лесохозяйственного назначения [Электронный ресурс] / Т.Н. Чимитдоржиев [и др.] // Всероссийская конференция «Обработка пространственных данных и дистанционный мониторинг природной среды и масштабных антропогенных процессов». – Барнаул, 2013. – Режим доступа : <http://conf.nsc.ru/DPRS-2013/ru/reportview/170310;jsessionid=58105BAF94C80750E1C7D8C6AD28416D> – Дата обращения: 24.01.2018. – язык русский.

14. Копылов, В.Н., Полищук, Ю.М., Хамедов, В.А. Синтез оптических и радиолокационных космических снимков при решении задачи оперативного обнаружения лесных гарей / В.Н. Копылов [и др.] // ГЕО-СИБИРЬ. – Новосибирск, 2007. – том 3. – С. 157-162.

15. Космическая съемка [Электронный ресурс] : Компания «Совзонд». Геоинформационные системы и аэрокосмический мониторинг. – Режим доступа : <http://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/#optic> - Дата обращения: 04.06.2015. – язык русский.

16. Воробьева, А.А. Дистанционное зондирование Земли: учебно-методическое пособие / А.А. Воробьева. — СПб. : СПбУ ИТМО, 2012. — 168 с.
17. Токарева, О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О.С. Токарева. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 148 с.
18. Ерохин Н.С., Зольникова, Н.Н., Михайловская, Л.А., Луков, С.Л. Исследование скейлинговых параметров структурных функций атмосферного электричества для грозовой облачности / Н.С. Ерохин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2009. – выпуск 6, том 1. - С. 139-145.
19. Булкин, В.В. Пассивно-активные радиотехнические средства контроля метеорологических параметров природной среды : дис. ... док. тех. наук : 05.11.13 / Булкин Владислав Венедиктович. – Н.Новгород, 2006. - 275 с.
20. Готюр, И.А., Караваев, Д.М., Краснов, В.М., Кулешов, Ю.В., Лебедев, А.Б., Мешков, А.Н., Щукин, Г.Г. Оценка обусловленной водяным паром тропосферной задержки радиоволн на основе модели и данных микроволновой радиометрии / И.А. Готюр [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. - 2017. - Т. 60, №3. - С. 223-230.
21. Караваев, Д.М., Кулешов, Ю.В., Лебедев, А.Б., Щукин, Г.Г. Проблемы комплексного анализа и использования данных микроволновых зондировщиков / Д.М. Караваев [и др.] // Сборник тезисов докладов Четырнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2016. - С. 30.
22. Караваев, Д.М., Щукин, Г.Г. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы / Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин. // Оптика атмосферы и океана. - 2015. - Т. 28., №12. - С. 1122-1127.
23. Чичкова, Е.Ф. Определение параметров облачности по данным искусственных спутников Земли : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.09 / Чичкова Елена Федоровна. – М., 1994. - 21 с.
24. Астафуров, В.Г., Скороходов, А.В. Классификация облаков по спутниковым снимкам на основе технологии нейронных сетей / В.Г. Астафуров, А.В. Скороходов. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2011. – том 8, номер 1. - С. 65-82.
25. Астафуров, В.Г., Евсюткин, Т.В. Программная система для автоматической классификации текстур перистой облачности на основе нейро-нечеткой сети / В.Г. Астафуров, Т.В. Евсюткин // Доклады ТУСУРа. – 2015. - № 2 (36), июнь. – С. 125-129.

26. Завелевич, Ф.С., Головин, Ю.М., Десятов, А.В., Козлов, Д.А., Мащицкий, Ю.П., Никулин, А.Г., Травников, Р.И., Романовский, А.С., Архипов, С.А. Целиков, В.А. Технологический образец бортового инфракрасного фурье-спектромера ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли / Ф.С. Завелевич [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2009. – выпуск 6, том 1. - С. 259-266.
27. Вылегжанин, И.С., Жуков, В.Ю., Караваев, Д.М., Шукин, Г.Г. Развитие метода пассивно-активной радиолокации для задач штормоповещения / И.С. Вылегжанин [и др.] // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – СПб., 2016. - № 653. - С. 146-150.
28. Абросимов, А.В., Дворкин, Б.А. Использование данных ДЗЗ из космоса для мониторинга водных объектов / А.В. Абросимов, Б.А. Дворкин // Геопрофи. – М., 2009. - №5. - С. 40-45.
29. Шабанов, В.В., Маркин, В.Н. Ведение мониторинга водных объектов в современных условиях: монография / В.В. Шабанов, В.Н. Маркин. – М. : РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. — 151 с.
30. Румянцев, В.А., Трапезников, Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов / В.А. Румянцев, Ю.А. Трапезников. – СПб. : Наука, 2008. – 152 с.
31. Румянцев, В.А., Ефимова, Л.К., Голицин, Г.С., Хон, В.Ч., Лыскова, У.С. Моделирование температурно-влажностного режима водосбора Ладожского озера / В.А. Румянцев [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – М. : Наука, 2007. – №1. – С. 130-135.
32. Кондратьев, С.А., Казьмина, М.В., Шмакова, М.В., Маркова, Е.Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты / С.А. Кондратьев [и др.] // Региональная экология. – СПб., 2011. – №3-4. – С. 50-59.
33. Чичкова, Е.Ф., Минаков, Е.П. Мониторинг Финского залива на основе спутниковой информации / Е.Ф. Чичкова, Е.П. Минаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2010. – том 7, номер 3. – С. 208-212.
34. Румянцев, В.А., Позняков, Ш.Р., Уличев, В.И., Чичкова, Е.Ф., Рыжиков, Д.М. Оценка изменчивости береговой линии Цимлянского водохранилища и озера Ильмень по данным космического зондирования / В.А. Румянцев [и др.] // Исследование Земли из космоса. – М. : Наука, 2017. - №1. – С. 35-43.
35. Тимофеев, А.С., Рыжиков, Д.М., Спиридонова, Е.С., Викторов, С.В. Объекты накопленного экологического ущерба в береговой зоне Финского залива (опыт использо-

вания спутниковых изображений сверхвысокого пространственного разрешения в полевых работах) / А.С. Тимофеев [и др.] // Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов, студентов и преподавателей Шестой молодежной экологической конференции «Северная пальмира», 3-4 декабря 2014 г., СПб. – СПб. : НИЦЭБ РАН, 2015. - С. 133-135.

36. Rummyantsev, V.A., Pozdnyakov, Sh.R., Ulichev, V.I., Chichkova, E.F., Ryzhikov, D.M. Evaluation of the Variability of the Shoreline of the Tsimlyansk Reservoir and Lake Ilmen according to Space Sounding Data / V.A. Rummyantsev [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2017. - №9. - Pp. 1042-1049.

37. Малинников, В.А., Стеценко, А.Ф., Алтынов, А.Е., Попов, С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами: учебное пособие для студентов вузов / В.А. Малинников [и др.] – М. : МИИГАиК, 2008. – 145 с.

38. Алексеев, Г.В., Данилов, А.И., Катцов, В.М., Кузьмина, С.И., Иванов, Н.Е. Изменения площади морских льдов северного полушария в XX в XXI веках по данным наблюдений и моделирования / Г.В. Алексеев [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – М. : Наука, 2009. – том 45, № 6. – С. 723-735.

39. Александров, В.Ю. Спутниковый радиолокационный мониторинг морского ледяного покрова : дис. ... док. ф.-м. наук : 25.00.28 / Александров Виталий Юрьевич. – СПб., 2010. - 349 с.

40. Аншаков, Г.П., Журавель, Ю.Н., Ращупкин, А.В. Использование мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли для автоматизированного мониторинга рек и водоемов в весенний период / Г.П. Аншаков [и др.] // *Компьютерная оптика*. – 2015. – том 39, №2. – С. 224-233.

41. Мателенок, И.В. Мониторинг мерзлых грунтов Арктики спутниковым СВЧ радиометрическим методом : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.11.13 / Мателенок Игорь Владимирович. – СПб., 2015. - 22 с.

42. Маркс А. Мониторинг лесов с помощью группировки спутников RapidEye / А. Маркс // *Геоматика*. – М. : ООО «Совзонд», 2011. - №3 (12). – С. 58-66.

43. ДЗЗ для экологических задач. Часть 2: Леса [Электронный ресурс] : GIS-Lab. - Режим доступа : http://wiki.gis-lab.ru/w/ДЗЗ_для_экологических_задач_Часть_2:_Леса - Дата обращения: 19.09.2016. – язык русский.

44. Копылов, В.Н., Кочергин, Г.А., Полищук, Ю.М., Хамедов, В.А. Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования / В.Н. Копылов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2009. – выпуск 6, том 1. – С. 33-41.

45. Чухланцев, А.А., Саворский, В.П. Задачи дистанционного зондирования лесов при изучении глобальных климатических изменений / А.А. Чухланцев, В.П. Саворский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2011. – том 8, номер 2. – С. 246-256.

46. Алипбеки, О.А., Мырзагалиев, Т.М. Контроль и мониторинг изменений инфраструктуры города Астаны по космическим данным ДЗЗ со спутника KazEOSat-1 / О.А. Алипбеки, Т.М. Мырзагалиев // Геоматика. – М. : ООО «Совзонд», 2016. - №1. – С. 55-58.

47. Городское хозяйство (муниципальное управление) [Электронный ресурс] : Официальный сайт Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы» - Режим доступа : URL: http://www.ntsomz.ru/for_clients/themat_ip/gorod - Дата обращения: 01.09.2016. – язык русский.

48. Google Earth [Электронный ресурс] : Google Earth - Режим доступа : <https://earth.google.com/web/> - Дата обращения: 19.09.2016. – язык русский.

49. Яндекс.Карты [Электронный ресурс] : Яндекс - Режим доступа : <https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?ll=30.315868%2C59.939095&z=11&l=sat> - Дата обращения: 19.09.2016. – язык русский.

50. Wikimapia [Электронный ресурс] : Wikimapia - Режим доступа : wikimapia.org/ - Дата обращения: 19.09.2016. – язык русский.

51. Болсуновский, М.А. Данные ДЗЗ геопространственная основа для решения задач в области кадастра [Электронный ресурс] / М.А. Болсуновский : ГИС-Ассоциация - Режим доступа : <http://www.gisa.ru/49529.html> - Дата обращения: 02.02.2017. – язык русский.

52. Кононов, В. Марков, В. Данные дистанционного зондирования Земли как источник информации для решения задач землеустройства и кадастра [Электронный ресурс] / В. Кононов, В. Марков : Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН - Режим доступа : <http://loi.sssc.ru/gis/RS/chapter102.html> - Дата обращения: 02.02.2017. – язык русский.

53. Кучейко, А. Обилие долгостроя при скромных результатах на орбите [Электронный ресурс] / А. Кучейко : Газета.RU - Режим доступа : https://www.gazeta.ru/science/2013/02/27_a_4990217.shtml - Дата обращения: 02.02.2017. – язык русский.

54. Лавров, В.Н. Аналитический обзор космических программ ДЗЗ России и зарубежных стран [Электронный ресурс] / В.Н. Лавров : ГК “Иннотер” - Режим доступа : <https://innoter.com/scientific-articles/1092> - Дата обращения: 19.09.2016. – язык русский.

55. EarthExplorer [Электронный ресурс] : USGS - Режим доступа : <https://earthexplorer.usgs.gov/> - Дата обращения: 19.09.2016. – язык английский.

56. MODIS Atmosphere [Электронный ресурс] : NASA - Режим доступа : https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/IMAGES/index_myd021km.html - Дата обращения: 19.09.2016. – язык английский.

57. Наблюдение искусственных спутников Земли [Электронный ресурс] : Портал BelAstro.Net - Режим доступа : <http://www.sat.belastro.net/index.php> - Дата обращения: 19.09.2016. – язык русский.

58. Дворкин, Б.А. Европейская программа GMES и перспективная группировка спутников ДЗЗ Sentinel [Электронный ресурс] / Б.А. Дворкин : Геоматика - Режим доступа : <http://geomatica.ru/clauses/276/> - Дата обращения: 02.02.2017. – язык русский.

59. Рис, У.Г. Основы дистанционного зондирования / У.Г. Рис. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.

60. Дистанционное зондирование Земли при эколого-геологических исследованиях [Электронный ресурс] : Геологический факультет ВГУ - Режим доступа : <http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/4Graduate/RemoteSensing/Lecture03.pdf> - Дата обращения: 02.02.2017. – язык русский.

61. Методы дистанционного зондирования Земли при решении природоресурсных задач. Справочник / Главные редакторы А.Ф. Морозов, А.В. Перцов. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 132 с.

62. Андрианов, В. Свойства данных дистанционного зондирования [Электронный ресурс] / В. Андрианов // Arcreview. Современные геоинформационные технологии. – 2001. - №2 (17). - Режим доступа: http://loi.sgcc.ru/gis/dataplus/arcrev/Number_17/3_Svoistva.htm - Дата обращения: 10.06.2015. - язык русский.

63. Rose, G. Pan Sharpening [Электронный ресурс] / G. Rose : Imstrat Corporation - Режим доступа : <http://www.imstrat.ca/uploads/files/brochures/pansharpening.pdf> - Дата обращения: 10.06.2015. - язык английский.

64. Strait, M. Evaluation of pan-sharpening methods [Электронный ресурс] / M. Strait, S. Rahmani, D. Markurjev : University of California Department of Mathematics - Режим доступа: http://www.math.ucla.edu/~wittman/reu2008/Reports/pan_report.pdf - Дата обращения 10.06.2015 - язык английский.

65. Padwick, C. WorldView-2 pan-sharpening [Электронный ресурс] / С. Padwick, М. Deshkevich, F. Facifici, S. Smallwood // ASPRS 2010 annual conference. - San Diego, 2010. - Режим доступа : <http://info.asprs.org/publications/proceedings/sandiego2010/sandiego10/Padwick.pdf> - Дата обращения 10.06.2015 - язык английский.
66. Lillesand, Т.М., Kiefer, R.W. Remote sensing and image interpretation / Т.М. Lillesand, R.W. Kiefer. – N.Y. : John Wiley and Sons, Inc. 2014. – 704 p.
67. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // Серия: Мир цифровой обработки. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
68. Васмут, А.С. Автоматизация и математические методы в картосоставлении / А.С. Васмут, Л.М. Бугаевский, А.М. Портнов. - М. : Недра, 1991. – 390 с.
69. Сойфер, В.А. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. - 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
70. Мирошниченко, С.Ю. Методы и средства обработки цифровых аэрокосмических изображений объектов промышленности для создания тематических слоев геопространственной информации : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.01 / Мирошниченко Сергей Юрьевич. – Курск, 2009. – 18 с.
71. Претт, У. Цифровая обработка изображений: в 2 т. / У. Претт; [пер. с англ. Д.С. Лебедева] – М. : Мир, 1982. – 2 т.
72. Виноградов, А.Н., Калугин, Ф.В., Недев, М.Д., Погодин, С.В., Талалаев, А.А., Тищенко, И.П., Фраленко, В.П., Хачумов, В.М. Выделение и распознавание локальных объектов на аэрокосмических снимках / А.Н. Виноградов [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. М. : Научтехлитиздат, 2007. - №9. – С. 39-45.
73. О ДЗЗ [Электронный ресурс] : GEOINFORM.UZ – Режим доступа : http://geoinform.uz/dzz/o_dzz - Дата обращения 14.06.2015 - язык русский.
74. Юдаев, Б.Н. Теплопередача: учебник для вузов / Б.Н. Юдаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1981. – 319 с.
75. Шухостанов, В.К. Физические основы дистанционного зондирования техносферы из космоса / В.К. Шухостанов, А.Г. Цыбанов, Л.А. Ведешин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2004. – выпуск 1, том 1. – С. 374-380.
76. Дэйвис, Ш.М. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М. Дэйвис, Д.А. Ландгребе, Т.Л. Филипс и др.; [пер. с англ.] – М. : Недра, 1983. – 415 с.
77. Кондратьев, К.Я., Федченко, Н.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности / К.Я. Кондратьев, Н.П. Федченко – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 216 с.

78. Малинников, В.А., Стеценко, А.Ф., Алтынов, А.Е., Попов, С.М. Спектрометрирование аэроландшафта: учебное пособие для студентов / В.А. Малинников [и др.]. – М. : Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2008. – 120 с.

79. Кринов, Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Е.Л. Кринов ; АН СССР, Лаб. аэрометодов. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1947. – 270 с.

80. Dinguirard M., Slater, P.N. Calibration of Space-Multispectral Imaging Sensors: A Review / M. Dinguirard, P.N. Slater // Remote Sensing of Environment. – 1999. – Volume 68, Issue 3, June. – Pp. 194–205.

81. Атмосферная коррекция по методу DOS [Электронный ресурс] : GIS-Lab. - Режим доступа : <http://gis-lab.info/qa/atcorr-dos.html> - Дата обращения: 29.09.2016. – язык русский.

82. Cui, L., Li, G., Ren, H., He, L., Liao, H., Ouyang, N., Zhang Y. Assessment of atmospheric correction methods for historical Landsat TM images in the coastal zone: A case study in Jiangsu, China / L. Cui [et al.] // European Journal of Remote Sensing. – 2014. – Volume 47. – Pp. 701-716.

83. RapidEye™ Imagery Product Specifications [Электронный ресурс] : Planet Labs Inc. - Режим доступа : <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications.pdf> - Дата обращения: 15.05.2016. – язык английский.

84. Григорьев, А.Н. Метод сокращения избыточности данных дистанционного зондирования из космоса / А.Н. Григорьев, Е.И. Шабиков, А.Н. Дементьев, А.А. Романов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – СПб, 2016. - Т. 59, № 1. - С. 38-44.

85. SPEAR pan sharpening [Электронный ресурс] : Harris Geospatial Solutions, Inc. - Режим доступа : <http://www.exelisvis.com/docs/SPEARPanSharpening.html> - Дата обращения: 22.06.2015. - язык английский.

86. Лабутина, И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебное пособие для студентов вузов / И.А. Лабутина. – М. : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

87. Липилин, Д.А. Особенности дешифрирования свалок на территории Краснодарского края по материалам спутниковых снимков (методика и результаты) / Д.А. Липилин // Географические исследования Краснодарского края. – Краснодар, 2012. - Вып.7. – С. 243–250.

88. Погорелов, А.В. Опыт космического мониторинга свалок на территории Краснодарского края / А.В. Погорелов, С.В. Дулепа, Д.А. Липилин // Геоматика. - М. : ООО «Совзонд», 2013. - №.4. - С. 64–71.

89. Гарифзянов, Р.Д. Идентификация и оценка экологического состояния территорий размещения отходов методом дешифрирования космических снимков / Р.Д. Гарифзянов, Г.М. Батракова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – Пермь, 2014. - №3. – С. 86–95.

90. Бычкова, И.А. Спутниковые методы обнаружения опасных ледяных образований / И.А. Бычкова, Н.Ю. Захваткина // Применение космических технологий для развития арктических регионов: сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. - С. 98-99.

91. Базанов, В.А. Опыт использования ДЗЗ при проведении мониторинга природных экосистем в районах добычи углеводородного сырья в северной части западной Сибири / В.А. Базанов, А.Е. Березин, А.А. Скугарев, Т.А. Рыбина // Применение космических технологий для развития арктических регионов: сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. – С. 176-177.

92. Рыжиков, Д.М. Автоматизация процессов дешифрирования аэрокосмических снимков / Д.М. Рыжиков // Информационные технологии в области науки и техники: материалы X открытой научно-практической конференции учащихся, студентов и аспирантов. – СПб. : ГБНОУ «СПБ ГДТЮ», 2012. – С. 54-56.

93. Рыжиков, Д.М. Автоматизация процессов дешифрирования аэрокосмических снимков в ERDAS Imagine / Д.М. Рыжиков // Сборник тезисов докладов Десятой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2012. – С. 63.

94. Рыжиков Д.М. Тематическое дешифрирование многоспектральных космических снимков Земли с применением моделей наземных объектов / Д.М. Рыжиков // Информационные технологии в области науки и техники: материалы XIII открытой научно-практической конференции учащихся, студентов и аспирантов. – СПб. : ГБНОУ «СПБ ГДТЮ», 2015. – С. 53-56.

95. Чичкова, Е.Ф. Банк данных диагностических признаков для обнаружения по аэрокосмической информации опасных геологических, природных и природно-техногенных процессов / Е.Ф. Чичкова, В.В. Зайцев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // Сборник тезисов докладов Тринадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2015. - С. 144.

96. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.

97. Токарева, О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О.С. Токарева. – Томск : Изд-во Томского Политехнического университета, 2010. – 148 с.

98. Richter, R., Schlöpfer, D. Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3). User Guide [Электронный ресурс] : / R. Richter, D. Schlöpfer – ReSe Applications, 2016. -Version 9.0.2. - Режим доступа : http://www.rese.ch/pdf/atcor3_manual.pdf - Дата обращения: 08.05.2015. - язык английский.

99. NRCGIT Topocorrection. Руководство пользователя [Электронный ресурс] : Лаборатория ГИТ и ДЗ, 2009. - Режим доступа : http://www.nrcgit.ru/topocorr/help_rus.pdf - Дата обращения: 08.06.2015. - язык русский.

100. Первичная обработка: Канопус-В, БКА [Электронный ресурс] : Центр инновационных технологий. – Режим доступа : http://www.novacenter.ru/cmsms/about-ims/capabilities/primary-processing/Канopus_ВКА - Дата обращения: 08.06.2015. - язык русский.

101. ERDAS Imagine. Практическое руководство Tour GuidesTM. – Норкросс, Джорджия, 2005. – 707 с.

102. ENVI User's Guide [Электронный ресурс] : Laboratorio De Tectónica Andina. – Режим доступа : http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf - Дата обращения: 08.06.2015. - язык английский.

103. Введение в практическое использование свободной ГИС GRASS 6.0 [Электронный ресурс] : GIS-Lab. – Режим доступа : http://gis-lab.info/docs/grass/tutorial60/gdf_grass60_v1.2_ru.pdf - Дата обращения: 08.06.2015. - язык русский.

104. Хименко, В.И., Охтилев, М.Ю., Ключарев, А.А., Матяш, В.А. Анализ информативных признаков в задачах обработки данных аэрокосмического мониторинга / В.И. Хименко [и др.] // Информационно-управляющие системы. – СПб. : СПбГУАП, 2017. - № 2. - С. 2–12.

105. Васильев, В.И. Распознающие системы: справочник / В.И. Васильев. – Киев : Наукова думка, 1983. – 424 с.

106. Потапов, А.С. Распознавание образов и машинное восприятие / А.С. Потапов. – СПб. : Политехника, 2007. – 548 с.

107. Роджерс, Д. Алгоритмические основы машинной графики / Д. Рождерс; [пер. с англ. С.А. Вичеса, Г.В. Олохтоновой, П.А. Монахова]; под ред. Ю.М. Банковского, В.А. Галактионова. – М. : Мир, 1989. – 512 с.

108. Baldridge, A.M., Hook, S.J., Grove, C.I., Rivera, G. The ASTER Spectral Library Version 2.0 / A.M. Baldrige [et al.] // Remote Sensing of Environment. - 2009. - Volume 113. - Pp. 711-715.

109. Рыжиков, Д.М. Автоматизация дешифрирования космических снимков по эталонному спектральному образу лиственного леса / Д.М. Рыжиков // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: В 3 ч. Ч. II. Технические науки - СПб. : ГУАП, 2015. - С. 292-297.

110. Григорьев, А.Н., Шилин, Б.В. Анализ сезонных изменений спектральных характеристик компонентов ландшафта по данным космического видеоспектрометра Hyperion / А.Н. Григорьев, Б.В. Шилин // Оптический журнал. – СПб. : Университет ИТМО, 2013. – том 80, №6. – С. 43-47.

111. USGS Digital Spectral Library 06 [Электронный ресурс] : USGS. - Режим доступа : <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/> - Дата обращения: 03.06.2015. – язык английский.

112. Дубинин, М. Спектры отражения природных объектов – база данных [Электронный ресурс] / М. Дубинин. - 2010 : GIS-Lab. - Режим доступа : <http://gislab.info/projects/spectra/> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

113. Фазы вегетации однолетних и многолетних растений [Электронный ресурс] : Зооинженерный факультет МСХА. Неофициальный сайт. - Режим доступа : <http://www.activestudy.info/fazy-vegetacii-odnoletnix-i-mnogoletnix-rastenij/> - Дата обращения: 15.06.2015. – язык русский.

114. Фенологические фазы [Электронный ресурс] : Зооинженерный факультет МСХА. Неофициальный сайт. - Режим доступа : <http://www.activestudy.info/fenologicheskie-fazy/> - Дата обращения: 15.06.2015. – язык русский.

115. Попович, Ф.Я. Советы огородникам / Ф.Я. Попович, Я.П. Ребрик. - 5-е изд., доп. - Киев : Урожай, 1964. - 298 с.

116. Чапурский, Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм / Л.И. Чапурский. – Л. : МО СССР, 1986. – Ч.1. – 160 с.

117. Григорьева, О.В. Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем / О.В. Григорьева, Л.И. Чапурский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2012. – том 9, номер 3. - С. 18-25.

118. Григорьева, О.В. База данных для фоноцелевого информационного обеспечения систем дистанционных исследований, использующая ГИС-технологии / О.В. Григорьева, А.В. Марков, А.Г. Саидов, Л.И. Чапурский // Труды II Всероссийской

научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – СПб., 2012. – Том 1: сб. статей. – С. 64-69.

119. Григорьев, А.Н. Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультивременных данных космической гиперспектральной съемки / А.Н. Григорьев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2014. – том 11, номер 2. - С. 175-184.

120. Bhattachary, N., Quackenbush, L.J., Calandra, L., Im, J., Teale, S. Spectral analysis of scotch pine infested by sirex noctilio [Электронный ресурс] / N. Bhattachary [et al.] // ASPRS 2011 Annual Conference, Milwaukee, 2011. – Режим доступа : <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/Milwaukee2011/files/Bhattacharyai.pdf> - Дата обращения: 08.06.2015. - язык английский.

121. Григорьева, О.В. Автоматизированная спектрально-пространственная идентификация нарушений лесных массивов горящими и вырубками по видеоспектральным данным / О.В. Григорьева, В.В. Терентьева, Д.В. Жуков [и др.] // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – СПб., 2012. – Том 2: сб. статей. – С. 168-173.

122. Кашкин, В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учебное пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.

123. Мустафин, С., Зейнуллина, А.А. Выявление изменений при мониторинге сельскохозяйственных территорий [Электронный ресурс] / С. Мустафин, А.А. Зейнуллина // II Международная конференция «Геоинформатика: технологии, научные проекты». - Барнаул, 2010. - Режим доступа : <http://conf.nsc.ru/GeoIn-2010/reportview/23079> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

124. Островский, Э.А. ПО IDIMA – неадаптивная классификация объектов по данным ДЗЗ / Э.А. Островский, С.В. Румянцев, В.А. Фадеев // Геопрофи. – М., 2012. - №1. - С. 12-17.

125. Fisher, R., Perkins, S., Walker, A., Wolfart, E. Classification [Электронный ресурс] / R. Fisher [et al.] – 2003. - Режим доступа : <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/NIPR2/classify.htm> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык английский

126. Wacker, A.G., Landgrebe, D.A. Minimum Distance Classification in Remote Sensing / A.G. Wacker, D.A. Landgrebe. – Purdue University, Lafayette, Indiana : The Laboratory for Application of Remote Sensing, 1972. – 27 p.

127. Aelst, V. Mahalanobis Distance [Электронный ресурс] / V. Aelst : Classification . - Режим доступа : http://classification.sicyon.com/References/M_distance.pdf - Дата обращения: 15.06.2015. – язык английский.

128. Гулевич, С.П., Шевченко, Р.А., Прядкин, С.П., Веселов, Ю.Г. Методика селекции признаков классификации в задачах распознавания образов сложных пространственных объектов [Электронный ресурс] / С.П. Гулевич [и др.] – М. : Эл. науч.-тех. изд-е Наука и Образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. - Режим доступа : <http://technomag.bmstu.ru/doc/316296.html> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

129. Рыжиков, Д.М. Формирование исходных данных для расчета биогенной нагрузки на акватории по мультиспектральным спутниковым снимкам / Д.М. Рыжиков // Информационные технологии в области науки и техники: материалы XIV открытой научно-практической конференции учащихся, студентов и аспирантов. – СПб. : ГБНОУ «СПБ ГДТЮ», 2016. - С. 63-66.

130. Васильев, К.К. Методы обработки сигналов: учебное пособие / К.К. Васильев. – Ульяновск, 2001. – 80 с.

131. Володин, И.Н. Лекции по теории вероятностей и математической статистике / И.Н. Володин. – Казань : Издательство Казанского государственного университета, 2000. - 262 с.

132. Жирин, В.М. Оценка возможностей дешифрирования лесообразующих парод по космическим снимкам IKONOS / В.М. Жирин, С.В. Князева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2009. – Выпуск 6, том 2. - С. 373-379.

133. Борзов, С.М., Потатуркин, О.И. Классификация типов растительного покрова по гиперспектральным данным дистанционного зондирования Земли / С.М. Борзов, О.И. Потатуркин // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. – Новосибирск, 2014. - Т. 12, вып. 4. - С. 13–22.

134. Лабутина, И.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: методическое пособие / И.А. Лабутина, Е.А. Балдина; Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона». – М., 2011. – 88 с.

135. Рубанов, К.А. Перспективные методы тематической обработки материалов дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] / К.А. Рубанов // Молодёжь и наука: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. — Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2012. — Режим досту-

па : <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section12.html> - Дата обращения: 04.06.2015. - язык русский.

136. Лавриненко, А.А. Методы, алгоритмы и системы обработки растровых аэрокосмических изображений объектов дорожной сети : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.01 / Лавриненко Анна Анександровна. – Курск, 2014. – 24 с.

137. Зимичев, Е.А. Пространственная классификация гиперспектральных изображений с использованием метода кластеризации K-Means++ / Е.А. Зимичев, Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович. // Компьютерная оптика. – 2014. – том 38, №2. - С. 281-286.

138. Воронцов, К.В. Лекции по методу опорных векторов [Электронный ресурс] / К.В. Воронцов. – М. : ВЦ РАН, 2007. Режим доступа : <http://www.ccas.ru/voron/download/SVM.pdf> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

139. Лекция 10: Методы классификации и прогнозирования. Метод опорных векторов. Метод "ближайшего соседа". Байесовская классификация [Электронный ресурс] : НОУ «ИНТУИТ». - Режим доступа : <http://www.intuit.ru/studies/courses/6/6/lecture/176> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

140. Метод опорных векторов – Supported Vector Machine (SVM) [Электронный ресурс] : Портал Знаний. Глобальный интеллектуальный ресурс. - Режим доступа : <http://www.statistica.ru/branches-maths/metod-opornykh-vektorov-supported-vector-machine-svm/> - Дата обращения: 15.06.2015. – язык русский.

141. Дружков, П.Н., Золотых, Н.Ю., Половинкин, А.Н. Машина опорных векторов [Электронный ресурс] / П.Н. Дружков [и др.] – Н.Новгород, 2013. - Режим доступа : <http://www.uic.unn.ru/~zny/ml/Labs/R/lab4.pdf> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

142. Дубинин, М. Классификация данных ДЗЗ, используя метод опорных векторов и imageSVM [Электронный ресурс] / М. Дубинин. – 2010 : GIS-Lab. - Режим доступа : <http://gis-lab.info/qa/imagesvm.html> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

143. Потатуркин, О.И., Борзов, С.М. Обработка гиперспектральных спутниковых изображений при исследовании антропогенных и природных объектов [Электронный ресурс] / О.И. Потатуркин, С.М. Борзов. // Тезисы XV Российской конференции с международным участием "Распределенные информационно-вычислительные ресурсы" (DICR-2014). – Новосибирск, 2014. - Режим доступа : <http://conf.ict.nsc.ru/dicr2014/ru/reportview/248576> - Дата обращения: 15.06.2015. - язык русский.

144. Куссуль, Н.Н. Интеллектуальные вычисления в задачах обработки данных наблюдения Земли / Н.Н. Куссуль, А.Ю. Шелестов, С.В. Скакун, А.Н. Кравченко. – Киев : Наукова думка, 2007. – 196 с.

145. Каширина, И.Л. Нейросетевые технологии / И.Л. Каширина. – Воронеж : Издательско-типографский центр Воронежского государственного университета, 2008. – 72 с.

146. Bischof, H. Multispectral classification of Landsat images using neural networks / H. Bischof, W. Schneider, A.J. Pinz // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – 30, No 3. – Pp. 482-490.

147. Dawson, M.S. Neural networks and their applications to parameter retrieval and classification / M.S. Dawson // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1993. – Pp. 6-14.

148. Carpenter, G.A. Self-organizing information fusing and hierarchical knowledge discovery: a new framework using ARTMAP neural network / G.A. Carpenter // Neural networks. – 2005. – №18. – Pp. 287-295.

149. Hwang, J.N. Robust construction neural networks for classification of remotely-sensed data / J.N. Hwang // Proc. of world congress on neural networks. – 1993. – №4. – Pp. 580-584.

150. Roli, F., Serpico, S.B., Vernazza, G. Neural networks for classification of remotely-sensed data / F. Roli, S.B. Serpico, G. Vernazza // Fuzzy logic and neural networks handbook. – McGraw-Hills, 1996. – Pp. 1501-1528.

151. Blaschke, T. Object based Image analysis for remote sensing / T. Blaschke // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2010. – Volume 65, Issue 1. – Pp. 2-16.

152. Романов, А.А. Эффективность непараметрических классификаторов в условиях лимитированной обучающей выборки / А.А. Романов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. - Красноярск, 2012. - №5. - С. 495-506.

153. Karagiannis, G. Semi-automatic object-based building change detection in suburban areas from Quickbird imagery using the ERDAS Imagine Objective software / G. Karagiannis, D. Argialas // 32nd European Association of Remote Sensing Laboratories Symposium (EARSel 2012). Advances in Geosciences. – Mykonos Island, Greece, 2012. - Pp. 594–607.

154. Wells, W.K. Object-based segmentation and classification of one meter imagery for use in forest management plans [Электронный ресурс] / W.K. Wells // All Graduate Theses and Dissertations – Logan, Utah, 2010. – Режим доступа : <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1649&context=etd> - Дата обращения: 08.06.2015. – язык английский.

155. Moskal, L.M. Monitoring urban tree cover using object-based image analysis and public domain remotely sensed data / L.M. Moskal, D.M. Styers, M. Halabiscy // *Remote Sensing*. – 2011. - №3(10). – Pp. 2243-2262.
156. Frohn, R.C. Satellite remote sensing of isolated wetlands using object-oriented classification of LandSat-7 data / R.C. Frohn, M. Reif, C. Lane, B. Autrey // *WETLANDS*. – 2009. - Vol. 29, No. 3. - Pp. 931-941.
157. Guo, Q. An object-based classification approach in mapping tree mortality using high spatial resolution imagery / Q. Guo, M. Kelly, P. Gong, D. Liu // *GIScience & Remote Sensing*. – 2007. - 44, No. 1. – Pp. 24-47.
158. Frohn, R.C. Segmentation and object-oriented classification of wetlands in a karst Florida landscape using multi-season LandSat-7 ETM+ imagery / R.C. Frohn, B. Autrey, C. Lane, M. Reif // *International journal of remote sensing*. – 2011. - Vol. 32. - Pp. 1471-1489.
159. Kampouraki, M. Opportunities and limitations of object based image analysis for detecting urban impervious and vegetated surfaces using true-colour aerial photography / M. Kampouraki, G.A. Wood, T.R. Brewer // *Object-Based Image Analysis-Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. - Berlin, 2008. – Pp. 555–569.
160. Zhou, W. Object-based land cover classification and change analysis in the Baltimore Metropolitan area using multitemporal high resolution remote sensing data / W. Zhou, A. Troy, M. Grove // *Sensors*. - 2008. – 8(3). – Pp. 1613-1636.
161. Addink, E.A. The importance of scale in object-based mapping of vegetation parameters with hyperspectral imagery / E.A. Addink, S.M. de Jong, E.J. Pebesma // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. - 2003. - Vol. 73, No.8. - Pp. 905–912.
162. Wang, L. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery / L. Wang, W.P. Souza, P. Gong // *International journal of remote sensing*. – 2004. - Vol. 25, No. 4. - Pp. 5655-5668.
163. Dingle Robertson, L., King, D. Comparison of pixel- and object-based classification in land cover change mapping / L. Dingle Robertson, D. King // *International Journal of Remote Sensing*. - 2011. – Vol. 32. – Pp. 1505-1529.
164. Романов, А.А. Сравнение методов объектно-ориентированной и нейросетевой классификации данных дистанционного зондирования Земли на основе материалов систем Landsat-5 и Orbview-3 / А.А. Романов, К.А. Рубанов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2012. – том 9, номер 4. - С. 29-36.
165. System and methods for image segmentation in n-dimensional space : пат. US2007058865 (A1) Соединенные Штаты Америки, G06K9/34; G06K9/62 / Kang L., Xiao-

dong W., Danny Z., Milan S. ; заявитель и патентообладатель The University of Iowa Research Foundation, University of Notre Dame Du Lac ; опубл. 15.03.07.

166. System and methods for image segmentation in N-dimensional space : пат. US2008317308 (A1) Соединенные Штаты Америки, G06K9/00 / Xiaodong W., Mona G., Abramoff M. D., Milan S. ; заявитель и патентообладатель University Of Iowa Research Foundation ; опубл. 25.12.08.

167. System and methods for image segmentation in N-dimensional space : пат. US2009136103 (A1) Соединенные Штаты Америки, G06K9/00; G06K9/34 / Milan S., Xiaodong W., Yin Y., Xiangmin Y. ; заявитель и патентообладатель The University Of Iowa Research Foundation ; опубл. 28.05.09.

168. High-spectrum image segmentation method based on pixel space information : пат. CN101667291 (A) Китай, G06T7/00 / Li Z., Weida Z., Hongjie Z., Zhe Y., Licheng J. ; заявитель и патентообладатель Xidian University ; опубл. 10.03.10.

169. Iris image segmentation algorithm based on nonlinear dimension space : пат. CN103198484 (A) Китай, G06K9/00; G06T7/00 / Honglin W., Min H. ; заявитель и патентообладатель Shandong Normal University ; опубл. 10.07.13.

170. TRIMBLE eCognition. Developer Fundamentals. Trainings Overview [Электронный ресурс] : Trimble Geospatial. - Режим доступа : http://www.ecognition.com/sites/default/files/LearnMore_%20eCognitionFundamentals_030615.pdf - Дата обращения: 09.06.2015. – язык английский.

171. Imagine Objective. The future of feature extraction, update & change mapping. Product Brochure [Электронный ресурс] : Hexagon Geospatial. - Режим доступа : <https://p.widencdn.net/4vx6wz> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык английский.

172. Михеева, А.И., Тутубалина, О.В., Зимин, М.В., Голубева, Е.И. Методика субпиксельной классификации растительности экотона «тундра-тайга» по космическим изображениям (на примере долины р. Тульок, Хибинские горы) / А.И. Михеева [и др.] // Исследование Земли из космоса. – М. : РАН, 2017. - №1. – С. 24-34.

173. Тишкин, Р.В. Субпиксельная классификация объектов на космических гиперспектральных изображениях / Р.В. Тишкин // Цифровая обработка сигналов. – М., 2012. - №3. – С. 49-51.

174. Фраленко, В.П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли / В.П. Фраленко // Программные системы: теория и приложения. – Веськово, 2014. - №4(22). - С. 19–39.

175. Рыжиков, Д.М. Технология поиска изменений на местности по данным многоспектрального космического мониторинга / Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // Труды II

Всероссийской научной конференции «Проблемы военной геофизики и контроля окружающей среды». – СПб. : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Т.2. - С. 290-295.

176. Григорьев, А.Н. Метод выявления изменений подстилающей поверхности по мультитременным многоспектральным данным при ведении оперативного спутникового мониторинга / А.Н. Григорьев, Д.М. Рыжиков // Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Средства и технологии ДЗЗ из космоса в науке, образовании, бизнесе». — М. : Инженерно-технологический Центр СканЭкс, 2014. — С. 57-63.

177. Мясников, Ф.С. Анализ алгоритмов обнаружения изменений на космических снимках / Ф.С. Мясников // Сборник научных трудов «Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации». – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 66-70.

178. Федосеев, В.А. Исследование методов выявления антропогенных изменений на земной поверхности по последовательности космических снимков высокого разрешения / В.А. Федосеев, Н.В. Чупшев // Компьютерная оптика. – 2012. - том 36, № 2. – С. 279-288.

179. Дубинин, М. Вегетационные индексы [Электронный ресурс] / М. Дубинин. - 2006 : GIS-Lab. - Режим доступа : <http://gis-lab.info/qa/vi.html> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

180. Дубинин, М. NDVI – теория и практика [Электронный ресурс] / М. Дубинин. - 2002 : GIS-Lab. - Режим доступа : <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

181. Astar, G., Greenstone, R. МТРЕ EOS Reference Handbook / G. Alasttar, R. Greenstone. - NASA Goddard Space Center, 1996. – 277 p.

182. Data Processing Levels [Электронный ресурс] : NASA Science. - Режим доступа : <https://science.nasa.gov/earth-science/earth-science-data/data-processing-levels-for-eosdis-data-products/> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык английский.

183. Лупян, Е.А. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли / Е.А. Лупян, В.П. Саворский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2012. - том 9, номер 2. - С. 87-96.

184. Абросимов, А.В., Дворкин, Б.А. Перспективы применения данных дистанционного зондирования Земли из космоса для повышения эффективности сельского хозяйства в России [Электронный ресурс] : Компания «Совзонд». Геоинформационные системы и аэрокосмический мониторинг. – Режим доступа : <https://sovzond.ru/press-center/articles/ers-data-using/214/> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

185. Толчевская, О.Е. Использование данных ДЗЗ из космоса и ГИС-технологий для мониторинга сельскохозяйственных угодий / О.Е. Толчевская // Геопрофи. – М., 2015. - № 4. - С. 16-19.

186. Сельское хозяйство [Электронный ресурс] : Спутники RapidEye. – Режим доступа : <http://www.rapideye-satellite.ru/agriculture.html> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

187. Клещенко, А.Д, Найдина, Т.А. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений в динамических моделях прогнозирования урожая / А.Д. Клещенко, Т.А. Найдина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2011. - том 8, номер 1. - С. 170-177.

188. Сацыперова, И.Ф. Борщевики флоры СССР — новые кормовые растения / И.Ф. Сацыперова. - Л. : Наука, 1984. - 223 с.

189. Методические рекомендации по борьбе с неконтролируемым распространением растений борщевика Сосновского / И.В. Далькэ, И.Ф. Чадин. – Сыктывкар, 2008. – 28 с.

190. Рыжиков, Д.М. Решение комплексных научных и практических задач с применением ДЗЗ / Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // Средства и технологии ДЗЗ из космоса в науке, образовании, бизнесе. – 2014 : СКАНЭКС. – Режим доступа : http://conf-mini.scanex.ru/images/materials/stand/Ryzhikov_Timofeev.pdf - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

191. Рыжиков, Д.М. Детектирование борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования Земли / Д.М. Рыжиков // Информационные технологии в области науки и техники: материалы XII открытой научно-практической конференции учащихся, студентов и аспирантов. – СПб. : ГБНОУ «СПБ ГДТЮ», 2014. - С. 71-75.

192. Рыжиков, Д.М. Технология мониторинга борщевика Сосновского с онлайн геопортальной поддержкой [Электронный ресурс] / Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // материалы 2-ой Международной конференции Дистанционное зондирование Земли – сегодня и завтра. – 2014. - CD-диск.

193. Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С. Технология мониторинга борщевика Сосновского в Ленинградской области с онлайн геопортальной поддержкой [Электронный ресурс] / Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // Тринадцатая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М., 2014. – Режим доступа : http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4639 - Дата обращения: 25.06.2015. – язык русский.

194. Lorencs, A., Mednieks, I., Sinica-Sinavskis, J. Simplified Classification of Multi-spectral Image Fragments / A. Lorencs, I. Mednieks, J. Sinica-Sinavskis // Elektronika Ir Elektrotechnika. – 2014. - vol. 20, №6. – Pp. 136-139.
195. Müllerová, J., Pergla, J., Pyseka P. Remote sensing as a tool for monitoring plant invasions: Testing of effect of data resolution and image classification approach on the detection of a model plant species *Heracleum mantegazzianum* (giant houweed) / J. Müllerová, J. Pergla, P. Pyseka // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2013. - №25. - Pp. 55–65.
196. Landsat Science [Электронный ресурс] : Landsat Science. NASA. – Режим доступа : <https://landsat.gsfc.nasa.gov> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык английский.
197. Sentinel-2 [Электронный ресурс] : Sentinel-2. ESA. – Режим доступа : <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык английский.
198. Спутники RapidEye [Электронный ресурс] : Спутники RapidEye. – Режим доступа : <http://www.rapideye-satellite.ru/satellites.html> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.
199. Научный центр оперативного мониторинга Земли [Электронный ресурс] : Российские космические системы. – Режим доступа : <http://www.ntsomz.ru/> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.
200. Маркс, А. Мониторинг лесов с помощью группировки спутников RapidEye / А. Маркс // Геоматика. - М. : ООО «Совзонд», 2011. - № 3. – С. 58-66.
201. Жиленев, М.Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке / М.Ю. Жиленев // Геоматика. - М. : ООО «Совзонд», 2009. - № 3. - С. 56-64.
202. Родионов, И.Б. Теория систем и системный анализ [Электронный ресурс] / И.Б. Родионов // Лекции и учебные пособия по системному анализу : Виктор Родионов – Режим доступа : <http://victor-safronov.ru/systems-analysis/lectures/rodionov.html> - Дата обращения: 04.06.2015. – язык русский.
203. Григорьев, А.Н., Рыжиков, Д.М. Общая методика и результаты спектрометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320 –1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли / А.Н. Григорьев, Д.М. Рыжиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2018. - том 15, №1. - С. 183-192.
204. Деркачева, А.А., Тутубалина, О.В. Эффективность атмосферных коррекций гиперспектральных снимков Nuregion в регионах с развитым растительным покровом /

А.А. Деркачева, О.В. Тутубалина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2014. - том 11, номер 4. - С. 360–368.

205. Кондратьев, С.А., Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С., Чичкова, Е.Ф. Идентификация типов подстилающей поверхности для оценивания территорий по данным спутниковой съемки LANDSAT-8 на примере водосбора реки Нарвы / С.А. Кондратьев [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. - СПб. : ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. - № 653. - С. 121-125.

206. Чичкова, Е.Ф., Кондратьев, С.А., Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С., Шмакова, М.В. Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогенной нагрузки на Финский залив / Е.Ф. Чичкова [и др.] // Ученые записки Российского Государственного гидрометеорологического университета. - СПб. : РГГМУ, 2016. - №43. - С. 246-254.

207. Кибзун, А.И., Горяинова, Е.Р., Наумов, А.В., Сиротин, А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами / А.И. Кибзун [и др.], учебное пособие. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 224 с.

208. Kaufman, Y.J., Tanre, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS / Y.J. Kaufman, D. Tanre // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – N.Y., 1992. – Pp. 261-270.

209. Jordan, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor / C.F. Jordan // Ecology. – 1969. – vol. 50, №4. - Pp. 663-666.

210. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J.W. Rouse [et al.] // Third ERTS Symposium: Abstracts. - Washington, DC, 1973. - vol. 1. - Pp.309-317.

211. Gao, B-C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B-C. Gao // Remote Sensing of Environment. – 1996. - №58(3). – Pp. 257-266.

212. Рыжиков, Д.М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского / Д.М. Рыжиков // Информационно-управляющие системы. – СПб., 2017. - № 6. - С. 43-51.

213. Дистанционное зондирование и контроль ландшафтных характеристик водохранной зоны и зоны опасных геологических процессов КС «Портовая», КС «Елизаветинская», КС «Волховская», а также Дистанционное Зондирование зоны опасных геологических процессов в полосе трассы ГТС шириной 200м от КС «Волховская» До КС «Портовая» : отчет о научно-исследовательской работе. – СПб., 2012. - Инв.№1184.

214. Площадь Российской Федерации. Площади республик / областей / регионов России [Электронный ресурс] : statdata.ru. – Режим доступа : <http://www.statdata.ru/ploshchad/rossii> - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

215. Григорьев, А.Н., Чичкова, Е.Ф., Рыжиков, Д.М., Тимофеев, А.С. Обработка многоспектральной космической информации высокого пространственного разрешения в программной среде ERDAS Imagine, верификация результатов для Северо-Западного региона РФ / А.Н. Григорьев [и др.] // Сборник тезисов докладов Десятой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2015. - С. 136.

216. Верификация [Электронный ресурс] : Словари и Энциклопедии на Академике. – Режим доступа : http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/198/верификация - Дата обращения: 09.06.2015. – язык русский.

217. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский сельскохозяйственный центр» (филиал по Ленинградской области). Заключение по результатам экспертной комиссии. – Спб., 2015.

218. Май. Весна зелени. Предлетье [Электронный ресурс] : Сезоны года. Общеобразовательный журнал. – Режим доступа : сезоны-года.рф/календарь%20природы%20май.html - Дата обращения: 02.06.2017. – язык русский.

219. Свидетельство № 2014612148 Российская Федерация. Программа расчета индекса NDVI для большинства современных космических систем в среде ERDAS Imagine : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Тимофеев, А.С., Рыжиков, Д.М. ; заявитель и правообладатель ФГАНУ ЦНИИ РТК; заявл. 27.12.2013 ; зарегистр. 20.02.2014.

220. Свидетельство № 2014660511 Российская Федерация. Программа поиска изменений на местности по разновременным мультиспектральным снимкам для заданных типов ландшафта на основе неконтролируемой классификации в среде ERDAS Imagine : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Григорьев, А.Н., Тимофеев, А.С., Рыжиков, Д.М. ; заявитель и правообладатель ФГАНУ ЦНИИ РТК; заявл. 02.07.2014 ; зарегистр. 09.10.2014.

221. Свидетельство № 2014660510 Российская Федерация. Программа поиска изменений на местности по разновременным мультиспектральным снимкам на основе преобразования главных компонент в среде ERDAS Imagine : свидетельство об официальной

регистрации программы для ЭВМ / Григорьев, А.Н., Тимофеев, А.С., Рыжиков, Д.М. ; заявитель и правообладатель ФГАНУ ЦНИИ РТК; заявл. 02.07.2014 ; зарегистр. 09.10.2014.

222. Свидетельство № 2014660509 Российская Федерация. Программа поиска аномальных объектов на фоне однородной подстилающей поверхности по аэрокосмическим снимкам для заданных зон в среде ERDAS Imagine : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Григорьев, А.Н., Тимофеев, А.С., Рыжиков, Д.М. ; заявитель и правообладатель ФГАНУ ЦНИИ РТК; заявл. 02.07.2014 ; зарегистр. 09.10.2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ФАЙЛА ДАННЫХ *.SED PSR-1100 – СОЦВЕТИЕ БС, СТАДИЯ ЦВЕТЕНИЯ

Comment: Memory Slot #0157
 Version: 2.2
 File Name: \\CATALOG\Data\Ryzhikov\PSR-1100\2016_Jul_12\PSR-1100_SN8154449_M0157.sed
 Instrument: PSR-1100_SN8154449
 Detectors: 512,0,0
 Measurement: DIRECT_ENERGY
 Date: 09/28/0228,09/28/0228
 Time: 10:31:02.00,10:38:30.00
 Temperature (C): 25.89,27.42
 Battery Voltage: 8.19,8.17
 Averages: 10,10
 Integration: 3,6
 Dark Mode: AUTO,AUTO
 Foreoptic: LENS4 {RADIANCE}, LENS4 {RADIANCE}
 Radiometric Calibration: RADIANCE
 Units: W/m²/sr/nm
 Wavelength Range: 320,1100
 Latitude: n/a
 Longitude: n/a
 Altitude: n/a
 GPS Time: n/a
 Satellites: n/a
 Calibrated Reference Correction File: none
 Channels: 781
 Columns [3]:

Data:	Rad. (Ref.)	Rad. (Target)
320.0	2.046413E-002	2.790952E-003
321.0	2.200412E-002	2.816732E-003
322.0	2.404535E-002	2.887433E-003
323.0	2.690315E-002	2.980685E-003
324.0	3.017371E-002	3.045543E-003
325.0	3.366272E-002	3.077540E-003
326.0	3.692325E-002	3.121135E-003
327.0	4.006250E-002	3.171225E-003
328.0	4.304008E-002	3.226222E-003
329.0	4.538490E-002	3.268696E-003
330.0	4.711463E-002	3.310527E-003
331.0	4.827240E-002	3.355285E-003
332.0	4.930684E-002	3.387039E-003
333.0	5.044412E-002	3.445668E-003
334.0	5.178351E-002	3.540678E-003
335.0	5.273058E-002	3.554498E-003
336.0	5.422782E-002	3.576057E-003
337.0	5.698292E-002	3.667908E-003
338.0	6.063055E-002	3.718134E-003
339.0	6.409411E-002	3.754367E-003
340.0	6.651897E-002	3.793698E-003
341.0	6.854616E-002	3.826859E-003
342.0	7.009446E-002	3.860460E-003
343.0	7.098955E-002	3.902309E-003
344.0	7.251955E-002	3.924791E-003
345.0	7.449066E-002	3.944085E-003
346.0	7.664019E-002	3.980146E-003
347.0	7.868663E-002	4.057133E-003
348.0	8.083129E-002	4.144729E-003
349.0	8.333909E-002	4.201917E-003
350.0	8.606288E-002	4.262529E-003
351.0	8.883652E-002	4.335326E-003
352.0	9.128532E-002	4.441444E-003
353.0	9.387902E-002	4.521646E-003
354.0	9.581403E-002	4.564421E-003
355.0	9.512589E-002	4.553614E-003
356.0	9.367210E-002	4.549922E-003
357.0	9.254570E-002	4.561267E-003
358.0	9.506209E-002	4.569025E-003
359.0	9.946605E-002	4.601414E-003
360.0	1.048076E-001	4.662675E-003
361.0	1.085445E-001	4.741239E-003
362.0	1.126946E-001	4.837828E-003
363.0	1.178140E-001	4.953220E-003
364.0	1.236566E-001	5.094636E-003

365.0	1.289940E-001	5.221323E-003
366.0	1.332368E-001	5.319479E-003
367.0	1.358585E-001	5.457840E-003
368.0	1.374520E-001	5.594367E-003
369.0	1.384805E-001	5.698843E-003
370.0	1.384783E-001	5.756324E-003
371.0	1.371968E-001	5.763822E-003
372.0	1.344139E-001	5.718353E-003
373.0	1.334927E-001	5.720150E-003
374.0	1.359077E-001	5.746441E-003
375.0	1.437662E-001	5.764405E-003
376.0	1.531286E-001	5.851403E-003
377.0	1.616382E-001	5.964386E-003
378.0	1.656232E-001	6.035911E-003
379.0	1.642556E-001	6.059125E-003
380.0	1.585481E-001	6.057863E-003
381.0	1.504499E-001	6.084538E-003
382.0	1.433891E-001	6.131846E-003
383.0	1.392327E-001	6.225617E-003
384.0	1.426663E-001	6.472530E-003
385.0	1.483650E-001	6.758023E-003
386.0	1.548058E-001	7.048196E-003
387.0	1.604107E-001	7.300008E-003
388.0	1.678200E-001	7.574942E-003
389.0	1.772640E-001	7.876510E-003
390.0	1.819898E-001	8.021941E-003
391.0	1.803797E-001	8.034213E-003
392.0	1.706893E-001	7.909154E-003
393.0	1.664626E-001	7.920134E-003
394.0	1.678882E-001	8.075825E-003
395.0	1.755595E-001	8.389707E-003
396.0	1.850997E-001	8.836436E-003
397.0	1.998733E-001	9.510153E-003
398.0	2.246850E-001	1.054287E-002
399.0	2.472751E-001	1.158563E-002
400.0	2.654268E-001	1.261113E-002
401.0	2.750150E-001	1.358633E-002
402.0	2.790934E-001	1.448098E-002
403.0	2.791552E-001	1.531673E-002
404.0	2.773274E-001	1.612550E-002
405.0	2.756955E-001	1.705270E-002
406.0	2.752502E-001	1.813123E-002
407.0	2.781158E-001	1.934709E-002
408.0	2.815798E-001	2.067722E-002
409.0	2.848960E-001	2.212436E-002
410.0	2.887490E-001	2.373426E-002
411.0	2.935547E-001	2.546325E-002
412.0	2.992622E-001	2.728529E-002
413.0	3.024495E-001	2.917227E-002
414.0	3.043706E-001	3.108833E-002
415.0	3.058896E-001	3.299942E-002
416.0	3.056738E-001	3.494001E-002
417.0	3.045350E-001	3.696942E-002
418.0	3.034508E-001	3.915618E-002
419.0	3.044802E-001	4.160070E-002
420.0	3.063815E-001	4.420627E-002
421.0	3.072163E-001	4.685225E-002
422.0	3.068670E-001	4.936186E-002
423.0	3.057512E-001	5.183237E-002
424.0	3.052474E-001	5.467048E-002
425.0	3.041153E-001	5.739061E-002
426.0	3.017825E-001	5.979262E-002
427.0	2.973289E-001	6.156930E-002
428.0	2.899702E-001	6.279291E-002
429.0	2.804698E-001	6.370752E-002
430.0	2.789365E-001	6.643694E-002
431.0	2.849531E-001	7.085707E-002
432.0	2.993940E-001	7.713351E-002
433.0	3.106366E-001	8.253440E-002
434.0	3.199654E-001	8.752928E-002
435.0	3.278896E-001	9.245527E-002
436.0	3.322832E-001	9.601882E-002
437.0	3.337339E-001	9.863337E-002
438.0	3.319727E-001	1.006726E-001
439.0	3.344408E-001	1.038345E-001
440.0	3.411374E-001	1.080912E-001
441.0	3.510131E-001	1.131888E-001
442.0	3.593041E-001	1.176326E-001

443.0	3.646024E-001	1.209864E-001
444.0	3.663835E-001	1.230434E-001
445.0	3.677887E-001	1.250786E-001
446.0	3.702099E-001	1.276020E-001
447.0	3.763738E-001	1.311421E-001
448.0	3.838925E-001	1.350798E-001
449.0	3.915466E-001	1.390826E-001
450.0	3.963384E-001	1.418343E-001
451.0	3.976326E-001	1.432851E-001
452.0	3.938334E-001	1.430271E-001
453.0	3.916735E-001	1.434361E-001
454.0	3.916745E-001	1.446144E-001
455.0	3.951772E-001	1.469088E-001
456.0	3.987804E-001	1.490701E-001
457.0	4.015865E-001	1.508423E-001
458.0	4.015438E-001	1.516792E-001
459.0	4.024006E-001	1.528540E-001
460.0	4.047606E-001	1.545572E-001
461.0	4.076590E-001	1.563709E-001
462.0	4.091260E-001	1.575400E-001
463.0	4.083016E-001	1.577477E-001
464.0	4.058285E-001	1.574050E-001
465.0	4.027974E-001	1.568803E-001
466.0	4.003169E-001	1.565720E-001
467.0	3.991120E-001	1.566449E-001
468.0	3.986518E-001	1.569070E-001
469.0	3.979673E-001	1.569836E-001
470.0	3.985154E-001	1.575652E-001
471.0	4.002410E-001	1.585861E-001
472.0	4.030011E-001	1.598005E-001
473.0	4.053897E-001	1.608147E-001
474.0	4.070214E-001	1.615164E-001
475.0	4.075186E-001	1.617627E-001
476.0	4.084338E-001	1.621998E-001
477.0	4.104145E-001	1.630918E-001
478.0	4.129326E-001	1.641104E-001
479.0	4.153932E-001	1.650965E-001
480.0	4.173221E-001	1.659167E-001
481.0	4.180432E-001	1.662288E-001
482.0	4.165768E-001	1.656103E-001
483.0	4.111024E-001	1.632510E-001
484.0	4.015754E-001	1.593087E-001
485.0	3.902051E-001	1.547904E-001
486.0	3.819582E-001	1.520877E-001
487.0	3.816630E-001	1.524909E-001
488.0	3.889452E-001	1.557184E-001
489.0	3.965572E-001	1.589350E-001
490.0	4.012742E-001	1.609927E-001
491.0	4.015249E-001	1.613402E-001
492.0	4.017236E-001	1.618649E-001
493.0	4.025572E-001	1.626915E-001
494.0	4.053763E-001	1.642190E-001
495.0	4.068070E-001	1.651165E-001
496.0	4.064499E-001	1.652477E-001
497.0	4.033319E-001	1.642532E-001
498.0	3.991294E-001	1.628186E-001
499.0	3.943986E-001	1.611705E-001
500.0	3.897979E-001	1.595678E-001
501.0	3.863411E-001	1.584582E-001
502.0	3.846310E-001	1.580900E-001
503.0	3.856800E-001	1.587827E-001
504.0	3.880629E-001	1.599747E-001
505.0	3.910911E-001	1.613880E-001
506.0	3.923301E-001	1.620499E-001
507.0	3.923930E-001	1.622703E-001
508.0	3.919944E-001	1.624288E-001
509.0	3.924110E-001	1.628717E-001
510.0	3.932163E-001	1.634231E-001
511.0	3.930715E-001	1.635530E-001
512.0	3.913196E-001	1.630361E-001
513.0	3.878533E-001	1.618254E-001
514.0	3.828802E-001	1.599109E-001
515.0	3.763130E-001	1.573351E-001
516.0	3.685571E-001	1.543173E-001
517.0	3.638753E-001	1.529535E-001
518.0	3.635540E-001	1.534816E-001
519.0	3.699792E-001	1.566130E-001
520.0	3.767433E-001	1.598017E-001

521.0	3.827545E-001	1.626552E-001
522.0	3.862753E-001	1.645628E-001
523.0	3.886743E-001	1.659547E-001
524.0	3.897196E-001	1.667151E-001
525.0	3.862729E-001	1.654972E-001
526.0	3.829473E-001	1.645321E-001
527.0	3.819104E-001	1.648230E-001
528.0	3.860038E-001	1.670741E-001
529.0	3.913489E-001	1.696985E-001
530.0	3.943783E-001	1.711778E-001
531.0	3.933796E-001	1.709798E-001
532.0	3.905023E-001	1.700331E-001
533.0	3.889393E-001	1.697504E-001
534.0	3.891305E-001	1.700841E-001
535.0	3.905621E-001	1.707920E-001
536.0	3.902309E-001	1.706945E-001
537.0	3.886351E-001	1.700232E-001
538.0	3.858189E-001	1.688117E-001
539.0	3.823042E-001	1.673253E-001
540.0	3.793623E-001	1.661216E-001
541.0	3.783974E-001	1.658317E-001
542.0	3.796475E-001	1.664034E-001
543.0	3.819273E-001	1.673509E-001
544.0	3.834810E-001	1.679477E-001
545.0	3.843091E-001	1.682422E-001
546.0	3.843881E-001	1.682372E-001
547.0	3.837427E-001	1.679621E-001
548.0	3.835956E-001	1.679067E-001
549.0	3.844212E-001	1.682580E-001
550.0	3.848973E-001	1.684317E-001
551.0	3.852482E-001	1.685514E-001
552.0	3.855979E-001	1.686940E-001
553.0	3.859375E-001	1.688768E-001
554.0	3.858786E-001	1.688973E-001
555.0	3.846687E-001	1.683328E-001
556.0	3.822402E-001	1.672921E-001
557.0	3.788715E-001	1.659238E-001
558.0	3.760714E-001	1.649216E-001
559.0	3.745768E-001	1.645372E-001
560.0	3.750551E-001	1.650222E-001
561.0	3.761934E-001	1.657713E-001
562.0	3.771793E-001	1.664654E-001
563.0	3.771316E-001	1.667541E-001
564.0	3.761840E-001	1.666777E-001
565.0	3.746620E-001	1.663714E-001
566.0	3.736450E-001	1.663029E-001
567.0	3.720870E-001	1.659397E-001
568.0	3.697823E-001	1.651758E-001
569.0	3.676748E-001	1.645554E-001
570.0	3.666799E-001	1.644560E-001
571.0	3.674700E-001	1.651726E-001
572.0	3.691664E-001	1.661186E-001
573.0	3.706787E-001	1.668914E-001
574.0	3.699569E-001	1.667055E-001
575.0	3.688214E-001	1.663585E-001
576.0	3.676014E-001	1.659962E-001
577.0	3.664262E-001	1.656543E-001
578.0	3.663082E-001	1.658220E-001
579.0	3.676368E-001	1.666785E-001
580.0	3.697684E-001	1.678085E-001
581.0	3.720660E-001	1.689557E-001
582.0	3.739603E-001	1.698797E-001
583.0	3.742330E-001	1.700640E-001
584.0	3.728672E-001	1.695059E-001
585.0	3.703172E-001	1.684351E-001
586.0	3.651789E-001	1.660951E-001
587.0	3.572083E-001	1.623804E-001
588.0	3.487748E-001	1.588332E-001
589.0	3.432683E-001	1.567608E-001
590.0	3.430508E-001	1.571400E-001
591.0	3.454673E-001	1.584746E-001
592.0	3.488712E-001	1.601592E-001
593.0	3.503153E-001	1.610779E-001
594.0	3.513978E-001	1.619189E-001
595.0	3.523642E-001	1.627748E-001
596.0	3.536175E-001	1.637110E-001
597.0	3.547204E-001	1.645942E-001
598.0	3.554474E-001	1.653535E-001

599.0	3.555894E-001	1.657893E-001
600.0	3.555679E-001	1.661535E-001
601.0	3.559959E-001	1.668364E-001
602.0	3.573194E-001	1.679270E-001
603.0	3.592873E-001	1.692741E-001
604.0	3.604669E-001	1.701479E-001
605.0	3.607639E-001	1.705989E-001
606.0	3.600784E-001	1.706090E-001
607.0	3.587540E-001	1.703150E-001
608.0	3.571144E-001	1.698805E-001
609.0	3.554798E-001	1.694741E-001
610.0	3.542750E-001	1.692038E-001
611.0	3.532662E-001	1.689788E-001
612.0	3.516195E-001	1.684848E-001
613.0	3.498922E-001	1.679291E-001
614.0	3.482492E-001	1.673802E-001
615.0	3.467042E-001	1.669338E-001
616.0	3.461345E-001	1.669840E-001
617.0	3.475954E-001	1.680316E-001
618.0	3.494584E-001	1.691459E-001
619.0	3.511568E-001	1.700805E-001
620.0	3.513940E-001	1.703027E-001
621.0	3.503145E-001	1.699237E-001
622.0	3.479596E-001	1.689829E-001
623.0	3.454829E-001	1.680091E-001
624.0	3.431820E-001	1.671117E-001
625.0	3.415160E-001	1.664709E-001
626.0	3.399405E-001	1.658663E-001
627.0	3.384531E-001	1.653164E-001
628.0	3.370510E-001	1.648799E-001
629.0	3.361276E-001	1.646760E-001
630.0	3.358350E-001	1.647558E-001
631.0	3.363696E-001	1.652047E-001
632.0	3.373319E-001	1.658294E-001
633.0	3.383551E-001	1.664469E-001
634.0	3.393403E-001	1.670541E-001
635.0	3.402869E-001	1.676382E-001
636.0	3.413808E-001	1.682517E-001
637.0	3.418354E-001	1.684825E-001
638.0	3.413882E-001	1.681983E-001
639.0	3.401421E-001	1.675790E-001
640.0	3.387313E-001	1.669037E-001
641.0	3.378230E-001	1.664919E-001
642.0	3.372459E-001	1.661234E-001
643.0	3.365138E-001	1.655867E-001
644.0	3.342032E-001	1.642783E-001
645.0	3.308384E-001	1.624769E-001
646.0	3.266431E-001	1.603072E-001
647.0	3.233452E-001	1.586350E-001
648.0	3.214643E-001	1.576786E-001
649.0	3.218439E-001	1.578261E-001
650.0	3.230702E-001	1.583019E-001
651.0	3.245643E-001	1.588015E-001
652.0	3.249313E-001	1.585288E-001
653.0	3.225059E-001	1.568404E-001
654.0	3.159587E-001	1.531793E-001
655.0	3.110302E-001	1.506965E-001
656.0	3.092382E-001	1.498123E-001
657.0	3.140265E-001	1.516656E-001
658.0	3.202767E-001	1.540135E-001
659.0	3.266020E-001	1.562774E-001
660.0	3.300496E-001	1.574061E-001
661.0	3.316195E-001	1.577453E-001
662.0	3.315845E-001	1.573756E-001
663.0	3.312544E-001	1.570486E-001
664.0	3.308304E-001	1.568156E-001
665.0	3.307276E-001	1.568168E-001
666.0	3.306456E-001	1.568405E-001
667.0	3.305274E-001	1.568402E-001
668.0	3.304030E-001	1.568706E-001
669.0	3.300383E-001	1.568077E-001
670.0	3.291758E-001	1.565163E-001
671.0	3.279970E-001	1.561210E-001
672.0	3.267193E-001	1.557050E-001
673.0	3.259714E-001	1.555113E-001
674.0	3.254006E-001	1.553474E-001
675.0	3.249177E-001	1.551616E-001
676.0	3.245285E-001	1.550123E-001

677.0	3.241733E-001	1.548743E-001
678.0	3.237732E-001	1.547207E-001
679.0	3.231592E-001	1.544696E-001
680.0	3.223300E-001	1.541177E-001
681.0	3.215412E-001	1.537476E-001
682.0	3.205413E-001	1.533502E-001
683.0	3.193815E-001	1.530129E-001
684.0	3.151537E-001	1.512686E-001
685.0	3.072568E-001	1.479294E-001
686.0	2.927375E-001	1.419030E-001
687.0	2.814150E-001	1.376006E-001
688.0	2.766429E-001	1.365360E-001
689.0	2.780580E-001	1.384508E-001
690.0	2.822503E-001	1.416478E-001
691.0	2.861147E-001	1.445402E-001
692.0	2.876739E-001	1.464084E-001
693.0	2.870804E-001	1.473765E-001
694.0	2.874849E-001	1.490959E-001
695.0	2.894071E-001	1.516346E-001
696.0	2.935652E-001	1.552432E-001
697.0	2.953384E-001	1.574814E-001
698.0	2.950164E-001	1.585878E-001
699.0	2.921802E-001	1.585260E-001
700.0	2.894536E-001	1.586159E-001
701.0	2.878664E-001	1.593827E-001
702.0	2.885495E-001	1.613049E-001
703.0	2.904744E-001	1.638791E-001
704.0	2.927673E-001	1.666900E-001
705.0	2.945998E-001	1.692205E-001
706.0	2.958273E-001	1.713930E-001
707.0	2.967794E-001	1.734589E-001
708.0	2.974376E-001	1.753533E-001
709.0	2.978298E-001	1.770622E-001
710.0	2.979077E-001	1.786108E-001
711.0	2.975621E-001	1.799386E-001
712.0	2.967363E-001	1.810841E-001
713.0	2.946601E-001	1.812475E-001
714.0	2.909997E-001	1.801261E-001
715.0	2.810704E-001	1.750084E-001
716.0	2.663839E-001	1.669125E-001
717.0	2.478010E-001	1.564775E-001
718.0	2.348723E-001	1.499405E-001
719.0	2.293054E-001	1.483610E-001
720.0	2.340856E-001	1.533004E-001
721.0	2.419334E-001	1.599919E-001
722.0	2.456751E-001	1.636589E-001
723.0	2.445337E-001	1.641863E-001
724.0	2.400131E-001	1.625833E-001
725.0	2.376703E-001	1.625229E-001
726.0	2.365542E-001	1.632667E-001
727.0	2.366515E-001	1.647264E-001
728.0	2.371629E-001	1.666123E-001
729.0	2.385647E-001	1.692588E-001
730.0	2.421387E-001	1.735534E-001
731.0	2.480572E-001	1.795185E-001
732.0	2.562850E-001	1.870890E-001
733.0	2.637119E-001	1.939145E-001
734.0	2.695626E-001	1.994824E-001
735.0	2.720105E-001	2.025408E-001
736.0	2.736274E-001	2.049964E-001
737.0	2.749779E-001	2.072765E-001
738.0	2.760707E-001	2.094450E-001
739.0	2.771607E-001	2.115776E-001
740.0	2.785123E-001	2.137432E-001
741.0	2.802119E-001	2.162236E-001
742.0	2.821825E-001	2.189404E-001
743.0	2.838566E-001	2.211931E-001
744.0	2.852065E-001	2.231035E-001
745.0	2.861196E-001	2.246672E-001
746.0	2.865791E-001	2.258018E-001
747.0	2.865794E-001	2.265063E-001
748.0	2.859401E-001	2.266441E-001
749.0	2.850248E-001	2.265283E-001
750.0	2.840292E-001	2.263349E-001
751.0	2.835056E-001	2.264497E-001
752.0	2.833625E-001	2.267987E-001
753.0	2.833423E-001	2.271876E-001
754.0	2.831428E-001	2.273949E-001

755.0	2.826547E-001	2.273571E-001
756.0	2.808052E-001	2.255947E-001
757.0	2.724462E-001	2.180475E-001
758.0	2.432021E-001	1.928686E-001
759.0	2.071360E-001	1.632370E-001
760.0	1.691352E-001	1.336498E-001
761.0	1.499005E-001	1.189842E-001
762.0	1.457322E-001	1.164702E-001
763.0	1.515029E-001	1.222336E-001
764.0	1.659045E-001	1.348817E-001
765.0	1.881899E-001	1.537113E-001
766.0	2.106934E-001	1.722925E-001
767.0	2.318040E-001	1.894980E-001
768.0	2.484971E-001	2.030462E-001
769.0	2.597876E-001	2.121412E-001
770.0	2.659990E-001	2.170636E-001
771.0	2.700558E-001	2.202071E-001
772.0	2.721870E-001	2.218597E-001
773.0	2.729912E-001	2.226395E-001
774.0	2.735319E-001	2.231332E-001
775.0	2.739441E-001	2.234403E-001
776.0	2.740388E-001	2.235877E-001
777.0	2.739132E-001	2.235831E-001
778.0	2.736482E-001	2.234318E-001
779.0	2.734221E-001	2.233513E-001
780.0	2.732565E-001	2.233433E-001
781.0	2.731791E-001	2.232670E-001
782.0	2.729339E-001	2.230579E-001
783.0	2.723135E-001	2.226584E-001
784.0	2.714252E-001	2.219962E-001
785.0	2.702198E-001	2.210161E-001
786.0	2.685037E-001	2.195758E-001
787.0	2.661954E-001	2.176484E-001
788.0	2.630305E-001	2.150412E-001
789.0	2.603326E-001	2.129378E-001
790.0	2.582028E-001	2.113882E-001
791.0	2.568055E-001	2.104018E-001
792.0	2.560164E-001	2.098729E-001
793.0	2.558673E-001	2.097914E-001
794.0	2.555791E-001	2.096476E-001
795.0	2.552122E-001	2.094966E-001
796.0	2.552207E-001	2.097568E-001
797.0	2.553455E-001	2.100238E-001
798.0	2.555525E-001	2.100813E-001
799.0	2.545570E-001	2.092367E-001
800.0	2.527041E-001	2.077503E-001
801.0	2.513901E-001	2.065846E-001
802.0	2.505113E-001	2.058118E-001
803.0	2.501559E-001	2.056419E-001
804.0	2.509921E-001	2.062833E-001
805.0	2.525390E-001	2.073748E-001
806.0	2.531398E-001	2.077538E-001
807.0	2.525564E-001	2.071054E-001
808.0	2.502075E-001	2.048601E-001
809.0	2.470982E-001	2.020588E-001
810.0	2.430533E-001	1.985140E-001
811.0	2.371214E-001	1.931909E-001
812.0	2.292296E-001	1.862707E-001
813.0	2.188182E-001	1.774424E-001
814.0	2.084962E-001	1.689124E-001
815.0	1.992106E-001	1.614611E-001
816.0	1.940861E-001	1.575778E-001
817.0	1.924287E-001	1.565426E-001
818.0	1.945062E-001	1.584790E-001
819.0	1.985375E-001	1.616710E-001
820.0	2.035048E-001	1.653258E-001
821.0	2.019737E-001	1.639734E-001
822.0	1.992335E-001	1.618897E-001
823.0	1.997421E-001	1.628137E-001
824.0	2.038226E-001	1.662595E-001
825.0	2.107358E-001	1.716067E-001
826.0	2.127904E-001	1.731689E-001
827.0	2.123350E-001	1.728325E-001
828.0	2.106819E-001	1.717861E-001
829.0	2.104192E-001	1.717322E-001
830.0	2.117905E-001	1.728370E-001
831.0	2.127449E-001	1.736711E-001
832.0	2.139533E-001	1.748028E-001

833.0	2.159634E-001	1.767783E-001
834.0	2.188778E-001	1.794712E-001
835.0	2.227304E-001	1.828592E-001
836.0	2.262512E-001	1.859546E-001
837.0	2.293651E-001	1.886938E-001
838.0	2.318431E-001	1.909076E-001
839.0	2.339077E-001	1.926723E-001
840.0	2.355912E-001	1.939940E-001
841.0	2.364442E-001	1.948711E-001
842.0	2.368212E-001	1.954754E-001
843.0	2.374467E-001	1.961851E-001
844.0	2.381299E-001	1.969149E-001
845.0	2.389085E-001	1.977128E-001
846.0	2.389158E-001	1.977700E-001
847.0	2.380124E-001	1.970040E-001
848.0	2.356262E-001	1.950653E-001
849.0	2.335894E-001	1.933889E-001
850.0	2.328868E-001	1.927626E-001
851.0	2.303504E-001	1.905260E-001
852.0	2.264233E-001	1.871239E-001
853.0	2.223901E-001	1.839853E-001
854.0	2.205425E-001	1.826852E-001
855.0	2.235020E-001	1.851628E-001
856.0	2.263323E-001	1.875598E-001
857.0	2.284780E-001	1.894312E-001
858.0	2.298480E-001	1.906580E-001
859.0	2.307610E-001	1.914708E-001
860.0	2.315714E-001	1.920983E-001
861.0	2.322387E-001	1.925994E-001
862.0	2.325599E-001	1.928201E-001
863.0	2.306493E-001	1.911752E-001
864.0	2.273587E-001	1.884305E-001
865.0	2.228512E-001	1.848217E-001
866.0	2.205266E-001	1.830191E-001
867.0	2.212710E-001	1.837235E-001
868.0	2.222957E-001	1.846344E-001
869.0	2.234741E-001	1.856531E-001
870.0	2.242208E-001	1.863181E-001
871.0	2.246878E-001	1.867017E-001
872.0	2.248902E-001	1.867881E-001
873.0	2.245150E-001	1.863890E-001
874.0	2.237590E-001	1.856853E-001
875.0	2.234589E-001	1.854589E-001
876.0	2.232106E-001	1.852582E-001
877.0	2.228585E-001	1.848520E-001
878.0	2.219739E-001	1.840727E-001
879.0	2.206283E-001	1.829892E-001
880.0	2.199002E-001	1.824139E-001
881.0	2.195544E-001	1.821401E-001
882.0	2.195956E-001	1.821420E-001
883.0	2.192850E-001	1.818220E-001
884.0	2.184256E-001	1.810238E-001
885.0	2.174211E-001	1.801664E-001
886.0	2.164637E-001	1.793992E-001
887.0	2.158881E-001	1.790426E-001
888.0	2.154253E-001	1.786366E-001
889.0	2.149971E-001	1.780595E-001
890.0	2.135576E-001	1.766967E-001
891.0	2.108860E-001	1.743301E-001
892.0	2.063950E-001	1.704352E-001
893.0	2.000461E-001	1.649451E-001
894.0	1.916594E-001	1.576804E-001
895.0	1.826860E-001	1.500175E-001
896.0	1.734208E-001	1.421958E-001
897.0	1.645994E-001	1.347698E-001
898.0	1.570210E-001	1.284930E-001
899.0	1.513050E-001	1.239593E-001
900.0	1.484511E-001	1.218961E-001
901.0	1.486873E-001	1.224606E-001
902.0	1.535170E-001	1.267721E-001
903.0	1.595643E-001	1.319027E-001
904.0	1.630632E-001	1.344552E-001
905.0	1.625296E-001	1.336847E-001
906.0	1.574053E-001	1.292441E-001
907.0	1.523245E-001	1.250123E-001
908.0	1.477763E-001	1.213132E-001
909.0	1.457571E-001	1.196545E-001
910.0	1.442428E-001	1.183049E-001

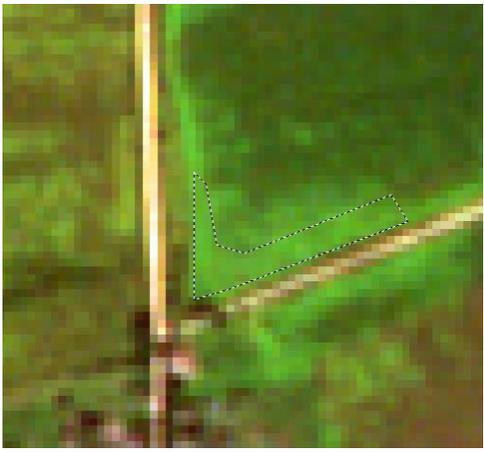
911.0	1.425002E-001	1.165900E-001
912.0	1.400813E-001	1.145903E-001
913.0	1.372916E-001	1.124871E-001
914.0	1.356721E-001	1.111693E-001
915.0	1.349252E-001	1.105383E-001
916.0	1.345957E-001	1.103495E-001
917.0	1.366286E-001	1.121572E-001
918.0	1.414620E-001	1.163130E-001
919.0	1.462946E-001	1.203084E-001
920.0	1.504640E-001	1.236234E-001
921.0	1.520710E-001	1.246642E-001
922.0	1.520299E-001	1.244585E-001
923.0	1.504474E-001	1.232579E-001
924.0	1.497614E-001	1.224780E-001
925.0	1.490438E-001	1.214087E-001
926.0	1.446529E-001	1.172455E-001
927.0	1.368918E-001	1.104359E-001
928.0	1.251219E-001	1.007023E-001
929.0	1.120991E-001	8.975313E-002
930.0	9.824944E-002	7.794199E-002
931.0	8.372974E-002	6.595638E-002
932.0	7.026372E-002	5.505647E-002
933.0	6.016430E-002	4.708763E-002
934.0	5.301191E-002	4.136529E-002
935.0	4.884338E-002	3.783574E-002
936.0	4.712743E-002	3.674812E-002
937.0	4.840608E-002	3.820991E-002
938.0	5.507815E-002	4.344826E-002
939.0	6.112987E-002	4.809314E-002
940.0	6.382322E-002	5.009846E-002
941.0	6.421354E-002	5.024149E-002
942.0	6.277541E-002	4.891655E-002
943.0	6.132054E-002	4.766488E-002
944.0	5.995802E-002	4.650114E-002
945.0	5.917068E-002	4.570804E-002
946.0	5.915313E-002	4.559219E-002
947.0	5.997830E-002	4.624310E-002
948.0	6.096081E-002	4.697007E-002
949.0	6.204495E-002	4.770123E-002
950.0	6.307037E-002	4.817021E-002
951.0	6.386002E-002	4.854454E-002
952.0	6.425440E-002	4.886000E-002
953.0	6.517165E-002	4.931424E-002
954.0	6.658425E-002	5.001012E-002
955.0	6.835142E-002	5.146100E-002
956.0	7.034892E-002	5.302013E-002
957.0	7.252795E-002	5.421461E-002
958.0	7.425001E-002	5.525442E-002
959.0	7.566225E-002	5.627638E-002
960.0	7.884318E-002	5.841872E-002
961.0	8.268044E-002	6.103960E-002
962.0	8.606776E-002	6.351770E-002
963.0	8.916115E-002	6.581506E-002
964.0	9.177145E-002	6.774805E-002
965.0	9.597072E-002	7.097635E-002
966.0	1.019331E-001	7.555911E-002
967.0	1.108129E-001	8.206832E-002
968.0	1.198272E-001	8.852587E-002
969.0	1.270646E-001	9.349240E-002
970.0	1.316176E-001	9.670666E-002
971.0	1.333684E-001	9.808071E-002
972.0	1.325268E-001	9.730131E-002
973.0	1.303167E-001	9.548542E-002
974.0	1.280110E-001	9.381211E-002
975.0	1.272487E-001	9.326919E-002
976.0	1.285248E-001	9.417717E-002
977.0	1.295693E-001	9.485711E-002
978.0	1.310069E-001	9.585453E-002
979.0	1.341248E-001	9.835193E-002
980.0	1.378128E-001	1.012529E-001
981.0	1.416949E-001	1.041636E-001
982.0	1.453382E-001	1.068934E-001
983.0	1.487231E-001	1.094397E-001
984.0	1.521896E-001	1.121173E-001
985.0	1.555374E-001	1.146662E-001
986.0	1.586382E-001	1.167958E-001
987.0	1.610550E-001	1.185516E-001
988.0	1.626705E-001	1.199305E-001

989.0	1.639967E-001	1.210953E-001
990.0	1.651085E-001	1.220655E-001
991.0	1.662707E-001	1.229044E-001
992.0	1.672263E-001	1.235878E-001
993.0	1.678523E-001	1.240972E-001
994.0	1.686920E-001	1.247174E-001
995.0	1.696083E-001	1.253556E-001
996.0	1.699736E-001	1.255522E-001
997.0	1.701591E-001	1.257249E-001
998.0	1.704532E-001	1.262574E-001
999.0	1.701589E-001	1.261669E-001
1000.0	1.692903E-001	1.254459E-001
1001.0	1.686515E-001	1.249864E-001
1002.0	1.679519E-001	1.245345E-001
1003.0	1.668417E-001	1.238079E-001
1004.0	1.658474E-001	1.232748E-001
1005.0	1.651018E-001	1.230824E-001
1006.0	1.654142E-001	1.235715E-001
1007.0	1.664467E-001	1.244990E-001
1008.0	1.666909E-001	1.248081E-001
1009.0	1.670374E-001	1.250991E-001
1010.0	1.681771E-001	1.257828E-001
1011.0	1.684354E-001	1.261546E-001
1012.0	1.678125E-001	1.261811E-001
1013.0	1.679256E-001	1.261393E-001
1014.0	1.683015E-001	1.262435E-001
1015.0	1.686194E-001	1.269795E-001
1016.0	1.686986E-001	1.273322E-001
1017.0	1.684706E-001	1.270787E-001
1018.0	1.679091E-001	1.274131E-001
1019.0	1.674054E-001	1.278675E-001
1020.0	1.680991E-001	1.273854E-001
1021.0	1.684211E-001	1.269909E-001
1022.0	1.676309E-001	1.270936E-001
1023.0	1.675977E-001	1.273278E-001
1024.0	1.679929E-001	1.276094E-001
1025.0	1.670837E-001	1.275568E-001
1026.0	1.665436E-001	1.275731E-001
1027.0	1.677939E-001	1.279651E-001
1028.0	1.681277E-001	1.284456E-001
1029.0	1.673981E-001	1.288864E-001
1030.0	1.667851E-001	1.283102E-001
1031.0	1.663563E-001	1.274676E-001
1032.0	1.665717E-001	1.272118E-001
1033.0	1.662056E-001	1.272024E-001
1034.0	1.649841E-001	1.273908E-001
1035.0	1.642925E-001	1.271406E-001
1036.0	1.641612E-001	1.267961E-001
1037.0	1.651357E-001	1.271642E-001
1038.0	1.657203E-001	1.274322E-001
1039.0	1.651865E-001	1.272523E-001
1040.0	1.646208E-001	1.273367E-001
1041.0	1.640522E-001	1.275563E-001
1042.0	1.634534E-001	1.273534E-001
1043.0	1.630732E-001	1.268847E-001
1044.0	1.632805E-001	1.261129E-001
1045.0	1.626305E-001	1.257404E-001
1046.0	1.611605E-001	1.257776E-001
1047.0	1.604571E-001	1.255627E-001
1048.0	1.606549E-001	1.252717E-001
1049.0	1.626835E-001	1.250719E-001
1050.0	1.633891E-001	1.246493E-001
1051.0	1.625905E-001	1.240375E-001
1052.0	1.630220E-001	1.238634E-001
1053.0	1.634768E-001	1.239245E-001
1054.0	1.626397E-001	1.240851E-001
1055.0	1.614755E-001	1.242607E-001
1056.0	1.602025E-001	1.244033E-001
1057.0	1.609380E-001	1.236517E-001
1058.0	1.622124E-001	1.226484E-001
1059.0	1.603649E-001	1.228478E-001
1060.0	1.595743E-001	1.232000E-001
1061.0	1.617734E-001	1.233781E-001
1062.0	1.617142E-001	1.227184E-001
1063.0	1.601026E-001	1.217682E-001
1064.0	1.596356E-001	1.226544E-001
1065.0	1.592256E-001	1.228091E-001
1066.0	1.585370E-001	1.209947E-001

1067.0	1.584334E-001	1.210797E-001
1068.0	1.589898E-001	1.224328E-001
1069.0	1.609529E-001	1.221126E-001
1070.0	1.620798E-001	1.216104E-001
1071.0	1.600744E-001	1.218320E-001
1072.0	1.608261E-001	1.216842E-001
1073.0	1.633120E-001	1.211798E-001
1074.0	1.620486E-001	1.204411E-001
1075.0	1.608789E-001	1.197664E-001
1076.0	1.627160E-001	1.194385E-001
1077.0	1.623558E-001	1.192485E-001
1078.0	1.598125E-001	1.190329E-001
1079.0	1.590685E-001	1.178899E-001
1080.0	1.587532E-001	1.164317E-001
1081.0	1.582316E-001	1.150071E-001
1082.0	1.577203E-001	1.134537E-001
1083.0	1.573769E-001	1.120155E-001
1084.0	1.588665E-001	1.131460E-001
1085.0	1.601929E-001	1.148781E-001
1086.0	1.591305E-001	1.155363E-001
1087.0	1.596610E-001	1.147202E-001
1088.0	1.615728E-001	1.125909E-001
1089.0	1.588125E-001	1.113236E-001
1090.0	1.552984E-001	1.104758E-001
1091.0	1.544547E-001	1.100222E-001
1092.0	1.551814E-001	1.081930E-001
1093.0	1.568393E-001	1.054145E-001
1094.0	1.555098E-001	1.063653E-001
1095.0	1.533548E-001	1.068480E-001
1096.0	1.513597E-001	1.035374E-001
1097.0	1.511188E-001	1.017432E-001
1098.0	1.522638E-001	1.015867E-001
1099.0	1.505817E-001	9.974869E-002
1100.0	1.488347E-001	9.835852E-002

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТЕСТОВЫЕ УЧАСТКИ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО, КА RAPIDEYE

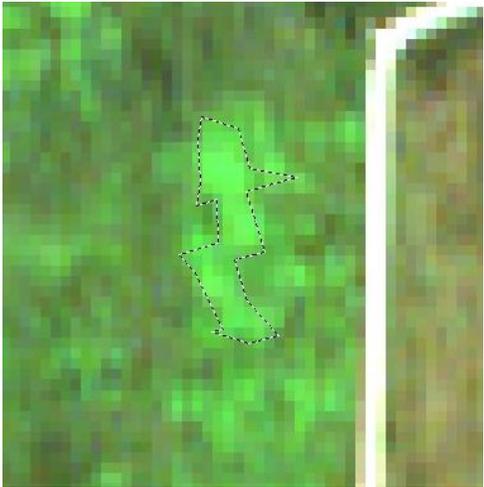
Название снимка	№ тестового участка	Координаты	Обзорное изображение
2013-07-27_103357	1	60 57 51, 28 11 26	
	2	60 59 50, 28 07 30	

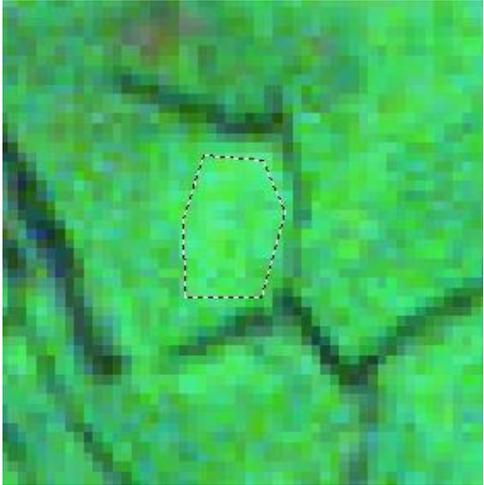
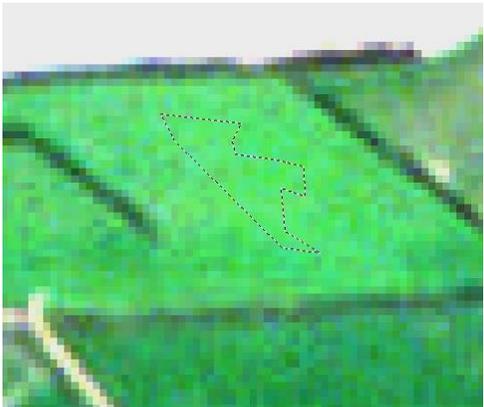
	3	61 00 15, 28 03 11	
2013-07-30_101547	1	58 52 16, 30 36 56	

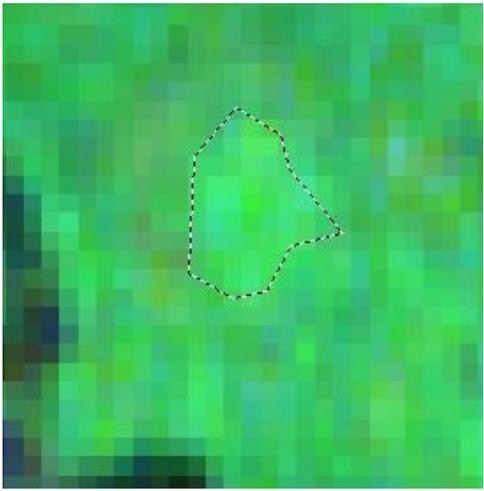
	2	59 26 24, 30 55 53	
	3	59 24 39, 30 54 49	

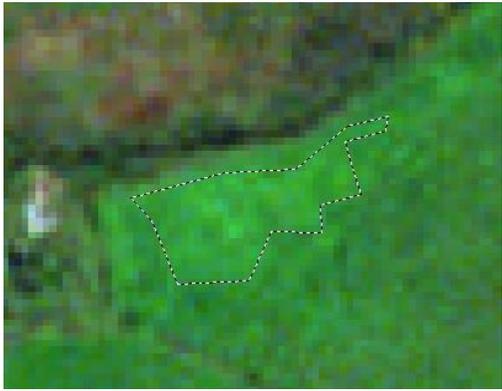
2013-08-07_102850	1	59 32 15, 30 09 26	
	2	59 32 24, 30 09 19	

	3	59 32 01, 29 53 51	
	1	59 32 07, 30 08 48	

2013-09-06_101359	2	59 32 31, 30 09 32	
	3	59 33 35, 30 13 10	

2013-09-07_095958	1	59 25 23, 33 12 55	
	2	59 34 21, 33 23 56	

	3	59 34 12, 33 22 25	
2013-09-07_101703	1	59 39 44, 29 30 19	

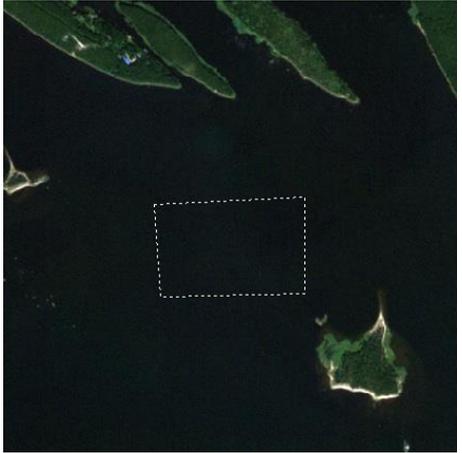
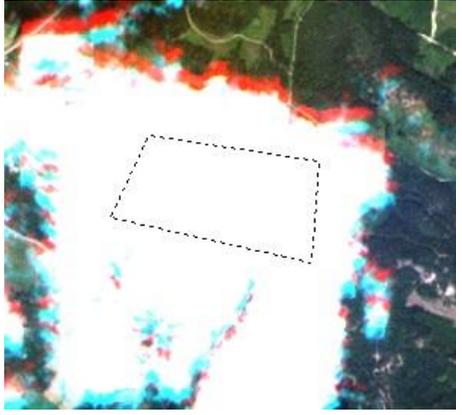
	2	59 27 47, 28 47 11	
	3	59 31 40, 59 56 25	

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ТЕСТОВЫЕ УЧАСТКИ, КА RAPIDEYE

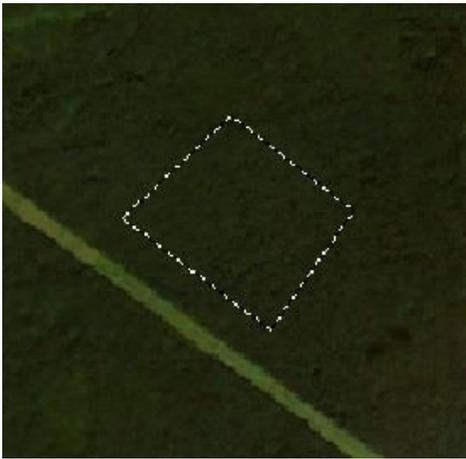
Название снимка	Тип подстилающей поверхности	Координаты	Обзорное изображение
2013-07-27_103357	С/х поля-1	60 46 04, 28 35 17	
	С/х поля-2	60 45 00, 28 37 05	

	Смешанный лес	60 38 20, 28 14 29	
	Обнаженный грунт/почва	60 45 50, 28 26 13	

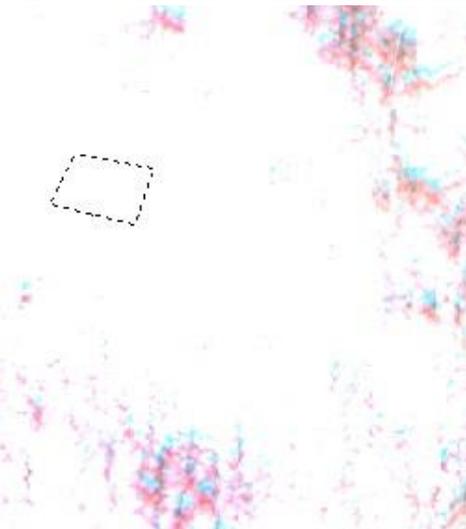
	Болотная растительность	60 42 34, 28 36 32	
	Урбанизированные зоны	60 45 49, 28 37 21	

	Водные объекты	60 38 12, 28 28 39	
	Облака	60 33 19, 27 31 14	

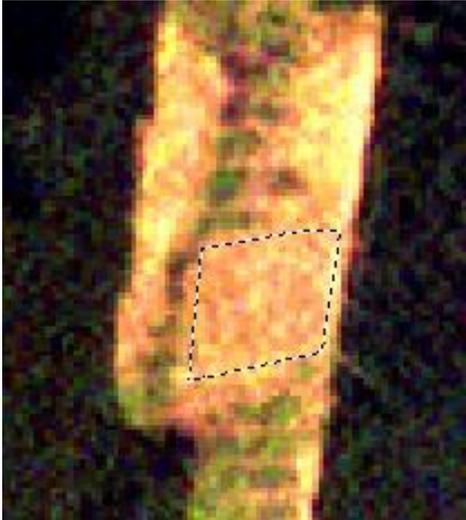
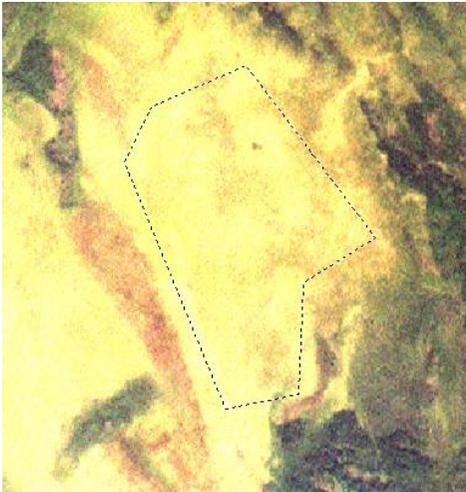
2013-07-30_101547	С/х поля-1	60 08 53, 30 51 26	
	С/х поля-2	60 08 31, 30 52 54	

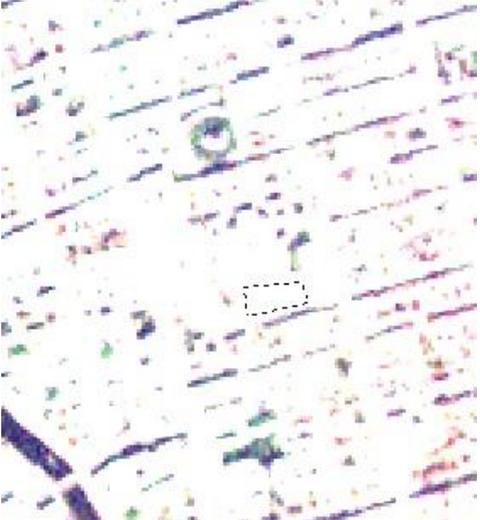
	Смешанный лес	59 11 32, 30 57 19	
	Обнаженный грунт/почва	59 19 20, 30 47 49	

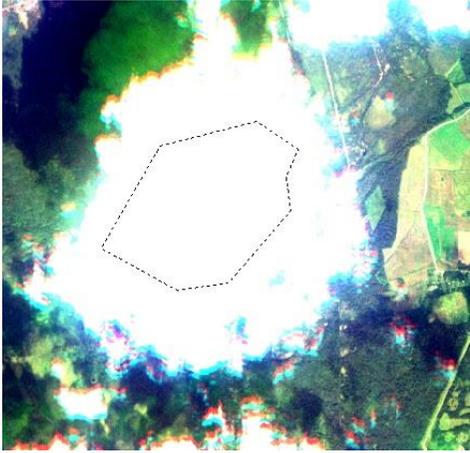
	Болотная растительность	59 18 51, 31 00 12	
	Урбанизированные зоны	59 58 13, 31 03 00	

	Водные объекты	60 15 13, 31 26 15	
	Облака	59 37 56, 30 05 58	

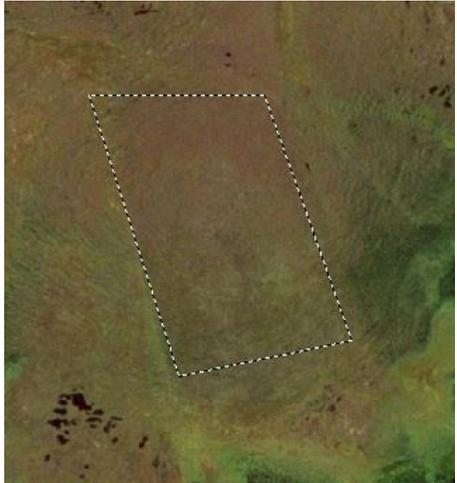
2013-08-07_102850	С/х поля-1	60 08 50, 30 52 08	
	С/х поля-2	60 08 31, 30 52 53	
	Смешанный лес	58 31 45, 29 40 39	

	Обнаженный грунт/почва	59 13 20, 29 30 54	
	Болотная растительность	60 20 18, 30 38 03	

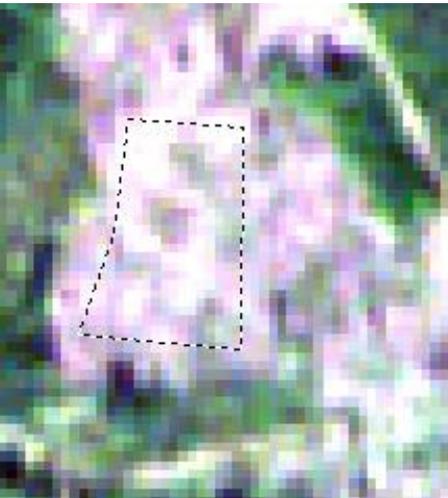
	Урбанизированные зоны	59 56 24, 30 31 10	
	Водные объекты	59 57 08, 30 05 03	

	Облака	58 34 05, 29 29 55	
2013-09-06_101359	С/х поля-1	59 36 58, 30 19 19	

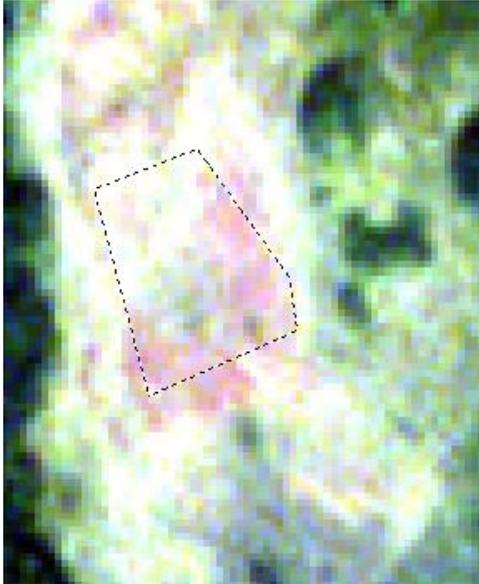
	С/х поля-2	59 37 12, 30 19 58	
	Смешанный лес	59 37 54, 30 16 52	

	Обнаженный грунт/почва	59 26 40, 30 10 31	
	Болотная растительность	59 08 58, 29 47 00	

	Урбанизированные зоны	59 56 12, 30 20 22	
	Водные объекты	60 03 48, 29 48 07	

2013-09-07_095958	С/х поля-1	59 11 03, 33 32 24	
	С/х поля-2	59 10 48, 33 36 09	

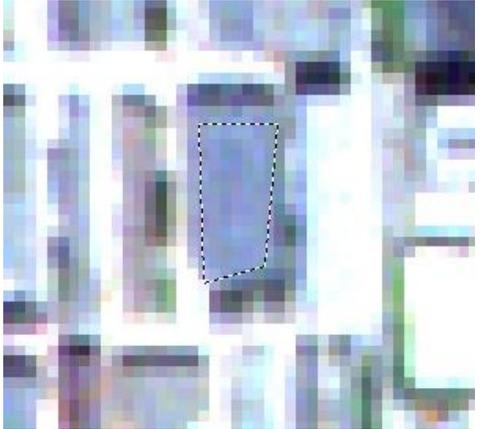
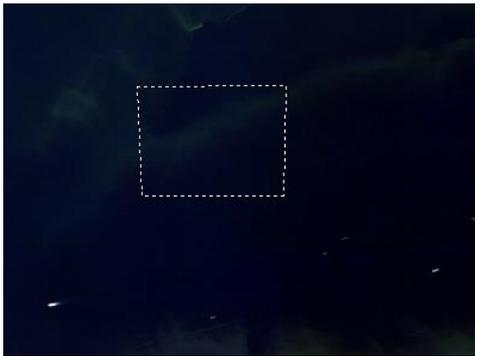
	Смешанный лес	59 15 05, 33 35 33	
	Обнаженный грунт/почва	59 25 54, 33 13 10	

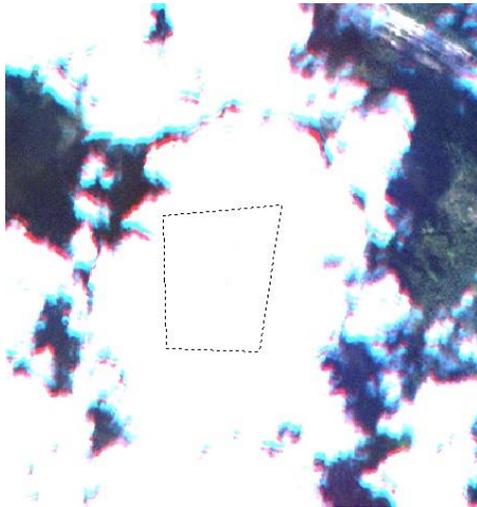
	Болотная растительность	61 02 55, 33 36 07	
	Урбанизированные зоны	59 38 39, 33 32 36	

	Водные объекты	59 12 04, 33 36 21	
2013-09-07_101703	С/х поля-1	59 36 43, 29 15 58	

	С/х поля-2	59 36 04, 29 13 48	
	Смешанный лес	59 43 19, 29 04 44	

	Обнаженный грунт/почва	48 44 07, 28 15 17	
	Болотная растительность	58 51 29, 29 27 06	

	Урбанизированные зоны	60 01 39, 30 16 48	
	Водные объекты	60 03 42, 29 13 05	

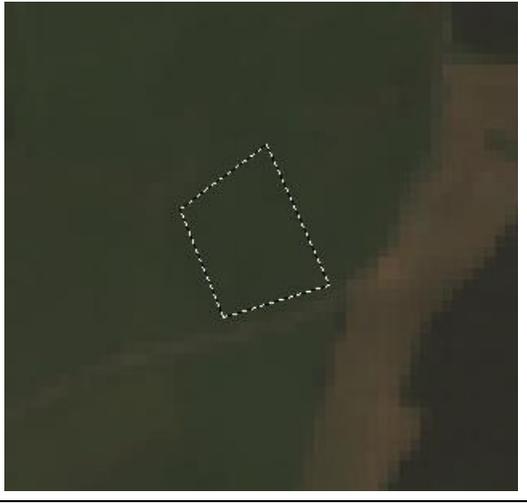
	<p>Облака</p>	<p>60 53 23, 29 24 00</p>	
--	---------------	---------------------------	---

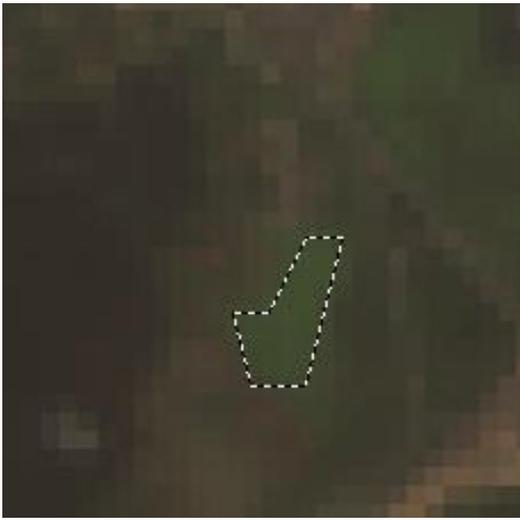
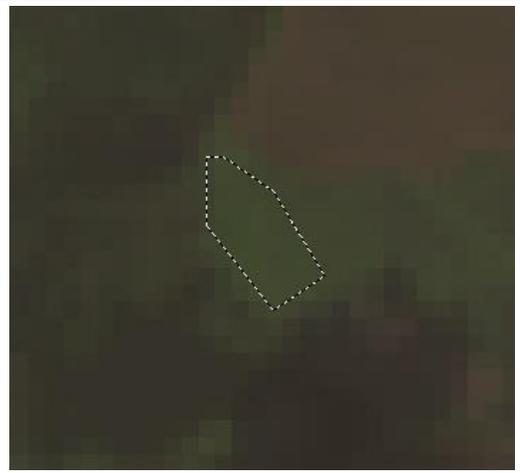
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ТЕСТОВЫЕ УЧАСТКИ, КА LANDSAT-8

Название снимка	Тип подстилающей поверхности	Координаты	Обзорное изображение
29-07-2014	БС-1	59 32 07, 30 08 47	
	БС-2	59 31 41, 29 56 21	

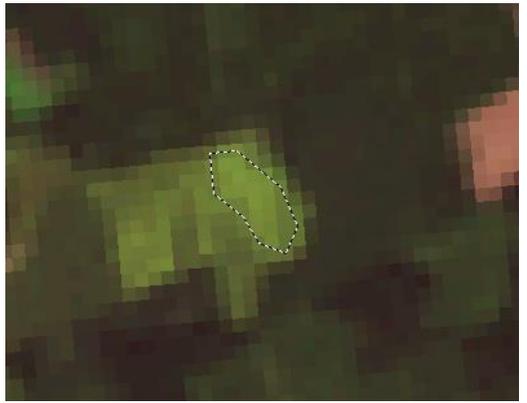
	С/х поля-1	59 30 13, 30 01 42	
	С/х поля-2	59 37 40, 30 21 44	

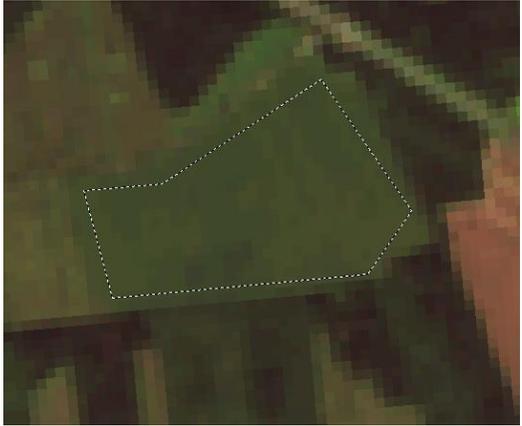
05-08-2014	BC-1	59 32 07, 30 08 46	
	BC-2	59 31 41, 29 56 23	

	С/х поля-1	59 32 23, 30 11 05	
	С/х поля-2	59 36 07, 29 53 17	

23-07-2015	BC-1	59 32 05, 30 08 46	
	BC-2	59 31 37, 30 03 01	

	С/х поля-1	59 29 38, 30 11 16	
	С/х поля-2	59 35 25, 30 13 42	

17-08-2015	BC-1	59 32 05, 30 08 46	 A satellite image showing a field with a green dashed outline. The field is surrounded by trees and a road. The image is somewhat blurry and has a low resolution.
	BC-2	59 34 37, 29 46 15	 A satellite image showing a field with a green dashed outline. The field is surrounded by trees and a road. The image is somewhat blurry and has a low resolution.

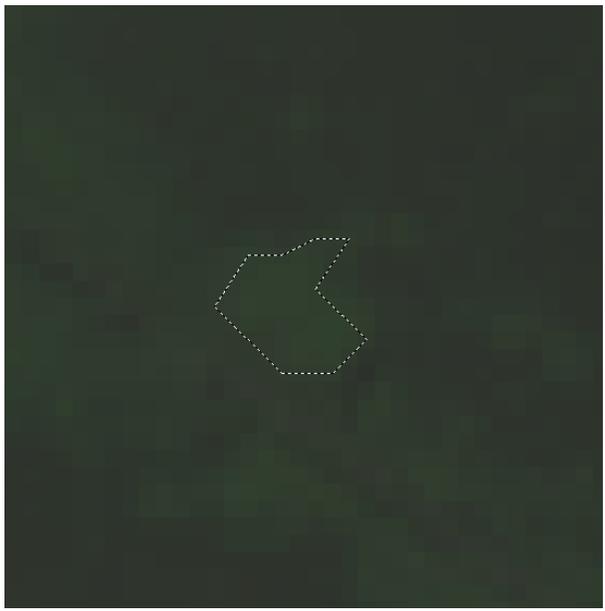
	С/х поля-1	59 34 02, 29 46 11	
	С/х поля-2	59 34 50, 30 15 14	

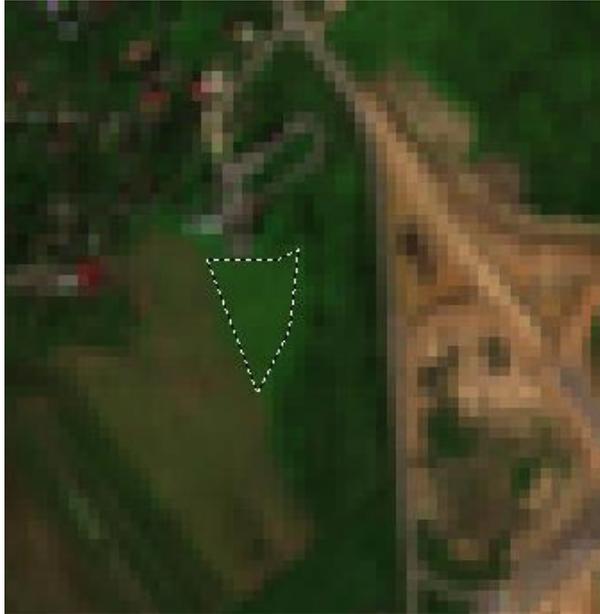
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ТЕСТОВЫЕ УЧАСТКИ, КА SENTINEL-2A

Название снимка	Тип подстилающей поверхности	Координаты	Обзорное изображение
08.08.2015	БС	59 32 07, 30 08 48	 An aerial satellite image showing a large green field, likely agricultural land. A dashed white outline highlights a specific rectangular area within the field. The surrounding area appears to be a mix of green and brown, possibly indicating different types of vegetation or terrain.

	С/х поля	59 32 17, 30 09 57	
--	----------	--------------------	---

21.08.2015	БС	59 32 07, 30 08 48	
	С/х поля	59 32 01, 30 09 43	

02.08.2016	БС	59 44 59, 30 19 27	
	С/х поля	60 11 35, 30 02 20	

22.08.2016	BC	59 32 07, 30 08 48	 An aerial photograph showing a green field with a brown path or road on the right side. A dashed white triangle is drawn on the field, pointing downwards, to highlight a specific area of interest.
------------	----	--------------------	--

	С/х поля	59 32 13, 30 09 53	
--	----------	--------------------	---

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
(ГУАП)

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,
E-mail: common@aanet.ru ОГРН 1027810232680, ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ _____ На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

д.э.н., доцент



Ю.А. Антохина

«10» 04 2018 г.

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы Рыжикова Дмитрия Михайловича «Контроль зон произрастания борщевика Сосновского по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона».

Научно-техническая комиссия в составе: А.В. Рабин – директор ЦКНИ ГУАП; Е.Ф. Чичкова – заместитель директора ЦКУ «КосмоИнформ-Центр»; С.А. Рогачев – ведущий программист ЦКУ «КосмоИнформ-Центр», составила настоящий акт о том, что следующие результаты диссертационной работы:

- спектральный индекс, позволяющий осуществлять контроль зон произрастания борщевика Сосновского (БС) по отраженному сигналу оптического диапазона, зафиксированному в спутниковых данных космических аппаратов RapidEye, LandSat-8, Sentinel-2A;
- алгоритмы и программное обеспечение для проведения оптического контроля произрастания БС используются в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Информационная технология оперативного мониторинга потенциально опасных объектов окружающей среды с использованием космической съемки», 2017-2019 гг., ЦКУ «КосмоИнформ-Центр» ГУАП.

Директор ЦКНИ ГУАП
кандидат технических наук

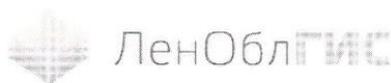
А.В. Рабин

Заместитель директора ЦКУ «КосмоИнформ-Центр»
кандидат географических наук

Е.Ф. Чичкова

Ведущий программист ЦКУ «КосмоИнформ-Центр»

С.А. Рогачев



Общество с ограниченной ответственностью «ЛЕНОБЛГИС»

ОГРН 1144703002256 ИНН 4703140707 КПП 781001001

196084, РФ, город Санкт-Петербург, ул. Ломаная, дом 5, литера «А», помещение 286

Телефон/Факс: 8(812)448-64-92 email: office@lenoblgis



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор ООО ЛенОблГИС

Петров И.В.

12» 04 2018 г.

АКТ

Об использовании результатов диссертационного исследования
Рыжикова Дмитрия Михайловича
на тему «Контроль зон произрастания борщевика Сосновского
по спектральным характеристикам отраженных
волн оптического диапазона»

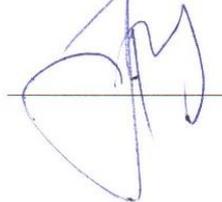
Комиссия в составе: Филиппова М.В. – Технического директора Общества с ограниченной ответственностью «ЛЕНОБЛГИС»; Петрова И.В. – Генерального директора Общества с ограниченной ответственностью «ЛЕНОБЛГИС», составила настоящий акт о внедрении. Акт подтверждает, что в рамках Государственного контракта №22 от 19.08.2015г. по созданию геоинформационной системы (Центр) агропромышленного комплекса Ленинградской области были использованы результаты диссертационных исследований Рыжикова Д.М., в частности, результаты исследования распространения и изменчивости зон произрастания борщевика Сосновского на территории Ленинградской области с помощью разновременных данных космических систем различного пространственного разрешения (RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A) и методики оценки эффективности принятия решения об обнаружении зон произрастания БС и формирования множества альтернативных решений в задаче распознавания БС.

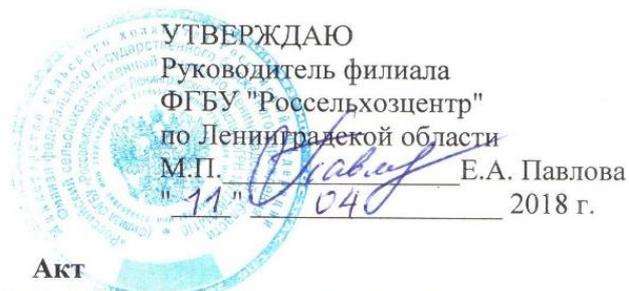
Применение результатов исследования и методик позволили провести оценку распространения и степени засоренности полей сельскохозяйственного назначения борщевиком Сосновского.

Технический директор
ООО «ЛЕНОБЛГИС»

Генеральный директор
ООО «ЛЕНОБЛГИС»

 Филиппов М.В.

 Петров И.В.



УТВЕРЖДАЮ

Руководитель филиала

ФГБУ "Россельхозцентр"

по Ленинградской области

М.П. Е.А. Павлова

"11" 04 2018 г.

Акт

**о внедрении результатов диссертационного исследования
Рыжикова Дмитрия Михайловича
на тему "Контроль зон произрастания борщевика Сосновского по спектральным
характеристикам отраженных волн оптического диапазона"**

Санкт-Петербург

«11» 04 2018 г.

Комиссия в составе представителей филиала ФГБУ "Россельхозцентр" по Ленинградской области:

1. Председателя комиссии заместителя руководителя Жигловой О.В.,
2. Члена комиссии начальника отдела защиты растений Масловой И.В.,
3. Члена комиссии ведущего агронома Зинченко О.А.,

настоящим актом подтверждает актуальность диссертационного исследования Рыжикова Дмитрия Михайловича на тему "Контроль зон произрастания борщевика Сосновского по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона" и использование результатов в работе филиала ФГБУ "Россельхозцентр" по Ленинградской области при проведении фитосанитарного мониторинга борщевика Сосновского и оценки результатов мероприятий по борьбе с борщевиком Сосновского на территории Ленинградской области.

Результаты исследования имеют практическое значение. Борщевик Сосновского (*Heracleum Sosnovskyi* Manden) получил широкое распространение на территории многих регионов Российской Федерации. В местах концентрации он становится доминирующим видом растительного покрова, вызывает массовый травматизм населения и представляет угрозу биологическому разнообразию природы. Для разработок, планирования, проведения комплекса мероприятий по борьбе и оценки эффективности выполненных мероприятий необходимо проведение фитосанитарного мониторинга с составлением карт-схем распространения борщевика Сосновского. До 2015 г. борщевик Сосновского не являлся сорным растением, фитосанитарный мониторинг в его отношении не проводился. В настоящее время полные сведения о распространении борщевика Сосновского по территории Российской Федерации отсутствуют.

Масштабные работы по проведению фитосанитарного мониторинга путем проведения наземных полевых обследований представляют собой дорогостоящий, трудоемкий процесс с низкой производительностью труда. При этом в основе метода определения степени засорения территории лежит глазомерный способ определения проективного покрытия с последующей математической обработкой (получения средневзвешенного значения). Для создания электронной базы данных требуется ручная обработка полученных учетных данных.

Разработанный Рыжиковым Дмитрием Михайловичем способ обработки космической информации (спутниковых снимков) позволит получать оперативную

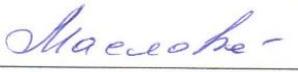
информацию о фитосанитарном состоянии территории по борщевiku Сосновского, находящегося в фазе цветения при минимальных затратах труда; проводить автоматический расчет проективного покрытия выявленных очагов цветущего борщевика Сосновского; проводить построение краткосрочных и долгосрочных прогнозов засоренности борщевиком Сосновского территории региона с использованием картографического слоя с метеорологическими данными (роза ветров); создавать автоматизированные рабочие места через личные кабинеты сотрудников учреждений и органов власти, что позволит определять степень засорения территорий борщевиком Сосновского в границах учетных земельных участков для выявления участков с наиболее неблагоприятным фитосанитарным состоянием по борщевiku Сосновского для принятия необходимых управленческих решений.

Председатель комиссии



О. В. Жиглова

Члены комиссии:



И. В. Масловой



О.А. Зинченко