

На правах рукописи



Рыжиков Дмитрий Михайлович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель: **Якимов Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры конструирования и технологий
электронных и лазерных средств Института радиотехники,
электроники и связи ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

Официальные оппоненты: **Козин Игорь Александрович**
доктор технических наук, доцент
профессор кафедры космических радиотехнических систем
факультета радиоэлектронных систем космических
комплексов федерального государственного бюджетного
военного образовательного учреждения высшего
образования «Военно-космическая академия имени
А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской
Федерации (г. Санкт-Петербург)

Хименко Виталий Иванович
доктор технических наук, профессор
директор департамента развития АО «Научно-
исследовательский и опытно-экспериментальный центр
интеллектуальных технологий «Петрокомета»
(Государственная Корпорация «РОСТЕХ») (г. Санкт-
Петербург)

Ведущая организация: **Всероссийский научно-исследовательский институт
защиты растений (г. Санкт-Петербург)**

Защита диссертации состоится 14 мая 2019 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.233.01 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» и на сайте www.guar.ru

Автореферат разослан «03» апреля 2019 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.233.01
доктор технических наук профессор

Шелест Дмитрий Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 произра-

стания 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 спектрорадиометром.

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 разновременных 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 спектрорадиометром 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. 17.

Внедрение результатов исследования

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определен объект и предмет исследования, выполнена постановка цели и задач, рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости полученных результатов.

Первый раздел имеет обзорный характер и посвящен анализу литературных источников для определения современного состояния научно-технической отрасли контроля природной среды, исследований природной среды по данным дистанционного зондирования, а также актуальности контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным, определению параметров контроля зон произрастания БС.

Среди методов неразрушающего контроля, применяемых на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), широкое применение для контроля природной среды нашли радиоволновой и оптический методы. Технологии ДЗЗ из космоса нашли свое применение во множестве сфер человеческой деятельности и позволяют решать задачи анализа атмосферных процессов и явлений, состояния водной среды, мониторинга объектов суши.

Круг решаемых задач по данным, полученным с определенного КА ДЗЗ, определяется параметрами орбиты спутника (тип, высота орбиты) и характеристиками съемочной аппаратуры (ширина полосы захвата, спектральные диапазоны съемки, пространственное и радиометрическое разрешение получаемых снимков, период съемки).

Процесс обработки данных ДЗЗ, имеющий целью контроль растительного покрова земной поверхности, включает в себя процедуры первичной и вторичной обработки. Методы обработки спутниковых снимков различаются в зависимости от этапа обработки и решаемой задачи.

По составу и количеству проведенных процедур обработки данные ДЗЗ подразделяются на уровни от L0 (исходные данные, получаемые с борта КА) до L4 (результаты анализа, статистики, модельные оценки).

Задача обнаружения объектов подстилающей поверхности по спутниковым снимкам заключается в их отделении от других объектов на основе каких-либо показателей – информативных признаков. Информативные (дешифровочные) признаки для обнаружения объектов при обработке спутниковых снимков подразделяются на две группы: прямые (яркостные, геометрические, текстурные) и косвенные. К настоящему времени проведен ряд научных исследований, имеющих целью построение спектральных образов различных объектов, в том числе и природного происхождения: ASTER Spectral Library, библиотека USGS, исследования Е.Л. Кримова и др.

Для обнаружения, распознавания и контроля объектов растительности с использованием информативных признаков применяются методы визуального дешифрирования, классификации/поиска целевых объектов, субпиксельного распознавания, текстурного анализа, поиска изменений на местности, спектральных преобразований и отношений. 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. Наиболее распространенным показателем, характеризующим состояние растительности, является нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI.

Особенности растительного покрова, состоящего из БС, заключается в следующем. Периоды смены фенологических фаз у БС могут отличаться в зависимости от региона произрастания данного вида растений и погодных условий. Также наблюдается неодновременность смены фенологических фаз у отдельных растений БС при одинаковых условиях. Для ЛО характерен период цветения с конца июня до середины августа, период плодоношения с начала августа до середины сентября. Смена фенологической фазы означает изменение внешнего облика растений и как следствие показателей отражения излучения оптического диапазона.

Несмотря на значимость проблемы контроля зон произрастания БС, в настоящее время исследования по дистанционным методам распознавания БС находятся в своей начальной стадии. Существуют исследования, посвященные распознаванию БС по данным съемки с беспилотного летательного аппарата, а также *Heracleum mantegazzianum* по данным ДЗЗ из космоса и с беспилотных летательных аппаратов. Научных исследований по методам распознавания БС по данным ДЗЗ из космоса в результате проведенного исследования найдено не было, что подчеркивает актуальность настоящей работы.

Второй раздел посвящен выбору исходных спутниковых данных, выбору типа информативных признаков, а также построению информационной модели зон произрастания БС по

данным полевого портативного спектрорадиометра и мультиспектральным спутниковым данным космического аппарата RapidEye для решения задачи контроля зон произрастания БС.

Для контроля зон произрастания БС использовались спутниковые данные высокого и среднего ПР. Для построения модели БС, а также разработки и адаптации способа контроля зон произрастания БС были выбраны данные КА RapidEye (площадь, охватываемая одним пикселем снимка, 42,25 м²), Sentinel-2A (100 м²) и LandSat-8 (900 м²). При этом площадь проективного покрытия единичного растения БС может достигать 10 м², таким образом, выбранные системы ДЗЗ не могут способствовать распознаванию единичного растения БС.

По данным 6 снимков КА RapidEye 2013 года, соответствующих фазам цветения и плодоношения БС, выделены 18 зон произрастания БС на территории ЛО; по данным 4 снимков КА Sentinel-2A 2015-2016 годов – 4 зоны, по данным 4 снимков КА LandSat-8 2014-2015 годов – 8 зон. Выделенные зоны были оконтурены и рассматривались в качестве тестовых участков БС. Для построения информационной модели зон произрастания БС использовались яркостные информативные признаки, соответствующие характеристикам отражения волн оптического диапазона.

По результатам проведения полевых экспедиций в Бугровском сельском поселении 12 июля, 3 августа и 6 сентября 2016 года получены данные измерений полевым портативным спектрорадиометром Spectral Evolution PSR-1100. Для выбранного тестового полигона известно, что участок местности не подвергался химической или механической обработке, т.е. БС произрастает в естественных природных условиях. Измеряемая спектрорадиометром величина – Radiance – спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ); единица измерения – $\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2 \times \text{ср} \times \text{нм}}$. На ее основе рассчитывались коэффициенты спектральной яркости (КСЯ).

Получены результаты полевых измерений для 17 элементов БС в разных фенологических фазах и 4 образцов травянистой растительности. Зона произрастания БС рассматривалась как гетерогенный объект. Это обусловлено наличием совокупности различных структурных элементов БС (листья, соцветия) при анализе его проективного покрытия. Для расчета СПЭЯ и КСЯ гетерогенного объекта в заданном поддиапазоне длин волн оптического излучения предложены следующие расчетные выражения:

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

где λ – длина волны; B_{λ} – СПЭЯ объекта, измеренная для длины волны λ , $B_{0\lambda}$ – СПЭЯ идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и объект, r_{λ} – КСЯ объекта для длины волны λ , s_j – элемент площади проективного покрытия объекта, j – номер элемента площади проективного покрытия объекта.

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

В результате анализа зависимостей показателей СПЭЯ и КСЯ от длины волны электромагнитного излучения для БС и окружающей травянистой растительности 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 листьев;

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

Информационная модель зон произрастания БС также построена по результатам анализа спутниковых данных КА RapidEye. Исходные спутниковые снимки приведены к уровню обработки L1B (радиометрически и геометрически скорректированные данные). По данным КА RapidEye выбраны по 9 эталонных участков зон произрастания БС, соответствующих фенологическим фазам цветения и плодоношения. 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: $M(L)$ – математическое ожидание величины спектральной яркости множества спектральных яркостей пикселей эталонной выборки; $L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ и $s(L)$ – среднеквадратическое отклонение (СКО).

Информационная модель зон произрастания БС, представлена таблично в виде совокупности 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 – таблица 1.

Таблица 1 – Информационная модель зон произрастания БС, построенная по спутниковым снимкам КА RapidEye

Фенологическая фаза БС	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 по сравнению с фазой плодоношения. Полученный результат соответствует результатам измерений полевым портативным спектрометрическим прибором.

Третий раздел посвящен поиску информативных признаков зон произрастания БС по данным космического аппарата RapidEye, разработке вегетационного индекса БС на основе спутниковых данных, разработке способа контроля зон произрастания БС и алгоритма обработ-

ки мультиспектральных спутниковых данных для проведения контроля зон произрастания БС, а также программной реализации разработанного алгоритма.

С целью определения информативных признаков зон произрастания БС проанализированы различия характеристик отражения БС и других типов подстилающей поверхности: сельскохозяйственных полей, смешанных лесов, обнаженного грунта/почвы, болотистой растительности, урбанизированных зон, водных объектов, облачности. Для каждого рассматриваемого спутникового снимка выбраны по 1-2 эталонных участка, соответствующие представленным типам подстилающей поверхности. Для эталонных участков рассчитаны совокупности значений $(M(L), s(L))$.

В результате анализа полученных результатов обработки данных спектрорадиометра и спутниковых снимков выявлены информативные признаки зон произрастания БС вне зависимости от фенологической фазы по спутниковой съемке КА RapidEye:

- 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 для решения задачи распознавания БС.

Таким образом, показатели спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки и модуль разности значений спектральной яркости в синем и зеленом поддиапазонах съемки рассматриваются как информативные признаки в задаче контроля зон произрастания БС по спутниковым данным.

Рассмотрено m -мерное пространство признаков, в котором рассматриваемые классы объектов представляют собой гиперэллипсы с центром в точке, соответствующей значениям математических ожиданий в различных поддиапазонах длин волн и полуосями, заданными СКО. На рисунке 1 приведены эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{|L_{GREEN}-L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$, где L_{GREEN} и L_{BLUE} - спектральная яркость в зеленом и синем поддиапазонах съемки, а L_{NIR} - спектральная яркость в ближнем инфракрасном поддиапазоне съемки. В пространстве признаков $\{|L_{GREEN}-L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$ зоны произрастания БС имеют область пересечения лишь с сельскохозяйственными полями. 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.

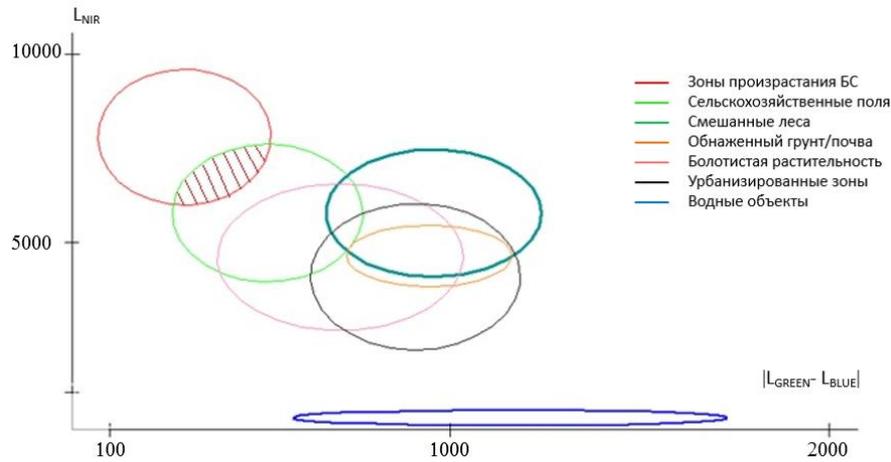


Рисунок 1 – Эталоны выбранных классов объектов в пространстве признаков $\{|L_{GREEN}-L_{BLUE}|, L_{NIR}\}$.

На основе информативных признаков зон произрастания БС разработан спектральный индекс БС - HSI. Исходя из необходимости сокращения влияния атмосферы, межгодовой изменчивости и прочих факторов, выбрана относительная структура индекса:

$$k_{HSI} = \frac{L_{NIR}}{|L_{GREEN} - L_{BLUE}|}, \quad (2)$$

где k_{HSI} – значения индекса HSI.

Для рассмотренных снимков КА RapidEye рассчитан индекс HSI, определены математическое ожидание и дисперсия значений HSI для выбранных тестовых полигонов. В результате анализа полученных данных установлено пороговое значение 30 ед., превышение которого соответствует распознаванию БС.

Распознавание БС проводилось для территорий растительности. В качестве критерия обнаружения растительности применялся индекс NDVI:

$$k_{NDVI} = \frac{L_{NIR} - L_{RED}}{L_{NIR} + L_{RED}}, \quad (3)$$

где L_{RED} - спектральная яркость в красном поддиапазоне съемки. Пороговое значение было определено на уровне 0,3.

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

$$p_i \in x_{расм}, \text{ если } f(p_i, x_{расм}) = K_i - K_{расм} > 0, \quad (4)$$

где p_i – пиксель снимка, $x_{расм}$ – класс «растительность», j – номер признака, n – количество признаков, 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 и вектор пороговых значений K_p , определяемые следующим образом:

$$K = \begin{vmatrix} k_{HSI} \\ k_{NDVI} \end{vmatrix}, \quad K_p = \begin{vmatrix} 30 \\ 0,3 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

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

$$p_i \in x_{BC}, \text{ если } f(p_i, x_{BC}) = \prod_{j=1}^n (K_{ij} - K_{BCj}) > 0, \quad (6)$$

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:

$$D = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,976 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

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

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 (6). 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.

На основе индекса HSI разработана структурная схема алгоритма, реализующего способ контроля зон произрастания БС. Алгоритм обработки спутниковых снимков разработан и программно реализован в среде ERDAS Imagine Professional Model Maker. Исходный спутниковый снимок должен содержать данные как минимум в синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном поддиапазонах спектра. Для каждого пикселя исходных данных в отдельности рассчитываются индексы HSI и NDVI по формулам (2) и (3) соответственно, затем проверяется одновременное превышение заданных порогов. В случае выполнения данного условия пиксель ре-

зультирующего слоя данных результата принимает значение 1, в противном случае – 0. Результат сохраняется на жестком диске компьютера по завершении работы алгоритма в виде растрового изображения.

Четвертый раздел посвящен результатам тестирования разработанного способа контроля зон произрастания БС по спутниковым данным космического аппарата RapidEye, адаптации способа для данных космических аппаратов LandSat-8 и Sentinel-2A, а также определению границ области применения способа и разработке методических рекомендаций.

Разработанный способ контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым снимкам КА RapidEye был протестирован для территории Санкт-Петербурга и ЛО. Суммарная площадь данных субъектов Российской Федерации составляет приблизительно 86,5 тыс. км². Для проведения расчетов использовались безоблачные фрагменты снимков 2013 года (75% исследуемой территории), 2010 года (15%). Таким образом, 10% площади исследуемой территории оказалось покрыто облачностью. Всего использовано 18 снимков, результаты обработки которых объединены в мозаику. На обработанных фрагментах снимков в качестве БС было маркировано 14 780 449 пикселей, что, учитывая ПР снимков, равное 6,5 метров, соответствует площади 624,5 км².

Фрагменты рассмотренных спутниковых снимков КА RapidEye совместно с результатами распознавания БС приведены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Примеры результатов распознавания БС по спутниковым снимкам КА RapidEye (выделено красным):
а) вблизи поселка Разметелево; б) вблизи поселка Яино

Результаты контроля зон произрастания БС по спутниковым данным КА RapidEye по территории ЛО были апробированы по результатам 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. Анализ представленного документа позволяет говорить о качестве результатов применения разработанного способа, удовлетворяющих потребности надзорных организаций.

Разработанный способ контроля зон произрастания БС адаптирован для спутниковых снимков КА LandSat-8 и Sentinel-2A. Отличия их характеристик от снимков КА RapidEye определили необходимость коррекции расчетного выражения индекса HSI.

$$K_{\text{HSI}} = \frac{L_{\text{NIR}}}{|K_s + L_{\text{GREEN}} - L_{\text{BLUE}}|}, \quad (8)$$

где K_s – поправочный коэффициент, постоянный для каждого КА ДЗЗ (для КА RapidEye $K_s=0$). В результате анализа спектральных яркостей эталонных участков зон произрастания БС и сельскохозяйственных полей значение K_s для КА LandSat-8 было установлено равным (-10), для Sentinel-2A – (-250), пороговые значения: 10 и 30 соответственно.

Валидация результатов распознавания БС по мультиспектральным снимкам КА LandSat-8 проводилась путем их сопоставления с результатами обработки спутниковых снимков КА RapidEye, по снимкам Sentinel-2A – сопоставления с результатами обработки спутниковых снимков КА LandSat-8. Площадь пересечения векторных слоев результатов составила 90% и 95% соответственно.

Установлены ограничения на использование разработанного способа, определяемые выборочностью анализируемых исходных спутниковых данных КА RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A, географическими рамками исследуемого региона, а также разработаны практические рекомендации по его использованию.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы были получены следующие основные результаты, имеющие научное и практическое значение:

1. Разработан способ оптического контроля зон произрастания БС в период фазового состояния цветения и плодоношения по мультиспектральным спутниковым данным КА RapidEye, LandSat-8, Sentinel-2A с учетом специфики отражательных характеристик БС в отдельных поддиапазонах.

2. Разработана информационная модель зон произрастания БС на основе свойств электромагнитных волн оптического диапазона, отраженных от БС, по измерениям полевого портативного спектро радиометра и мультиспектральным спутниковым данным в рамках предложенного способа оптического контроля.

3. 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, LandSat-8, Sentinel-2A.

4. Разработаны решающие правила, позволяющее производить обнаружение растительности и распознавание БС по мультиспектральным спутниковым данным с использованием спектральных индексов NDVI и HSI, позволяющие проводить контроль зон произрастания БС

дистанционно с учетом специфики отражательных характеристик БС в отдельных поддиапазонах.

5. Разработано алгоритмическое и ПО для проведения оптического контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным, реализующие предложенный способ оптического контроля.

6. С использованием разработанного способа контроля, алгоритмического и ПО исследовано распространение и изменчивость зон произрастания БС на территории ЛО с помощью одновременных данных космических систем различного ПР (RapidEye, LandSat-8 и Sentinel-2A), что подтверждается экспертной оценкой.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Григорьев, А.Н. 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.

2. 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.

3. Кондратьев, С.А. Идентификация типов подстилающей поверхности для оценивания территорий по данным спутниковой съемки LANDSAT-8 на примере водосбора реки Нарвы / С.А. Кондратьев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев, Е.Ф. Чичкова // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. - СПб. : ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. -№ 653. - С. 121-125.

4. Чичкова, Е.Ф. Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогенной нагрузки на Финский залив / Е.Ф. Чичкова, С.А. Кондратьев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев, М.В. Шмакова // Ученые записки Российского Государственного гидрометеорологического университета. - СПб. : РГГМУ, 2016. - №43. - С. 246-254.

5. Румянцев, В.А., Оценка изменчивости береговой линии Цимлянского водохранилища и озера Ильмень по данным космического зондирования / В.А. Румянцев, Ш.Р. Позняков, В.И. Уличев, Е.Ф. Чичкова, Д.М. Рыжиков // Исследование Земли из космоса. – М. : Наука, 2017. - №1. – С. 35-43.

6. Rumyantsev, V.A. Evaluation of the Variability of the Shoreline of the Tsimlyansk Reservoir and Lake Ilmen according to Space Sounding Data / V.A. Rumyantsev, Sh.R. Pozdnyakov, V.I.

Ulichev, E.F. Chichkova, D.M. Ryzhikov // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2017. - №9. - Pp. 1042-1049.

Статьи в прочих изданиях

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Григорьев, А.Н. Обработка многоспектральной космической информации высокого пространственного разрешения в программной среде ERDAS Imagine, верификация результатов для Северо-Западного региона РФ / А.Н. Григорьев, Е.Ф. Чичкова, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // Сборник тезисов докладов Десятой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – М. : ФГБУН ИКИ РАН, 2012. - С. 136.

11. Чичкова, Е.Ф. Геопортальная технология на основе результатов обработки данных на территорию береговой зоны Печорского моря / Е.Ф. Чичкова, А.Н. Григорьев, В.В. Зайцев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // Применение космических технологий для развития арктических регионов: сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. – С. 270-271.

12. Григорьев, А.Н. Метод выявления изменений подстилающей поверхности по мультитимпленным 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.

13. Чичкова, Е.Ф. Опыт использования геопортальной технологии «Scanex GeoMixer» для геоэкологического мониторинга при решении задач недропользования / Е.Ф. Чичкова, А.Н. Григорьев, В.В. Зайцев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев // «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.

14. 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.

15. Чичкова, Е.Ф. Геопортальная технология для мониторинга опасных геологических процессов / Е.Ф. Чичкова, А.Н. Григорьев, В.В. Зайцев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев, А.Е. Рыбалко, С.Л. Басова // 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.

16. 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.

17. 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.

18. Рыжиков, Д.М. 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.

19. Тимофеев, А.С. Объекты накопленного экологического ущерба в береговой зоне Финского залива (опыт использования спутниковых изображений сверхвысокого пространственного разрешения в полевых работах) / А.С. Тимофеев, Д.М. Рыжиков, Е.С. Спиридонова, С.В. Викторов // 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.