

На правах рукописи

Тимофеев Александр Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АППАРАТНО-
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИНДИКАТОРНЫХ ВИДОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Специальность: 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор
Анатолий Алексеевич Бузников

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Биненко Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор Горохов Владимир Леонидович

Ведущая организация: ГУП Научно-исследовательский институт
космоаэрогеологических методов (НИИ КАМ)

Защита состоится 11 ноября 2009 г. в 15:30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " 7 " октября 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Е.А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Активное развитие России в настоящее время влечет за собой расширение жилищного и производственного комплекса, развитие инфраструктуры. Особенно активно ведется строительство в крупных городах и на прилегающих к ним территориях. Интенсивное строительство и стремительное увеличение количества автотранспорта влекут за собой динамичное изменение экологической обстановки, которая выходит за пределы норм, допустимых для безопасной жизни и деятельности человека и окружающей среды. Чтобы контролировать экологическую обстановку, необходимы недорогие и простые в использовании экспресс-методы оценки состояния окружающей среды, которые позволят своевременно реагировать и устранять загрязнения, превышающие допустимые уровни, представляющие опасность.

Загрязнение одного региона влияет на экологическое состояние соседних территорий. Поэтому, эта проблема имеет международный характер, так как все большее значение приобретает отслеживание и оценка трансграничного переноса загрязнений.

Переход на путь устойчивого развития общества, провозглашенный ООН и принятый Россией в 1996г., предусматривает применение дистанционных методов исследования, на основе которых может проводиться диагностика состояния природных экосистем на больших территориях. В этой связи актуальным является установление и изучение признаков, характеризующих состояние экосистем, и разработка имитационных моделей, адекватно отображающих их эволюцию под влиянием антропогенных воздействий.

Одними из основных поллютантов атмосферы и почвенного покрова мегаполисов являются тяжелые металлы. Они являются активными комплексообразователями, способны к окислительно-восстановительным реакциям, что обуславливает их высокую биологическую активность и токсичное воздействие на живые организмы. Однако, в докладе на заседании ООН в 2007 г. отмечена ограниченность массивов данных по пространственному распределению выбросов тяжелых металлов и полное отсутствие измерений в некоторых районах Европы. В докладе подчеркнута необходимость дальнейших исследований для совершенствования методов получения информации о содержании в окружающей среде тяжелых металлов и продемонстрирована полезность данных с высоким разрешением во времени для понимания расхождений между расчетными параметрами и результатами экспериментальных наблюдений.

Наиболее заметный вклад в ухудшение экологической ситуации вносят металлургическая и химическая промышленность. Такие гиганты, как Североникель (г. Мончегорск), ЛАЭС (г. Сосновый Бор), Сибур Холдинг (г. Москва и др.), Еврохим (г. Москва и др.), ООО НПФ "Балтийская мануфактура" (г. Санкт-Петербург), ООО Петербургский Красный Химик (г. Санкт-Петербург) и т.д. сильно загрязняют окружающую среду отходами производства. Поэтому, в городах, где расположены такие предприятия, широко распространены даже у детей такие серьезные заболевания, как аллергия, астма, дерматит, туберкулез, рак, врожденные патологии, нарушения работы иммунной системы и пр. В связи с этим серьезное внимание стали уделять методам оценки экологической обстановки и борьбе с загрязнениями окружающей среды, в том числе такими поллютантами, как тяжелые металлы.

Целью диссертационной работы является исследование влияния тяжелых металлов на спектральную отражательную способность растений и разработка на этой основе экспресс-метода дистанционной количественной оценки загрязнения городской растительности тяжелыми металлами с помощью спектральной аппаратуры в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

- Исследование влияния тяжелых металлов на спектральную отражательную способность растений.
- Выявление индикаторных видов городской растительности для изучения влияния тяжелых металлов на спектры отражения растений.
- Определение информативных параметров спектра отражения для оценки влияния отдельных тяжелых металлов на растительность.
- Измерение фонового спектра отражения излучения индикаторными видами растительности для оценки состояния природной среды.
- Исследование корреляционно-регрессионной связи информативных оптических параметров с содержанием тяжелых металлов в растениях.
- Разработка метода дистанционной экспресс-оценки загрязнения растительности тяжелыми металлами.
- Разработка аппаратно-программного комплекса для экспресс-оценки степени загрязнения индикаторных видов растений тяжелыми металлами.

Методы исследования и аппаратура. В работе использовались: полевой фотоэлектрический спектрометр ПФС, работающий в видимом диапазоне спектра и новый аппаратно-программный комплекс «Радуга», работающий в видимом и ближнем ИК диапазонах, разработанный и изготовленный нами для реализации задач исследования. Экспериментальные данные обрабатывались статистическими методами. Методы корреляционного анализа использовались для установления корреляций между спектральными параметрами и концентрациями химических соединений в исследуемых растениях. Методы регрессионного анализа применялись при установлении математических зависимостей изменений исследуемых оптических параметров от изменения концентраций тяжелых металлов. Для анализа содержания исследуемых металлов в растениях применялся метод атомно-абсорбционной спектрометрии.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены корреляционные связи и регрессионные зависимости между оптическими параметрами листьев и концентрациями тяжелых металлов в растениях.
2. Установлены индикаторные виды городской растительности: мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.), мятлик луговой (*Poa Pratensis*) для дистанционной экспресс-оценки загрязнения территорий тяжелыми металлами по спектральным информативным параметрам с помощью спектральной аппаратуры.
3. Для дистанционной оценки загрязнения тяжелыми металлами по регрессионным зависимостям каждый индикаторный вид растительности имеет свой, отличный от других набор спектральных информативных параметров: одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.) – R_{550}/R_{620} , R_{550}/R_{485} , R_{550}/R_{620} , R_{450}/R_{735} , R_{435}/R_{500} , R_{435}/R_{620} – для определения содержания Fe, Cu, Zn; мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.) – R_{550}/R_{485} , R_{670}/R_{620} , R_{550}/R_{485} , R_{435}/R_{670} ,

R_{485}/R_{685} – для определения содержания Fe, Mn, Zn; мятлик луговой (*Poa Pratensis*) – R_{670}/R_{620} , R_{435}/R_{670} , R_{435}/R_{635} – для определения содержания Ni, Pb.

4. Разработанный в результате исследования аппаратно-программный комплекс "Радуга" обеспечивает в режиме реального времени оценку загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами по значениям индивидуальных спектральных информативных параметров.

Научная новизна. В процессе проведения исследования получены новые научные результаты:

Впервые по результатам экспериментальных исследований и на основании корреляционного анализа установлены индикаторные виды городской растительности для дистанционной оценки загрязнения тяжелыми металлами: одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.), мятлик луговой (*Poa Pratensis*).

Впервые определены индивидуальные спектральные индексы в виде отношений коэффициентов спектральных яркостей, учитывающие особенности физиологии растений, значения которых связаны с уровнями содержания тяжелых металлов Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, Cd в установленных индикаторных видах городской растительности.

Впервые по результатам экспериментальных наблюдений и на основании комплексной биохимической и геохимической оценок тестовых участков Санкт-Петербурга была выявлена территория, на которой спектр отражения установленных индикаторных видов растительности является фоновым для городских условий, установлены и экспериментально исследованы их фоновые спектральные характеристики.

Разработан новый метод дистанционной количественной экспресс-оценки загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, основанный на измерении индивидуальных спектральных индексов индикаторных видов растительности и определения по их значениям уровня загрязнения в соответствии с корреляционно-регрессионными таблицами.

Разработан аппаратно-программный комплекс "Радуга", реализующий на практике метод дистанционной количественной экспресс-оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами, позволяющий оперативно оценить уровень загрязнения.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы состоит в том, что:

1. Установленные индикаторные виды городской растительности позволяют разрабатывать методы дистанционной экспресс-оценки уровня загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.
2. Установленные индивидуальные спектральные индексы, представляющие собой отношения коэффициентов спектральной яркости позволяют проводить дистанционную количественную оценку содержания тяжелых металлов: Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, Cd в индикаторных видах городской растительности.
3. Установление фоновых спектральных отражательных характеристик индикаторных видов растительности г. Санкт-Петербурга позволяет классифицировать уровни загрязнения для городских условий от "чисто" до "сильное загрязнение" с соответствующими количественными характеристиками (концентрациями металлов).
4. Разработанный новый метод и реализация его в виде аппаратно-программного

комплекса «Радуга» позволяют дистанционно количественно оценивать уровень загрязнения растительности тяжелыми металлами. Заявки на патент на изобретение приняты к рассмотрению патентным бюро РФ (№2009115106 и №2009115097 от 20.04.09). Программная часть комплекса защищена регистрацией в государственном реестре. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Радуга" №2009611157 от 30.12.2008. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Пофос" №2009611158 от 30.12.2008.

Реализация и внедрение результатов исследований:

Теоретические положения, методики расчета и результаты исследований диссертации использованы в 3 НИР, выполненных в течение 2006-2009 гг.:

1. "Исследование и разработка фундаментальных основ и новых методологий дистанционного зондирования природной среды в оптическом и радиодиапазонах электромагнитного спектра". ФИЕТ/КЭОП-35, 2006-2009.
2. "Разработка теоретических основ и исследование нового поколения методов контроля физического состояния материальных, природных объектов и живых организмов в условиях экологического неблагополучия". КЭОП-37, 2007-2009.
3. "Разработка теоретических основ физики и технологии создания систем квантовой и оптической электроники". КЭОП-40, 2009-2010.

Результаты диссертационной работы используются в организациях:

1. Ботаническом институте РАН им. В.Л.Комарова в лаборатории Экологии и растительных сообществ для оценки экологического состояния городских территорий.
2. СПбГУ на кафедре геоэкологии и природопользования факультета географии и геоэкологии в магистерских курсах «Токсическое действие тяжелых металлов на высшие растения» и «Механизмы устойчивости растений к тяжелым металлам».
3. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - в дисциплинах «Оптико-электронные системы дистанционного зондирования» и «Расчет и конструирование лазерных и оптико-электронных систем».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах:

1. XI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика - 2008». 22-24 октября 2008 г. Санкт-Петербург.
2. Пятая Юбилейная Открытая Всероссийская конференция «Дистанционное зондирование Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г.
3. X Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика-2006 (РИ-2006)», Санкт-Петербург, 24-26 октября 2006 г.
4. The VI International Youth Environmental Forum «Ecobaltica'2006», St.-Petersburg, Russia, June 27-29, 2006.
5. Четвертая открытая Всероссийская конференция. Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г.
6. Третья открытая Всероссийская конференция. Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005 г.
7. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20-24, 2005, Saint-Petersburg.
8. Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона», декабрь 2005 г.
9. Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-

Западного региона», декабрь 2006 г.

10. 14-я международная междисциплинарная конференция молодых ученых и специалистов «Человек. Природа. Общество. Актуальные проблемы.». Санкт-Петербург, 8-28 декабря 2005 г.

11. 59-й, 60-й и 61-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава университета (СПбГЭТУ).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 25 работах, из них: 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 2 свидетельства о регистрации программ, 2 заявки на авторские свидетельства на изобретения, принятых к рассмотрению, 5 статей в других изданиях, 13 докладов, получивших одобрение на 10 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения. Она изложена на 109 страницах машинописного текста, включает 31 рисунок, 5 таблиц, 14 страниц приложений и содержит список литературы из 119 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обоснована актуальность проблемы, ее научная новизна, сформулированы цель и задачи работы, приведены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. Кратко рассмотрены основные современные методы, применяемые при оценке экологического состояния растительности по оптическим характеристикам и дан критический анализ этих методов. Отмечено, что основным недостатком абсолютного большинства методов является качественный характер оценки состояния растительности, в то время как основной интерес представляет количественная оценка загрязнения, представляющая собой более сложную проблему. Показано, что методы дистанционного зондирования для оценки состояния окружающей среды являются весьма перспективными из-за высокой скорости получения результата, широты охвата территорий и низкой себестоимости.

В первой главе также рассмотрены физические аспекты дистанционного зондирования состояния растительного покрова и приведен сравнительный обзор основных приборов для спектральных измерений в полевых и лабораторных условиях. В дистанционном зондировании растительного покрова в качестве характеристики исследуемой поверхности обычно используются альbedo или коэффициенты спектральной яркости. Спектральное альbedo A_λ представляет собой отношение величины полусферического потока радиации F_λ^\uparrow , отраженного поверхностью, к падающему на эту поверхность потоку F_λ^\downarrow в некотором интервале длин волн ($\lambda, \lambda + \Delta\lambda$):

$$A_\lambda = \frac{F_\lambda^\uparrow}{F_\lambda^\downarrow} \quad (1)$$

Интегральное альbedo определяется соотношением

$$A = \frac{\int_0^{\infty} F_{\lambda}^{\uparrow} d\lambda}{\int_0^{\infty} F_{\lambda}^{\downarrow} d\lambda} \quad (2)$$

Коэффициент спектральной яркости (КСЯ) поверхности $R_{\lambda}(\vartheta, \varphi)$ в интервале длин волн $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$, в данном направлении и при данных условиях освещения (освещение может быть диффузным или направленным под определенным углом) представляет собой отношение яркости исследуемой поверхности в данном направлении $L_{\lambda}(\vartheta, \varphi)$ к яркости в том же направлении $L_{\lambda}^0(\vartheta, \varphi)$ ортотропной (отражающей по закону Ламберта) полностью отражающей поверхности, находящейся при тех же условиях освещения:

$$R_{\lambda}(\vartheta, \varphi) = \frac{L_{\lambda}(\vartheta, \varphi)}{L_{\lambda}^0(\vartheta, \varphi)} \quad (3)$$

Интегральный коэффициент яркости находится аналогично (2):

$$R(\vartheta, \varphi) = \frac{\int_0^{\infty} L_{\lambda}(\vartheta, \varphi) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\lambda}^0(\vartheta, \varphi) d\lambda} \quad (4)$$

Между спектральным альбедо и коэффициентом спектральной яркости существует известная зависимость

$$A_{\lambda} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} R_{\lambda}(\vartheta, \varphi) \cos \vartheta \sin \varphi d\vartheta d\varphi \quad (5)$$

В наших исследованиях в качестве оптических характеристик растительности использовались КСЯ, так как отношение падающего и отраженного потоков минимизирует влияние изменений освещенности объекта и позволяют сравнивать результаты измерений, проведенных в различных условиях.

Во второй главе проведен анализ воздействия различных факторов на спектры отражения растений. Особое внимание уделено рассмотрению воздействия тяжелых металлов на спектральные характеристики растений, как широко распространенных и серьезных поллютантов окружающей среды в городах. В этой главе также рассмотрено влияние загрязнения на пигменты растений, как основных цветообразующих факторов в видимом диапазоне спектра. Так как основные особенности спектральных характеристик растительности проявляются в видимом (поглощение излучения пигментами) и ближнем ИК (клеточная структура листьев и влагосодержание) диапазонах, то для исследования были выбраны спектральные измерительные приборы, работающие в этих диапазонах.

В качестве основных оптических характеристик растительности при анализе экспериментальных данных использовались *спектральные индексы*, представляющие собой отношения КСЯ на двух различных длинах волн, каждая из которых выбрана с учетом особенностей физиологии растений (рис.1).

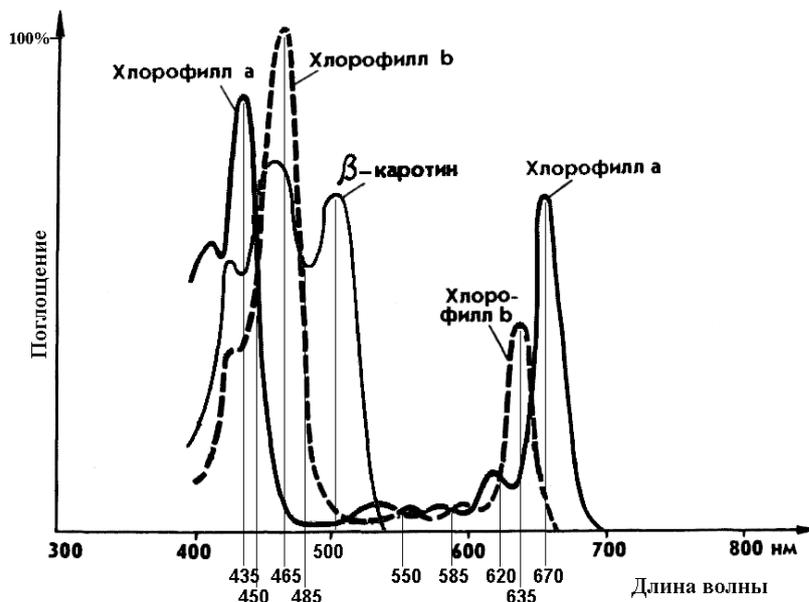


Рис. 1. Спектры поглощения основных пигментов растений по отношению к максимуму поглощения хлорофиллом b и схема выбора длин волн для расчета спектральных индексов.

Длины волн спектральных индексов соответствуют экстремумам в спектре поглощения основных цветообразующих пигментов – хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, β -каротина. Поэтому, при любых изменениях содержания пигментов в результате воздействия тяжелых металлов, спектры отражения растений в первую очередь изменяются на выделенных длинах волн, что позволяет наиболее эффективно диагностировать такое воздействие.

Третья глава посвящена описанию использованной в работе аппаратуры, методик проведения полевых и лабораторных измерений и статистического анализа данных. На начальном этапе исследования для измерений спектров отражения растительности использовался спектрофотометр ПФС, работающий в диапазоне 400-750 нм в разрешении 8 нм. Он представляет собой модификацию спутникового спектрографа РСС-3. Так как диапазон работы прибора не охватывал всю область спектра, где проявляется воздействие тяжелых металлов и относительно низкое разрешение затрудняло изучение особенностей спектров, то для устранения этих недостатков нами был разработан и сконструирован спектрометр «Радуга», удовлетворяющий необходимым требованиям. Диапазон работы спектрометра: 400-1100 нм, разрешение 1 нм. В отличие от ПФС с фотодиодной линейкой из 64 элементов в качестве приемника, на «Радуге» установлена ПЗС-линейка Toshiba TCD1304AP, имеющая 3648 пикселей размером 8x200 мкм. Спектральный диапазон чувствительности приемника 200-1100 нм. Спектрометр «Радуга» сконструирован с использованием модифицированной оптической схемы круга Роуланда. Он снабжен объективом с фокусным расстоянием 58 мм. Вогнутая дифракционная решетка со 120 штр/мм обеспечивает спектральное разрешение не хуже 1 нм и преимущественную концентрацию света в диапазоне 400-1100 нм в первом порядке спектра. Угол поля зрения 12'x5°. Сигнал с приемника обрабатывается микросхемой eZdsp F2802 с цифровым сигнальным процессором TMS320F2808. Связь прибора с персональным компьютером (ноутбуком) осуществляется через порт USB. Спектрометр управляется с персонального компьютера (ноутбука) через специальную программу «Радуга», написанную на языке C++. Программа позволяет установить время интегрирования сигнала и количество последовательно регистрируемых спектров. Измеренные спектры выводятся на экран в виде графиков и в числовом виде. Предусмотрено сохранение данных в текстовом файле или в файле формата MS Excel, изображение спектра - в графическом файле. Программа «Радуга» позволяет анализировать

входные данные и на основе разработанного метода дистанционной экспресс оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами выдает результат в виде информации об уровне загрязнения выбранного вида растительности. Уровням «чисто», «среднее загрязнение» и «сильное загрязнение» соответствуют диапазоны концентрации загрязняющих металлов (см. табл. 2-4). Спектрометр обеспечивает возможность проведения измерений в полевых условиях. Инструментальная погрешность измерений не превышает 3%. Спектрометр и управляющая программа представляют собой аппаратно-программный комплекс «Радуга», в котором реализован разработанный метод дистанционной экспресс-оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами.

Основными методами статистического анализа данных в исследовании являлись корреляционный и регрессионный анализ. Корреляционный анализ проводился с целью установления наличия взаимосвязи между спектральными индексами и концентрациями тяжелых металлов в листьях растений. Величина коэффициента корреляции r оценивалась по формуле:

$$r = \frac{N \sum (x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{N(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{(N-1)\sigma_x \sigma_y}, \quad (6)$$

где N – число элементов выборки, σ – стандартное отклонение. Ошибка вычислений r составила не более 3%. По результатам корреляционного анализа проводился регрессионный анализ с целью исследования наличия и характера зависимости между выделенными спектральными индексами и концентрациями тяжелых металлов. Уравнения регрессии имеют вид $\bar{y}_x = ax^2 + bx + c$, $\bar{y}_x = ax + b$. При установлении регрессионных зависимостей использовался метод наименьших квадратов, минимизирующий сумму отклонений наблюдаемых экспериментальных

значений Y от их математических оценок \bar{Y} : $\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}_k)^2 \rightarrow \min$. В случае

линейной регрессии коэффициенты a и b находятся по формулам:

$$a = \frac{N(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{N(\sum (x^2)) - (\sum x)^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{(\sum (x^2))(\sum y) - (\sum xy)(\sum x)}{N(\sum (x^2)) - (\sum x)^2} \quad (8)$$

Уравнения регрессии для разных тяжелых металлов имеют вид (y - концентрация металла, x - значение спектрального индекса), например: $y=593x+121$ (Zn, одуванчик), $y=117x-68$ (Mn, мать-и-мачеха), $y=136x^2-680x+872$ (Fe, одуванчик).

Корреляционный и регрессионный анализы проводились с использованием программы MS Excel, которая содержит весь необходимый набор статистических характеристик и позволяет получать информацию как в табличном, так и в графическом виде. В результате корреляционного анализа установлены индикаторные виды городской растительности для дистанционной оценки загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами и информативные спектральные индексы для этих видов, по значениям которых производится оценка. Индикаторные виды и спектральные индексы вынесены в положения на

защиту. В результате регрессионного анализа установлены зависимости, позволяющие оценить содержание тяжелых металлов в растениях по значениям спектральных индексов.

В четвертой главе представлены результаты проведенных исследований влияния загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами на спектры отражения городских растений. Сформулирован разработанный метод дистанционной экспресс-оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами, который позволяет количественно оценить уровень загрязнения по спектральным характеристикам.

При избытке тяжелых металлов в окружающей среде происходит аккумуляция их в листьях растений, вызывающая физиолого-биохимические изменения, отражающиеся на спектральных характеристиках растительности. Как показали проведенные исследования, многие виды растительности толерантны к воздействию поллютантов, в том числе тяжелых металлов, поэтому при экологическом мониторинге необходим правильный выбор индикаторного растения.

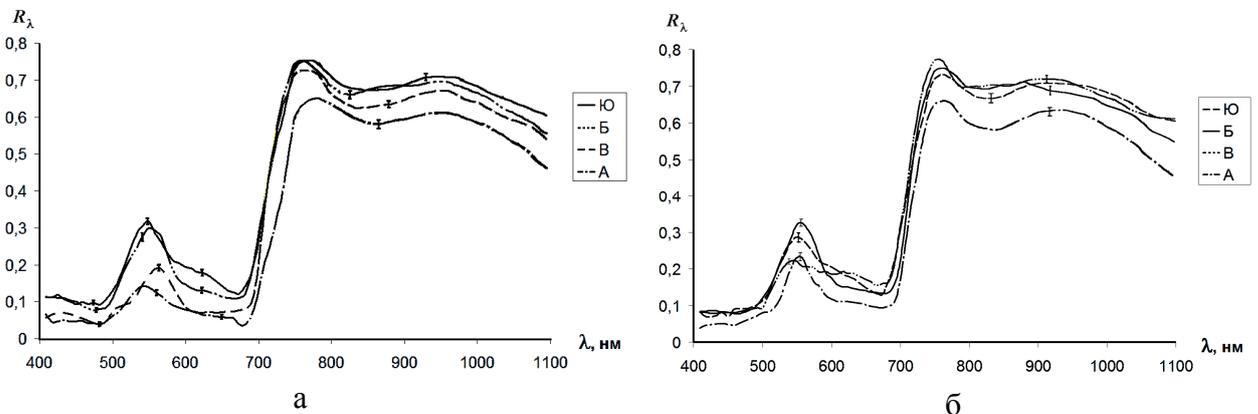


Рис. 2. Спектры КСЯ одуванчика лекарственного (а) и мать-и-мачехи обыкновенной (б) в разных районах (Ю - Юнтолово в Приморском р-не, Б - Ботанический сад в Петроградском р-не, В - Василеостровский р-н, А - Автово, Кировский р-н) с различными уровнями загрязнения (август 2008 г.).

Нами было исследовано влияние тяжелых металлов на спектры отражения *Taraxacum officinale* L. (одуванчик лекарственный), *Tussilago farfara* L. (мать-и-мачеха обыкновенная), *Poa Pratensis* (мятлик луговой) и *Aegoródium podagrária* (сныть обыкновенная). Примеры спектров отражения при разных уровнях загрязнения (табл. 1) приведены на рис. 2.

Таблица 1. Экспериментально измеренные концентрации тяжелых металлов (мг/кг сухого вещества) в листьях растений (август 2008 г.).

вид	район	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd
Одуванчик	Ю	71	28	9	61	1,0	4,2	0,4
	Б	107	17	10	30	1,3	2,7	0,5
	В	53	12	15	48	1,2	2,8	0,4
	А	204	17	18	59	1,2	6,9	0,8
Мать-и-мачеха	Ю	47	29	9	40	1,2	3,9	0,3
	Б	132	14	9	27	1,2	4,4	0,3
	В	160	17	9	77	0,9	4,3	0,2
	А	291	28	17	120	1,6	8,6	0,5

Относительная погрешность измерений не превышала 5%. КСЯ

определялись по формуле: $R_{\lambda} = \frac{I_{\text{отр}} - I_m}{(I_{\text{над}} - I_m)K_{\text{мс}}}$, где I_m – значение темнового тока прибора, $K_{\text{мс}}$ – коэффициент ослабления излучения молочным стеклом. Установлено, что наиболее чувствительными к уровню загрязнения тяжелыми металлами являются первые три вида растений.

Исследование спектральных характеристик растительности велось на основе анализа 20 спектральных индексов, представляющих собой отношения КСЯ R_{λ} на различных длинах волн λ : R_{435}/R_{500} , R_{670}/R_{620} , R_{670}/R_{500} , R_{435}/R_{620} , R_{435}/R_{670} , R_{500}/R_{620} , R_{435}/R_{585} , R_{435}/R_{635} , R_{500}/R_{450} , R_{500}/R_{465} , R_{550}/R_{485} , R_{550}/R_{620} , R_{435}/R_{735} , R_{450}/R_{735} , R_{465}/R_{735} , R_{485}/R_{735} , R_{435}/R_{685} , R_{450}/R_{685} , R_{465}/R_{685} , R_{485}/R_{685} . Перечисленные индексы основаны на физиологических особенностях растений и связаны с характерными длинами волн спектров поглощения основных пигментов (см. рис. 1). Поэтому, они максимально чувствительны к любым изменениям содержания пигментов в листьях и являются основой дистанционной диагностики экологического состояния растительности.

В результате корреляционно-регрессионного анализа по данным многолетних экспериментальных измерений составлены таблицы связи значений спектральных индексов установленных индикаторных видов городских растений с уровнями концентраций в них тяжелых металлов и экологическим состоянием окружающей среды (табл. 2-4). Таблицы представляют собой основу разработанного дистанционного метода, вынесенного на защиту, так как позволяют по измеренным значениям спектральных индексов *бесконтактно* оценить загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами. Приведенные в таблицах спектральные индексы показали устойчивую связь с уровнями содержания соответствующих тяжелых металлов (коэффициент корреляции > 0.7) на протяжении основного периода жизни растений. Для них установлены регрессионные зависимости имеющие вид прямой или параболы. На рис. 3 приведены примеры таких зависимостей.

Таблица 2. Связь значений спектральных индексов одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* L.) с уровнями концентраций тяжелых металлов и экологическим состоянием окружающей среды.

Me	C, мг/кг	экологическое состояние	R_{500}/R_{620}	R_{550}/R_{485}	R_{550}/R_{620}	R_{435}/R_{500}	R_{435}/R_{620}	R_{450}/R_{735}
Fe	<80	чисто	>0.7	>3.5	>1.7			
Fe	80-250	среднее загрязнение	0.7-0.3	3.5-2.5	1.7-1.2			
Fe	>250	сильное загрязнение	<0.3	<2.5	<1.2			
Cu	<10	чисто				>0.8	>0.5	
Cu	10-25	среднее загрязнение				0.8-0.5	0.5-0.2	
Cu	>25	сильное загрязнение				<0.5	<0.2	
Zn	<40	чисто						>0.1
Zn	40-80	среднее загрязнение						0.1-0.05
Zn	>80	сильное загрязнение						<0.05

Таблица 3. Связь значений спектральных индексов мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara* L.) с уровнями концентраций тяжелых металлов и экологическим состоянием окружающей среды.

Me	C, мг/кг	экологическое состояние	R ₅₅₀ /R ₄₈₅	R ₆₇₀ /R ₆₂₀	R ₄₃₅ /R ₆₇₀	R ₄₈₅ /R ₆₈₅
Fe	<100	Чисто	>3.5	<0.7		
Fe	100-400	среднее загрязнение	3.5-2.5	0.7-1		
Fe	>400	сильное загрязнение	<2.5	>1		
Mn	<40	Чисто			<0.8	<0.8
Mn	40-120	среднее загрязнение			0.8-1	0.8-1.4
Mn	>120	сильное загрязнение			>1	>1.4
Zn	<80	Чисто	<4			
Zn	80-250	среднее загрязнение	4-6			
Zn	>250	сильное загрязнение	>6			

На основе данных полевых измерений и лабораторных химических анализов на содержание тяжелых металлов, а также оценки физиологического состояния, для каждого из перечисленных выше растений были установлены диапазоны концентраций металлов, соответствующие различным уровням загрязнения по сравнению с "фоновой" территорией ("чисто", "среднее загрязнение", "сильное загрязнение").

Таблица 4. Связь значений спектральных индексов мятлика лугового (*Poa Pratensis*) с уровнями концентраций тяжелых металлов и экологическим состоянием окружающей среды.

Me	C, мг/кг	экологическое состояние	R ₆₇₀ /R ₆₂₀	R ₄₃₅ /R ₆₇₀	R ₄₃₅ /R ₆₃₅
Ni	<1	Чисто	>0.9		
Ni	1-3	среднее загрязнение	0.9-0.7		
Ni	>3	сильное загрязнение	<0.7		
Pb	<2	Чисто		>0,8	>0,9
Pb	2-10	среднее загрязнение		0,8-0,55	0,9-0,5
Pb	>10	сильное загрязнение		<0,55	<0,5

В результате исследования было установлено, что территория Юнтоловского заказника в Приморском районе г. Санкт-Петербурга является "фоновой" для города. Таким образом, уровням загрязнения через регрессионные зависимости соответствуют диапазоны изменений спектральных индексов. Это позволяет решить «обратную задачу» определения концентраций по спектрам отражения и сформулировать метод дистанционной экспресс-оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами.

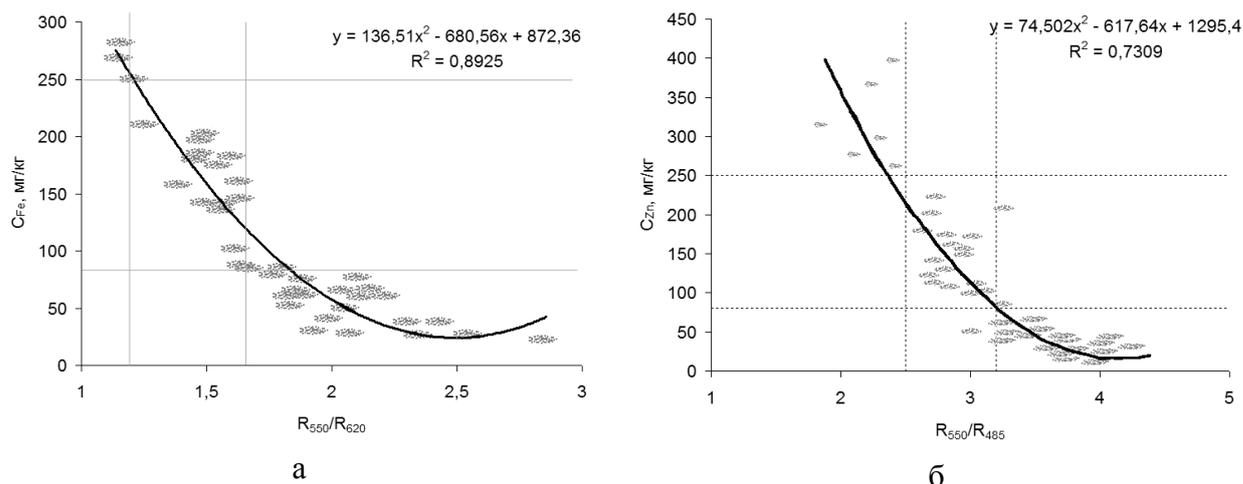


Рис. 3. Регрессионные зависимости спектрального индекса R_{550}/R_{620} от концентрации железа в одуванчике лекарственном (а) и R_{550}/R_{485} от концентрации цинка в мать-и-мачехе обыкновенной (б).

В результате проведенного исследования нами разработан метод дистанционной экспресс-оценки загрязнения городской растительности тяжелыми металлами, который состоит из следующих этапов:

1. Для экспресс-оценки загрязнения растительности тяжелыми металлами необходимо использовать один из следующих видов растительности:

- Одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.) – для оценки загрязнения Fe, Cu, Zn и их соединениями;

- Мать-и-мачеху обыкновенную (*Tussilago farfara* L.) - для оценки загрязнения Fe, Mn, Zn и их соединениями;

- Мятлик луговой (*Poa Pratensis*) - для оценки загрязнения Ni, Pb и их соединениями.

Применение двух или трех видов растительности увеличивает степень достоверности оценки.

2. Выбор тестового участка с индикаторным видом растительности.

3. Измерение коэффициентов спектральных яркостей листьев индикаторного вида растительности и вычисление спектральных индексов, установленных в данной работе и приведенных в табл.2-4.

4. Оценка уровня содержания тяжелых металлов по эталонным таблицам 2-4, составленным в результате проведенного исследования.

Для реализации метода разработан аппаратно-программный комплекс «Радуга» состоящий из спектрометра и управляющей программы (рис. 4). Для съемки спектров необходимо предварительно указать время интегрирования сигнала. После измерения спектров отраженного и падающего излучений программа рассчитывает спектры КСЯ, вычисляет спектральные индексы и в зависимости от выбора оператором индикаторного растения показывает результат анализа загрязнения для каждого из предусмотренных тяжелых металлов в соответствии с табл. 2-4 в виде «чисто», «среднее загрязнение» или «сильное загрязнение». Такая реализация метода позволяет дистанционно оценивать загрязнение индикаторных видов растительности тяжелыми металлами.

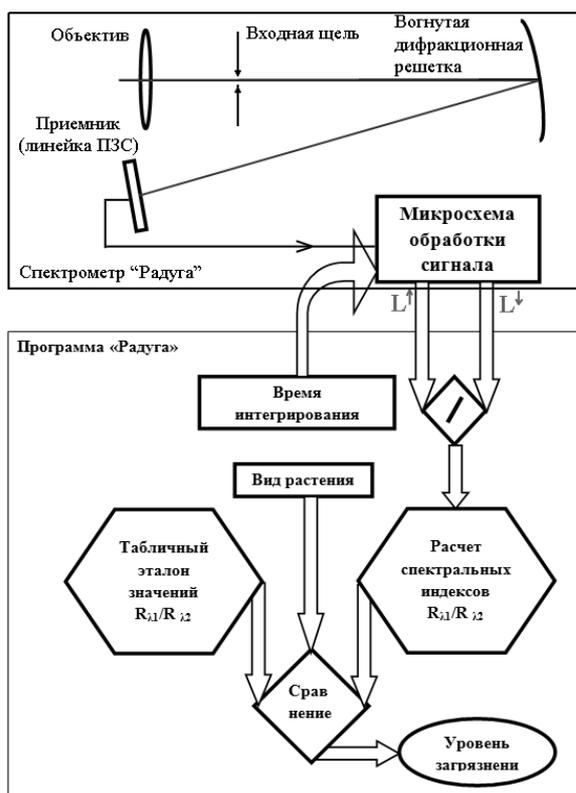


Рис. 4. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса "Радуга"

R_{550}/R_{485} , R_{550}/R_{620} , R_{450}/R_{735} , R_{435}/R_{500} , R_{435}/R_{620} для определения содержания Fe, Cu, Zn в листьях одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* L.); R_{550}/R_{485} , R_{670}/R_{620} , R_{550}/R_{485} , R_{435}/R_{670} , R_{485}/R_{685} для определения содержания Fe, Mn, Zn в листьях мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara* L.); R_{670}/R_{620} , R_{435}/R_{670} , R_{435}/R_{635} для определения содержания Ni, Pb в листьях мятлика лугового (*Poa Pratensis*).

Установлены фоновые для городских условий спектры индикаторных видов для возможности сравнительной оценки состояния природной среды.

В результате исследования составлены таблицы зависимостей значений спектральных индексов индикаторных видов от уровней концентраций тяжелых металлов и экологического состояния окружающей среды, являющихся основой метода дистанционной диагностики загрязнения.

Разработан метод дистанционной оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами с помощью спектральной аппаратуры.

Разработанный метод реализован в виде аппаратно-программного комплекса «Радуга», позволяющего дистанционно в режиме реального времени производить оценку загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами через измерение спектров отражения растительности в диапазоне 400-1100 нм с разрешением 1 нм, обработку измеренных спектров, расчет спектральных индексов и сравнение их с табличными эталонами, разработанными в результате исследования.

Заключение

В результате выполнения работы проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния тяжелых металлов на спектральную отражательную способность растений.

Установлены индикаторные виды городской растительности для дистанционной экспресс-оценки загрязнения территорий тяжелыми металлами с помощью спектральной аппаратуры: мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.), мятлик луговой (*Poa Pratensis*).

В результате корреляционно-регрессионного анализа установлены спектральные индексы для индикаторных видов растительности, характеризующие уровни содержания в них тяжелых металлов: R_{550}/R_{620} ,

Публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Особенности спектральной аппаратуры для проведения полевых исследований растительности [Текст] / А.А. Тимофеев, А.А. Бузников, А.В. Андреева, А.В. Буданов, А.Л. Есипов // Естественные и технические науки. - М. : Компания Спутник+. 2009. – №2. - С.298-301.

2. Спектральные исследования техногенной нагрузки на растительность мегаполисов [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // Известия государственного электротехнического университета. - СПб., 2006. - Вып.1. - С.31-38.

3. Исследование корреляционных зависимостей между оптическими характеристиками природных вод и их экологическим состоянием [Текст] / А.А. Тимофеев, А.А. Бузников, А.В. Буданов, А.Л. Есипов и др. // Известия государственного электротехнического университета. - СПб., 2005. - Вып.1. - С.51-60.

Другие статьи:

4. Исследование влияния тяжелых металлов на оптические характеристики растительности [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // Известия государственного электротехнического университета. - СПб., 2007. - Вып.1. - С.39-46.

5. Исследование характера изменения оптических характеристик растительности под воздействием тяжелых металлов для разработки метода дистанционной диагностики загрязнения [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. – М.: ООО «Азбука-2000», 2007. - Том II, Вып.4. - С.175-182.

6. Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников, Н.В. Алексеева-Попова, А.И. Беляева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. – М.: ООО «Азбука-2000», 2006. - Том II, Вып.3. – С.265-270.

7. Использование спектров отражения индикаторных видов растительности для оценки экологического состояния окружающей среды [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников // Человек. Природа. Общество. Актуальные проблемы – 14. Материалы международной конференции молодых ученых 8-28 декабря 2006 г. - СПб., 2006. - С.955-958.

8. Связь оптических характеристик с экологическим состоянием природных вод [Текст] / А.А. Тимофеев, А.А. Бузников, А.В. Андреева, и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. – М.: ООО «Азбука-2000», 2006. - Том II, Вып.3. - С.155-160.

9. Диагностика загрязнений растительности тяжелыми металлами на основе спектральной информации. [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников

// Материалы XI Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика - 2008». 22-24 октября 2008 г. - СПб., 2008. - С.281.

10. Применение спектрометра с ПЗС-линейкой для исследования загрязнения растительности тяжелыми металлами. [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников // Материалы XI Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика - 2008». 22-24 октября 2008 г. - СПб., 2008. - С.282.

11. Дистанционный мониторинг загрязнения окружающей среды по спектрам отражения растительности [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // Пятая Юбилейная Открытая Всероссийская конференция «Дистанционное зондирование Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2007 г. Тезисы доклада.

12. Исследование характера изменения оптических характеристик растительности под воздействием тяжелых металлов для разработки метода дистанционной диагностики загрязнения [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // Четвёртая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г. Тезисы доклада.

13. Research influence of heavy metals on indicator plants of St.-Petersburg (Исследование влияния тяжелых металлов на индикаторные виды растений Санкт-Петербурга) [Текст] / А.А. Timofeev, A.V. Andreeva, A.A. Buznikov, N.V. Alexeeva-Popova, A.I. Belyaeva // The VI International Youth Environmental Forum «Ecobaltica'2006», Book of Proceedings. - St.-Petersburg, Russia, June 27-29, 2006. pp.76-77.

14. Применение информации об оптических характеристиках растительности для оценки уровня загрязнения тяжелыми металлами». [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // X Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика-2006 (РИ-2006)», Санкт-Петербург, 24-26 октября 2006 г. Материалы конференции. – СПб.: СПОИСУ, 2006. - С.259-260.

15. Исследование спектральных свойств природных объектов для дистанционного контроля их экологического состояния [Текст] / А.А. Тимофеев // Одиннадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации работ по грантам конкурса 2006 года для студентов и аспирантов вузов и академических институтов Санкт-Петербурга. - СПб., 2006. - С.37.

16. Разработка метода оценки экологического состояния природной среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности Санкт-Петербурга [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференций политехнического симпозиума. Декабрь 2006 года. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. - С.29-30.

17. Определение экологического состояния природных образований по их спектральным характеристикам [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы семинаров политехнического симпозиума. Декабрь 2005 года. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. - С.22-23.

18. Дистанционное зондирование растительности в оптическом диапазоне для оценки уровня загрязнения тяжелыми металлами [Текст] / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников и др. // Аэрокосмические методы и геоинформационные

технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады IV Международной конференции (Москва, 17-19 апреля 2007 г.). – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. - С.87-88.

19. Influence of natural waters components on reflect spectra of solar radiation (Влияние компонентов природных вод на спектр отражения солнечного излучения) [Текст] / А.А. Timofeev, А.А. Buznikov, А.В. Andreeva // The VI International Youth Environmental Forum «Ecobaltica'2006», St.-Petersburg, Russia, June 27-29, 2006. Book of Proceedings. - pp.92-94.

20. Связь оптических характеристик с экологическим состоянием природных вод [Текст] / А.А. Тимофеев, А.А. Бузников, А.В. Буданов, А.Л. Есипов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Третья открытая Всероссийская конференция. Москва, 14-17 ноября 2005 г. - М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2005 г. - С.36.

21. The Investigation of Correlation Functions Between Water Quality Parameters and Uprising Radiation (Исследование корреляций между параметрами качества воды и отраженным излучением) [Текст] / А.А. Timofeev, А.А. Buznikov, А.В. Budanov, А.Л. Esipov et al. // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20-24, 2005, Saint-Petersburg, thesis of report.

Заявки на изобретение:

22. Способ оценки экологического состояния окружающей среды / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников, Н.В. Алексеева-Попова, И.В. Дроздова // Заявка на патент на изобретение №2009115106 от 20.04.09. Принята к рассмотрению.

23. Способ оценки экологического состояния окружающей среды / А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.А. Бузников, Н.В. Алексеева-Попова, И.В. Дроздова // Заявка на патент на изобретение №2009115097 от 20.04.09. Принята к рассмотрению.

Свидетельства о регистрации программ:

24. А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.Л. Есипов, А.В. Буданов, А.А. Бузников. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Радуга" №2009611157 от 30.12.2008.

25. А.А. Тимофеев, А.В. Андреева, А.Л. Есипов, А.В. Буданов, А.А. Бузников. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Пофос" №2009611158 от 30.12.2008.