

На правах рукописи

Тимченко Елена Владимировна

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ  
СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ**

Специальность 01.04.05 – «Оптика»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Самара - 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре автоматических систем энергетических установок

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Захаров Валерий Павлович

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Павельев Владимир Сергеевич  
кандидат физико-математических наук,  
заслуженный работник науки и образования  
РФ Башкатов Алексей Николаевич

Ведущая организация: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет»

Защита состоится 17 апреля 2009 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 16 марта 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
профессор

В.Г. Шахов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Одним из бурно развивающихся направлений современной оптики является биооптика и, в частности, оптика растительных сред. Интерес к данному направлению связан как с возможностью получения целостной информации о состоянии всей биологической системы по ее оптическим характеристикам и кинетике их изменения, так и с возможностью применения оптических методов для дистанционного контроля растительности, учета и оптимизации производства сельскохозяйственной продукции. Наиболее широко применяемыми оптическими методами контроля состояния растений являются метод обратного рассеяния, метод комбинационного рассеяния, абсорбционный метод и флуоресцентный анализ. Фактически метод обратного рассеяния, также как и абсорбционный метод, использует различия в спектрах поглощения химических компонент растительной ткани, однако, в отличие от последнего, он позволяет осуществлять дистанционные измерения. Дж.Роузом (1974), А. Хьюитом (1988, 1998), М.Н. Мерзляком и А.Гительсоном (1979, 2003), В.В.Козодеровым (1986, 2006), В.А.Головко и Т.В.Кондраниным (2003, 2007) и рядом других авторов для определения концентрации хлорофилла были введены оптические коэффициенты (вегетационные индексы), использующие отношения интенсивностей обратного рассеяния в видимой и ИК-областях спектра. Применение данных коэффициентов хорошо зарекомендовало себя для оценки объема зеленой биомассы по данным дистанционного зондирования Земли из космоса.

Более детальная информация может быть получена с помощью модуляционной флуорометрии. Однако данный метод применим преимущественно в лабораторных условиях. Для дистанционного лазерно-индуцированного флуоресцентного анализа используют отношение длинноволнового и коротковолнового пиков интенсивностей флуоресценции (А.И.Гришин, Г.Г.Матвиенко 2000, 2007), наличие которых обусловлено различием в спектральных свойствах хлорофиллов а и b, а также фотосистем 1 и 2.

В условиях городской среды растения подвергаются воздействию антропогенных факторов, причем наибольшее влияние оказывают окиси углерода, азота, серы, являющиеся основными химическими компонентами выхлопов двигателей внутреннего сгорания, выбросы которых составляют более 65% от общего объема валовых выбросов. Атмосферные антропогенные вещества оказывают комбинированное многофакторное воздействие, которое может приводить к существенной экологической нагрузке на биологические объекты даже при соблюдении норм по каждому отдельно взятому загрязнителю. Учитывая, что листья растений являются наиболее чувствительными к действию атмосферных загрязнителей, древесные культуры могут быть использованы как «живые датчики» экологического состояния биосферы, а их оптические характеристики служить количественной мерой состояния окружающей среды.

В связи с этим одной из актуальных проблем является разработка и развитие оптических методов контроля состояния растений в условиях внешних воздействий, что и является целью работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать оптические характеристики растений в естественных условиях и при воздействии внешних естественных и антропогенных факторов, и определить их взаимосвязь с изменением концентрационного состава основных пигментов, участвующих в фотосинтетической цепи растения.

- Развить математическую модель взаимодействия оптического излучения с растительной тканью для определения функциональной зависимости оптических коэффициентов от биофизических параметров растения.

- Определить корреляцию оптических и биофизических параметров основных сельскохозяйственных культур при активном внешнем воздействии (внесении удобрений) в различные периоды вегетации.

- Исследовать степень влияния антропогенных факторов окружающей среды на изменение спектральных характеристики растительной ткани с помощью развитых дифференциальных методов.

### Методы исследования:

Для решения поставленных задач были использованы комплексный подход, сочетающий в себе математическое моделирование взаимодействия оптического излучения с растительной тканью, экспериментально реализованные оптические методы контроля – обратного рассеяния и флуоресценции, а также биохимические методы анализа природных пигментов.

### Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель взаимодействия оптического излучения с растительной тканью, основанная на представлении ткани в виде сплошной трехслойной многократно рассеивающей среды с учетом спектральных характеристик основных светопоглощающих пигментов.

2. Введены дифференциальные коэффициенты, определенные как отношения коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 750 нм и 550 нм и флуоресценции на длинах волн 740 нм и 684 нм к их значениям в отсутствие загрязнителей, позволяющие выделить зависимость оптических характеристик растений от концентрации внешних загрязнителей на фоне их естественного изменения за счет старения и влияния климатических условий.

3. Экспериментально установлена функциональная связь между дифференциальными оптическими коэффициентами и интегральной величиной суммарной концентрации антропогенных веществ.

4. Предложен оптический метод экологического картографирования территорий, использующий установленные функциональные зависимости.

### Практическая ценность работы:

1. Установленные функциональные зависимости изменения коэффициентов обратного рассеяния и флуоресценции от концентрации антропогенных веществ в окружающей атмосфере позволили предложить оптический метод экологического картографирования территории города.

2. Полученные результаты исследований могут быть использованы для оптического контроля состояния сельскохозяйственных растений в полевых условиях и оптимизации его минерального питания (внесения удобрений)

для роста и развития растений.

#### На защиту выносятся:

1. Математическая модель взаимодействия оптического излучения с растительной тканью, основанная на методе Монте-Карло и на представлении ткани в виде сплошной трехслойной многократно рассеивающей среды с учетом спектральных характеристик основных пигментов в каждом слое. Модель описывает экспериментальные спектральные зависимости интенсивности обратного рассеяния от концентрации хлорофилла со среднеквадратичной погрешностью не превышающей 10%

2. Дифференциальные коэффициенты обратного рассеяния и флуоресценции, которые позволяют определить изменение оптических характеристик растений под влиянием атмосферных загрязнителей.

3. Оптический метод экологического картографирования территорий, основанный на экспериментально установленной зависимости изменения дифференциальных коэффициентов от интегральной величины концентрации антропогенных веществ, характерных для выхлопов двигателей внутреннего сгорания (CO, NO<sub>2</sub>).

#### Достоверность результатов диссертационной работы:

Научные положения и выводы, сделанные в диссертационной работе, следуют из адекватности используемых физических, математических и биологических моделей и методов, что подтверждается сравнением с результатами экспериментальных наблюдений, полученных с помощью биохимического метода Брагинского.

#### Апробация работы:

Результаты работы обсуждались на семинарах Самарского филиала Физического института академии наук имени П.Н. Лебедева (СФ ФИАН) и докладывались на 15-ти международных, 2-х всероссийских и 2-х региональных конференциях: Saratov Fall Meeting-2003, 2004, 2006 (Saratov, Russia, 2003-2006 гг.), IV-VII Международная научно-техническая конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» (г. Нижний Новгород, г. Волгоград, г. Казань, г. Самара, 2004-2008 гг.); Международная конференция «Лазеры, измерения, информация» (г. Санкт-Петербург, 2006-2008); International Conference on Laser Applications in Life Sciences LALS'07 (Moscow, Russia, 2007); 15<sup>th</sup> International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'07 (Levi, Finland, 2007); 15-ая, 16-ая Международная конференция «Высокие технологии в медицине, биологии и геоэкологии», (г.Новороссийск, 2007-2008 гг.); Topical Meeting on Optoinformatics'2008 (St.Peterburg, Russia, 2008); International conference advanced laser technology ALT'08, (Hungary, 2008), I-ая, III-ая Троицкая конференция по медицинской физике (г.Троицк, Московская обл., 2004г., 2006г.); II-IV Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике (г.Самара, 2004-2006 гг.).

Публикации: Материалы, отражающие основное содержание диссертации, опубликованы в 26 научных работах, в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых научных изданиях.

#### Структура и объем диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения и изложена на 117 страницах. Работа содержит 11 таблиц и 57 рисунков,

список цитируемой литературы включает 218 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложена цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы, показана научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе определен объект исследования. Проанализированы строение и оптические характеристики растений, оптические методы, описывающие изменение концентрации светопоглощающих пигментов в листе высших растений. На основе сравнительного анализа вегетационных индексов в различных формах представления показано, что одним из наиболее эффективных для контроля состояния растения является коэффициент обратного рассеяния, предложенный М.Н. Мерзляком и А.Гительсоном (1979):

$$K = \frac{R_{750}}{R_{550}} \quad (1)$$

где  $R_{750}$  и  $R_{550}$  - коэффициенты отражения на длинах волн 750 нм и 550 нм соответственно. Это связано с пропорциональностью коэффициента (1) суммарной концентрации хлорофиллов и отсутствием в области 550 нм полос поглощения других светопоглощающих пигментов. А коэффициент индуцированной флуоресценции, возбуждаемой лазером на длине волны  $\lambda$ , может быть задан в виде

$$F_{\lambda} = \frac{J_{740}}{J_{684}} \quad (2)$$

отношения пиков интенсивностей флуоресценции  $J_{740}$  и  $J_{684}$  на длинах волн 740 нм и 684 нм соответственно.

Распространение оптического излучения в растительной ткани представляет собой комплексные процессы поглощения, многократного рассеяния и флуоресценции, зависящие от биохимического состава и морфологических свойств разных слоев растительной ткани. Учитывая, что растительная ткань обладает большим альбедо ( $\Lambda > 0.9$ ), ее можно представить в виде планарной многократно рассеивающей сплошной среды с неоднородно распределенными коэффициентами поглощения  $\mu_a(\vec{r}, \lambda)$  и рассеяния  $\mu_s(\vec{r}, \lambda)$ . Для планарной модели растительной ткани распределение спектральной плотности лучевой интенсивности  $I$  в точке  $\vec{r}$  в направлении  $\vec{s}$  может быть описано транспортным уравнением переноса (ТПИ):

$$(\vec{s}\nabla)I(\vec{r}, \vec{s}, \lambda) = -\mu(\vec{r}, \lambda)I(\vec{r}, \vec{s}, \lambda) + \frac{\mu_s(\vec{r}, \lambda)}{4\pi} \int \rho_s(\vec{s}, \vec{s}')I(\vec{r}, \vec{s}', \lambda) d\Omega + \chi(\vec{r}, \vec{s}, \lambda, \lambda_i) \quad (3)$$

где первый член описывает затухание лучевого потока  $I(\vec{r}, \vec{s}, \lambda)$  с коэф-

фициентом  $\mu = \mu_a + \mu_s$ ; второй член обусловлен приростом потока излучения за счет рассеянного излучения, распространяющегося по всем другим направлениям  $\vec{s}'$ ;  $p_s(\vec{s} \cdot \vec{s}')$  - фазовая функция рассеяния, а  $\chi(\vec{r}, \vec{s}, \lambda, \lambda_i)$  определяет вклад от внутренних источников (флуоресценции), наличие которых связано с распределенными в среде пигментами.

Коэффициент рассеяния  $\mu_s$  определяется, прежде всего, структурой и топологией растительной ткани, т.е. конфигурацией и пространственной локализацией клеток ткани и пигмент-белковых комплексов. В связи с чем, он считался постоянным в пределах слоя. Спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\mu_a$  определяется пространственным распределением химических компонент среды, вносящим существенный вклад в поглощение на длине волны  $\lambda$ , т.е. определяется, прежде всего, концентрацией светопоглощающих пигментов и их спектральными свойствами:

$$\mu_a(\vec{r}, \lambda) = \mu_{a0}(\vec{r}, \lambda) + \sum_{i=1}^n \alpha_i(\vec{r}, \lambda) C_i(\vec{r}) \quad (4)$$

где  $C_i(\vec{r})$  - концентрация  $i$ -ой химической компоненты,  $\alpha_i(\vec{r}, \lambda)$  - спектрально-зависимый молярный коэффициент поглощения, а  $\mu_{a0}$  - вклад неучтенных компонент среды. Основными составляющими растительной ткани, входящими в сумму выражения (4), являются вода, лигнин, белок, целлюлоза, гемицеллюлоза и светопоглощающие пигменты: хлорофилл а ( $C_a$ ), хлорофилл б ( $C_b$ ), каротиноиды, антоцианы. Неучтенные компоненты среды (крахмал, сахар, продукты метаболизма фотосинтеза и другие) имеют слабую зависимость от длины волны в видимой области спектра, что позволяет считать  $\mu_{a0}$  только функцией координат.

Решение интегро-дифференциального уравнения переноса (3) возможно только численными методами. Однако для качественной оценки функциональных зависимостей оптических коэффициентов (1) и (2) можно воспользоваться первым приближением решения ТПИ. В данном приближении решение имеет следующий вид:

$$K \approx k_0 + k_c \cdot C_{a+b}, \quad F \approx \frac{\eta_f(740)}{\eta_f(684)} \cdot (f_0 + f_1 \cdot C_a + f_2 \cdot C_b) \quad (5)$$

где  $\eta_f(\lambda)$  - квантовый выход флуоресценции на длине волны  $\lambda$ ,  $f_i$  - постоянные коэффициенты,  $C_{a+b} = C_a + C_b$  - суммарная концентрация хлорофиллов в листе,  $k_1 \sim (\alpha_a(550) + \alpha_b(550))$ , а  $k_0$  определяется разностью молярных коэффициентов поглощения воды, лигнина и целлюлозы на длинах волн 550 нм и 750 нм и в отсутствие водяного стресса близок к единице. Видно, что коэффициент обратного рассеяния линейно зависит от суммарной концентрации хлорофиллов обеих форм, а коэффициент флуо-

ресценции является их линейной комбинацией. Данные зависимости качественно правильно отражают экспериментально наблюдаемые результаты.

Из биофизических исследований следует, что влияние внешних факторов (прежде всего антропогенных веществ) приводит к изменению, как концентраций светопоглощающих пигментов, так и характерных времен релаксации возбуждения хлорофилла, эффективности флуоресценции. Изменение размеров, формы, плотности клеток и влагосохранения в них под действием стресса может приводить к изменению коэффициента рассеяния  $\mu_s$  и, как следствие, изменению коэффициента обратного рассеяния  $K$  за счет увеличения среднего оптического пути лучей в растительной ткани. Учитывая медленность изменения оптических коэффициентов среды от указанных параметров, данная зависимость носит параметрический вид

$$\mu_a(t) = \mu_a(t, \{T\}, \{C_k^*\}), \quad \mu_s(t) = \mu_s(t, \{T\}, \{C_k^*\}), \quad \eta_f(t) = \eta_f(t, \{T\}, \{C_k^*\}) \quad (6)$$

где время  $t$  - отражает изменение данных параметров вследствие естественного жизненного цикла растения,  $\{T\}$  - учитывает влияние климатических факторов (прежде всего температуры и влажности), а  $\{C^*\}$  - параметрическую зависимость от концентрации атмосферных загрязнителей. Следовательно, в общем случае оптические коэффициенты являются сложной неявной функцией естественных и внешних воздействующих факторов. Из вида выражений (5) следует, что данная функция факторизуется, по крайней мере, для случая относительно малых концентраций загрязнителей  $C^*$ , т.е. отсутствия залповых выбросов. Тогда, для «вычленения» параметрической зависимости оптических коэффициентов только от концентрации загрязнителей (минерального питания) удобно ввести дифференциальные коэффициенты

$$\Delta_2 \bar{K} = \frac{K(t, \{T\}, 0) - K(t, \{T\}, \{C_k^*\})}{K(t, \{T\}, 0)}, \quad \Delta_2 F = \frac{F(t, \{T\}, 0) - F(t, \{T\}, \{C_k^*\})}{F(t, \{T\}, 0)} \quad (7)$$

по сути являющиеся отношением экспериментально измеренных оптических коэффициентов к их значениям в условиях отсутствия загрязнителей (минерального питания), т.е. соответствующих естественным условиям. Дифференциальные коэффициенты наиболее целесообразно применять при контроле состояния растений на достаточной большой территории, где заведомо можно выделить участок слабо подверженный воздействию антропогенных факторов. Для уменьшения статистического разброса наряду с формулой (7) удобно использовать дифференциальные коэффициенты

$$\Delta_1 F = \frac{F(t, \{T\}, \{C_k^*\})}{F(0, \{T\}, \{C_k^*\})} \cdot \left( \frac{F(t, \{T\}, 0)}{F(0, \{T\}, 0)} \right)^{-1}, \quad \Delta_1 \bar{K} = \frac{K(t, \{T\}, \{C_k^*\})}{K(0, \{T\}, \{C_k^*\})} \cdot \left( \frac{K(t, \{T\}, 0)}{K(0, \{T\}, 0)} \right)^{-1}, \quad (8)$$

которые фактически выражают прирост или деградацию оптического коэффициента при антропологическом стрессе на фоне изменений, связанных с климатическими условиями.

В первом параграфе второй главы представлена численная реализация математической модели с использованием статистического алгоритма Монте-Карло для трехслойной модели листа (верхний и нижний эпидермис, паренхима) с использованием фазовой функции Хенги-Гринштейна. Коэф-

коэффициент преломления слоев считался согласованным, а каждый слой определялся набором феноменологических параметров  $(\mu_a, \mu_s, g)$ , где спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\mu_a$  определялась выражением (4) и была восстановлена на основании анализа экспериментальных данных, фактор анизотропии  $g$  принимался равным 0,8, а коэффициент рассеяния  $\mu_s$  определялся на основании экспериментальных данных, соответствующих минимальной концентрации хлорофилла в листе. Численная реализация математической модели позволила рассчитать спектральное распределение интенсивности рассеянного назад излучения для различных сортов растений, корректно описывающее экспериментально наблюдаемое распределение.

Расчетная зависимость коэффициента отражения  $R$  от толщины листа (сорта растения) представлена на рисунке 1. Видно, что данная зависимость носит слабонарастающий характер вплоть до значений толщин  $d = 500$  мкм в ИК-области спектра и до 600 мкм в видимой части спектра. Однако наиболее существенное изменение наблюдается для толщин 100..200 мкм, характерных для двудольных растений (береза, клен и другие). Подобное поведение объясняется тем, что наибольший вклад в интенсивность обратного рассеяния вносит верхние слои паренхимы. Следовательно, для растений с большими характерными толщинами практически весь вклад в обратное рассеяние будет определяться только столбчатой паренхимой, чему соответствует наблюдаемое «насыщение» при толщинах превышающих 600 мкм. Проведенные численные эксперименты для листьев березы (средняя толщина листа 135 мкм) показали, что вариация толщины листа в пределах  $\pm 10\%$  дает различие в коэффициенте обратного рассеяния 0,5%, что существенно меньше экспериментальной погрешности измерений.

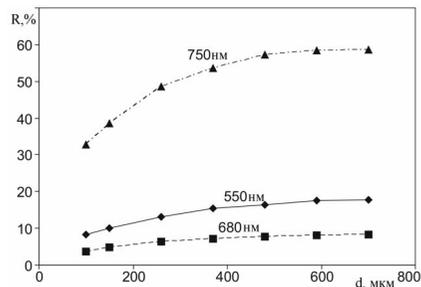


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента отражения  $R$  от толщины листа

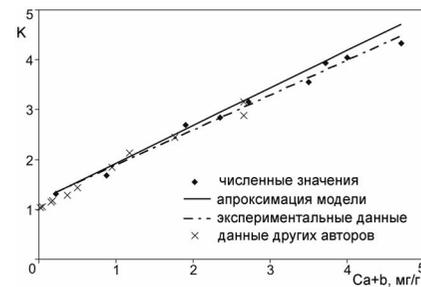
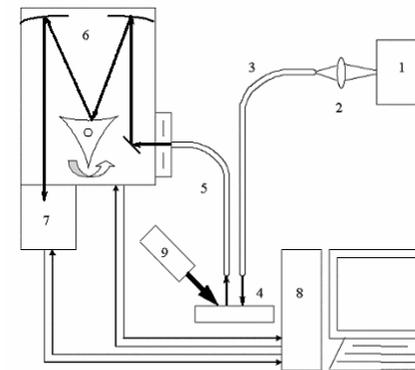


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента обратного рассеяния  $K$  от концентрации хлорофилла  $C_{a+b}$

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента обратного рассеяния  $K$  от концентрации хлорофилла  $C_{a+b}$ , построенная на основании расчетных спектров. Здесь же представлены собственные экспериментальные данные (сплошная кривая) и данные (крестики) других авторов (М.Н.

Мерзляк, 1999). Видно, что данная зависимость как и в случае приближенного решения (5) носит линейный характер, однако количественные значения коэффициента  $K$  имеют существенно большие значения, что связано с корректным учетом в численной модели процессов многократного рассеяния. Расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами составляет 1.5% в области малых значений концентраций хлорофилла и не превосходит 10% для предельных концентраций хлорофилла в листе.



- 1 – источник света (галогеновая лампа),
- 2- фокусирующая линза,
- 3- подающее волокно,
- 4- объект исследования,
- 5 – приемное волокно
- 6– спектрограф SR-303i,
- 7- цифровая камера ANDOR DV-420A-OE,
- 8- компьютер,
- 9- лазерный источник внешнего оптического воздействия

Рисунок 3 - Экспериментальный стенд

Во втором разделе главы 2 представлены результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик растения в течение его биологического цикла в естественных условиях. Исследования проводились с использованием волоконно-оптического стенда, представленного на рисунке 3.

Экспериментальный стенд включал в себя спектрофотометр SR-303i с интегрированной цифровой камерой ANDOR DV-420A-OE, источник излучения, приемно-передающую волоконную сборку (диаметр 100 мкм, апертурный угол  $35^\circ$ ) и обеспечивал спектральные измерения в диапазоне от 190 нм до 1200 нм с разрешением 0.1 нм и погрешностью 0.02 нм.

Для исключения самовоздействия источника излучения на измеряемые оптические характеристики растения его плотность мощности ограничивалась величиной 1 мВт/см<sup>2</sup>. Волоконно-оптическая сборка позиционировалась над объектом исследования на высоте 10 мм с погрешностью  $\pm 0,5$  мм. Погрешность выставки угла волоконной сборки относительно нормали к поверхности объекта исследования составляла  $\pm 2^\circ$ . Световой диаметр пятна падающего излучения на поверхности листа при выбранной схеме эксперимента составлял 6 мм. Для исследования флуоресценции источник излучения 1 заменялся полупроводниковым лазером 9 с длиной волны 460 нм и мощностью 1 мВт. Погрешность измерения, определенная по ГОСТ 8.206-76 для 54 листьев взятых с одного и того же растения, составляла 0,82% для коэффициента обратного рассеяния и 1,28% для коэффициента флуоресценции.

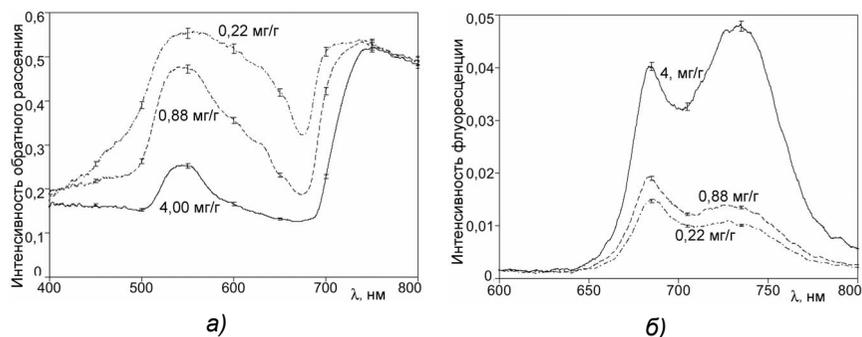


Рисунок 4 - Спектральная интенсивность обратного рассеяния (а) и флуоресценции (б) зеленого (сплошная кривая), желтеющего (пунктир) и желтого (штрих-пунктир) листьев сенполии.

Для определения спектральных характеристик и оптических коэффициентов, соответствующих нормальным (естественным) условиям развития была поставлена серия экспериментов с листьями сенполии, березы, пшеницы и ряда других растений. В качестве примера на рисунке 4 представлены спектры обратного рассеяния (а) и флуоресценции (б) листьев сенполии на разных стадиях жизненного цикла. Цифрами над графиками показана суммарная концентрация хлорофиллов  $S_{a+b}$ , определенная биохимическим методом Брагинского (1997). Вклад в пик рассеяния на длине волны 550 нм вносят оба типа хлорофиллов: чем выше амплитуда пика, тем меньше концентрация хлорофиллов  $S_{a+b}$ . На длине волны 750 нм основной вклад вносит ассимиляционная ткань листа (видно, что значение спектральной интенсивности в этой области спектра практически не меняется в течение жизненного цикла растения). Максимумы флуоресценции (рисунок 4б) соответствуют длинам волн 684 нм и 740 нм и определяются вкладом хлорофиллов разных типов и спектральным различием поглощения фотосистем 1 и 2.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния атмосферных антропогенных веществ на оптические характеристики растения.

Исследования по установлению функциональных зависимостей дифференциальных коэффициентов (7) от концентрации антропогенных веществ в атмосфере проводилось в натуральных условиях на протяжении пяти месяцев вегетации с мая по октябрь 2007 и 2008 годов. В качестве объекта исследования была выбрана береза повислая, которая по данным биологических исследований (В.С. Николаевский, 1997) является одной из наиболее чувствительных древесных культур. Пункты наблюдения (пункты 1-4) обусловлены наличием постов Гидрометеоцентра по исследованию в атмосферном воздухе вредных веществ. Пункт 5 находился в сквере, удаленном от транспортных магистралей, и использовался в качестве контрольного пункта, отражающего естественную календарную тенденцию изменения оптического состояния растений в процессе жизненного цикла в условиях средней полосы России. Все исследования проводились в одно и то же вре-

мя суток. Одновременно с регистрацией оптических характеристик растений в каждом пункте наблюдения контролировались концентрации следующих атмосферных загрязнителей (данные Самарского Гидрометеоцентра): оксид углерода (CO), диоксид серы (SO<sub>2</sub>), диоксид азота (NO<sub>2</sub>), формальдегиды (CH<sub>2</sub>O), пыль. Для каждого эксперимента отбиралось по три контрольных листа с трех разных ярусов трех разных берез в пределах каждого пункта наблюдения.

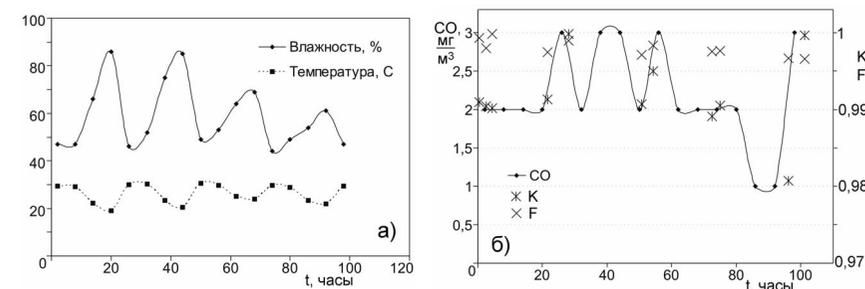


Рисунок 5 - Зависимости температуры и влажности (а), концентрации CO в атмосфере и нормированных оптических коэффициентов (б) от времени в пределах пункта 3

Для выявления статистического разброса оптических характеристик листьев с растений, расположенных в пределах одного пункта наблюдения, были измерены дифференциальные оптические коэффициенты листьев с 6 берез, расположенных на расстоянии 500м друг от друга по обе стороны от дороги. Погрешность измерений в пределах пункта исследования не превышала 2%.

Установлено, что влияние атмосферных антропогенных загрязнителей на оптические характеристики растения проявляется на двух временных масштабах: быстром (среднесуточном) и медленном (календарном). На рисунке 5 представлены данные по изменению концентрации атмосферных загрязнителей, температуры и влажности климатических условий в пункте 3, а также коэффициента обратного рассеяния K и коэффициента флуоресценции F, измеренные в период с 15 по 19 июля 2008 года. Зависимость климатических параметров (температура, влажность) и концентрации атмосферных загрязнителей от времени имеет квазигармоничный вид с характерным суточным периодом, что согласуется с интенсивностью выбросов в дневное и ночное время. Видно, что быстрая функциональная зависимость проявляется только для коэффициента обратного рассеяния K в зависимости от концентрации CO, а коэффициент флуоресценции F остается практически неизменным (рисунок 5).

Характерные корреляции между концентрацией загрязнителей в пунктах наблюдения и значениями коэффициента обратного рассеяния K и дифференциальным коэффициентом  $\Delta_2K$  представлены на рисунке 6.

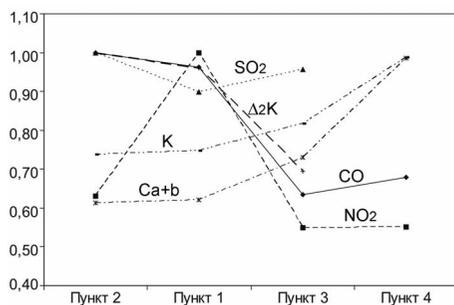


Рисунок 6 - Нормированные концентрации атмосферных загрязнителей, коэффициентов  $K$  и  $\Delta_2K$  для различных пунктов в сентябре

$SO_2$  не обнаружено. Напротив, изменение дифференциального коэффициента  $\Delta_2K$  отражает характер изменения как  $CO$ , так и  $NO_2$  (основных компонент выбросов автомобильных двигателей), что подтверждает правильность введения данного коэффициента как характеристики, выражающей воздействие антропогенных факторов на растение. Следует подчеркнуть, что данный коэффициент отражает интегрированное воздействие данных загрязнителей и имеет нелинейный параметрический характер.

Графики изменения коэффициентов обратного рассеяния  $K$  и флуоресценции  $F$ , а также дифференциальных коэффициентов ( $\Delta_2K$  и  $\Delta_2F$ ) для пункта 1 в течение жизненного цикла растения представлены на рисунке 7. Здесь же приведена расчетная кривая (пунктир) коэффициента обратного рассеяния  $K_M$  полученная с помощью математической модели. Видно, хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений.

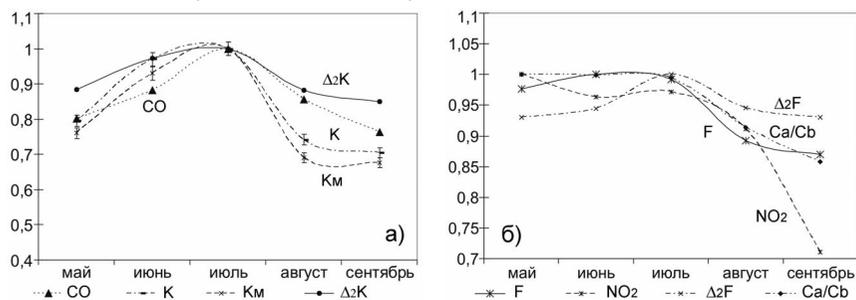


Рисунок 7 - Изменения коэффициента обратного рассеяния  $K$ , дифференциального коэффициента  $\Delta_2K$  и концентрации  $CO$  (а), изменения коэффициентов флуоресценции  $F$  и  $\Delta_2F$ , отношений концентраций хлорофиллов  $Ca/Cb$  и концентрации  $NO_2$  (б) в пункте наблюдения 1

Анализ представленных данных показывает, что, как и следовало ожидать, увеличение значения коэффициента обратного рассеяния  $K$  от пункта к пункту сопровождается аналогичным увеличением концентрации хлорофилла  $C_{a+b}$ . Причем эта тенденция обратная тенденции изменения концентраций  $CO$  и  $NO_2$ , т.е. увеличению  $K$  соответствует уменьшение концентраций загрязнителей и наоборот. Корреляций между значениями оптического коэффициента и концентраций

Видно, что в отличие от коэффициента обратного рассеяния  $K$  коэффициент флуоресценции  $F$  пропорционален изменению отношения концентраций хлорофиллов  $a$  и  $b$ . Это является следствием того факта, что основной вклад во флуоресценцию вносит фотосистема II. Отмечается слабовыраженная обратная корреляция между коэффициентом флуоресценции и изменением концентрации  $NO_2$ , сказывается «демпфирующее» и накопительное действие репродукционного механизма растения. Функциональная

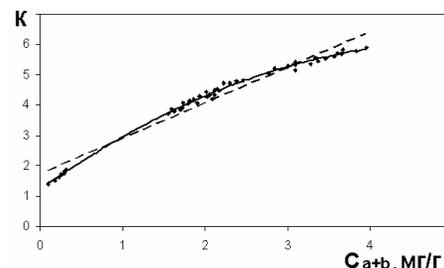


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента обратного рассеяния  $K$  от концентрации хлорофиллов  $Ca+b$

зависимость дифференциального коэффициента обратного рассеяния  $\Delta_2K$  от времени качественно совпадает с аналогичной зависимостью для загрязнителя  $CO$ .

На рисунке 8 представлена зависимость коэффициента обратного рассеяния  $K$  от суммарной концентрации хлорофилла  $C_{a+b}$ . Экспериментальные значения отмечены точками. Видно, что в отличие

от линейной зависимости, характерной для растения в отсутствии внешней антропогенной нагрузки, данная функциональная связь является полиномиальной с нелинейностью, имеющей характер малого возмущения.

В целом можно утверждать, что введенные дифференциальные коэффициенты описывают многофакторную интегрированную зависимость оптических характеристик растений от уровня загрязнения окружающей среды.

Установленные параметрические функциональные связи между значениями коэффициентов обратного рассеяния и флуоресценции и концентрацией атмосферных загрязнителей позволяют применить оптический метод контроля состояния растений для экологического картографирования территорий городов, который был апробирован на примере города Самары. Гистограмма изменения оптических коэффициентов и концентрации загрязнителей в исследованных районах города Самары (рисунок 9) ясно показывает обратную тенденцию в изменении оптических характеристик растения и концентрации антропогенных веществ в атмосфере – повышение коэффициента  $K$  соответствует интегральному уменьшению концентрации загрязнителей и наоборот.

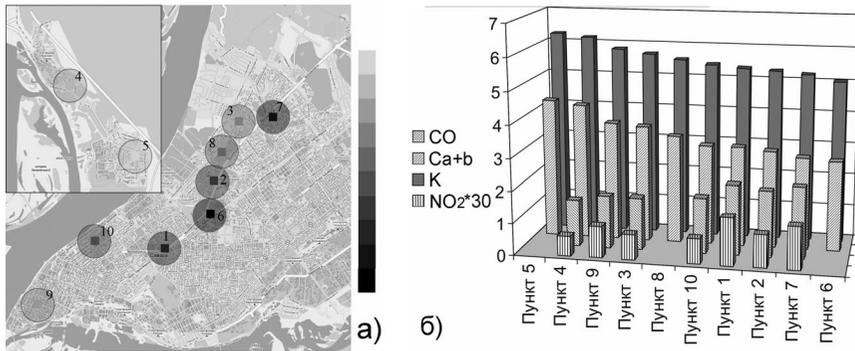


Рисунок 9 - Экологическое картографирование города Самары

В четвертой главе представлены результаты исследований по влиянию минерального питания на изменение оптических характеристик растений и определению изменения оптических характеристик различных сельскохозяйственных растений в полевых условиях.

Для получения качественной сельскохозяйственной продукции необходимо контролировать жизненный цикл растений, предотвращая замедляющие рост факторы. Традиционно для стимуляции роста растений используются минеральные удобрения, среднестатистическая количественная доза которых определяется экспериментальным путем. Учитывая, что основным биологическим параметром, выражающим темпы роста, является концентрация хлорофилла и установленную высокую чувствительность исследуемых оптических методов к ее изменению, можно предположить, что оптические методы могут быть основой критериев оптимизации минерального питания растений. А возможность дистанционного применения оптических методов на больших площадях делает данный подход технологически привлекательным.

Лабораторные исследования проводились гидропонным методом для трех видов сельскохозяйственных культур: овес, озимая пшеница и горох. Для каждого вида растений использовались 3 питательные среды: аммиачное удобрение (азот), марганцевые соли и комплексное удобрение с микро и макро элементами «Радуга». В качестве контрольной среды использовалась дистиллированная вода. Экспериментально установлена параметрическая связь дифференциального коэффициента обратного рассеяния  $\Delta_1K$  с основными биологическими параметрами (рост) растения в условиях различного минерального питания (рисунок 10). Видно, что применение азотного удобрения приводит к наибольшему изменению коэффициента обратного рассеяния при той же высоте растения. Наихудшие показатели имеет удобрение «Радуга». Последнее объясняется тем обстоятельством, что азот и марганец входят в структурную формулу хлорофилла, и таким образом, оказывают стимулирующее действие на содержание хлорофилла в листовой пластине, приводя к увеличению коэффициента поглощения.

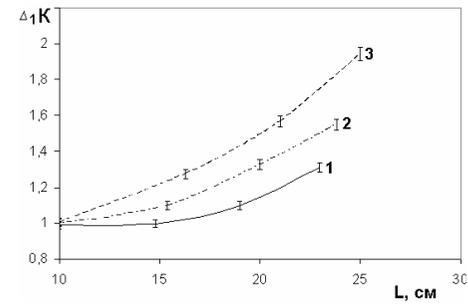


Рисунок 10 - Зависимость дифференциального коэффициента обратного рассеяния  $\Delta_1K$  от высоты побегов овса при внесении различных удобрений: 1 - «Радуга», 2- «Магний», 3- «Азот»

обратного рассеяния.

Наряду с гидропонными лабораторными исследованиями в Пестравском районе Самарской области были проведены натурные полевые исследования жизненного цикла таких сельскохозяйственных культур как кукуруза, подсолнечник, озимая пшеница, овес. Все исследования проводились с началом появления невысоких саженцев, т.е. с началом жизненного периода в мае месяце. Листья отбирались с 4 различных полей, с трех различных саженцев, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга.

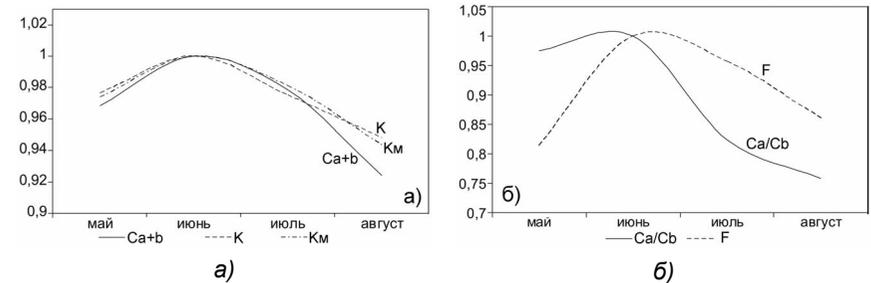


Рисунок 11 - Коэффициент обратного рассеяния  $K$  (эксперимент) и  $K_M$  (математическая модель), концентрация хлорофилла  $Ca+b$  (а), коэффициент флуоресценции  $F$  и отношение концентраций хлорофиллов  $Ca/Cb$  (б) для кукурузы

На рисунке 11 представлены характерные зависимости коэффициентов обратного рассеяния, флуоресценции, и концентрации хлорофиллов от времени.

Видно, что для кукурузы плавное увеличение коэффициента обратного рассеяния  $K$  сменяет в июне спадом вплоть до августа, когда начинается стадия плодоношения. Таким образом, для данного урожая июнь является

наиболее уязвимым периодом, связанным с деградацией хлорофиллов в растении, и, следовательно, именно в этот период требуется внесение удобрений для повышения эффективности и повышения урожайности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Развита и численно реализована с помощью программы TracePro математическая модель взаимодействия оптического излучения с растительной тканью, представленной в виде сплошной многослойной многократно рассеивающей среды с учетом спектральных характеристик основных светопоглощающих пигментов. Показано, что модель описывает экспериментально наблюдаемые спектральные зависимости интенсивности обратного рассеяния от концентрации хлорофилла с погрешностью не превышающей 10%.

2. Введены дифференциальные коэффициенты, определенные как отношения коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 750 нм и 550 нм и флуоресценции на длинах волн 740 нм и 684 нм к их значениям в отсутствие загрязнителей (минерального питания), с помощью которых получены зависимости оптических характеристик растений от концентрации внешних загрязнителей.

3. Получены экспериментальные зависимости между оптическим дифференциальным коэффициентом и интегральной величиной суммарной концентрации антропогенных веществ, характерных для выхлопов двигателей внутреннего сгорания (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>). Показано, что наибольшее влияние на оптические характеристики растения оказывает оксид углерода.

4. Предложен оптический метод экологического картографирования территорий городов, использующий установленные функциональные зависимости дифференциальных оптических коэффициентов от концентрации атмосферных загрязнителей, который апробирован на примере города Самара.

5. Экспериментально установлена параметрическая связь коэффициента обратного рассеяния с основными биологическими параметрами растения в условиях различного минерального питания (азотистых, марганцевых и комплексных удобрений).

#### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. Vorobjeva, E.V. Alteration of vegetable tissue optical properties in a low level laser field [Текст] / E.V. Vorobjeva, V.V. Yakutkin, V.P. Zakharov // International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics and Biophysics - Saratov Fall Meeting 2003, October 7-10, 2003, Saratov, Russia

2. Воробьева, Е.В. Экспериментальные исследования воздействия оптических полей малой интенсивности на живые и растительные ткани [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, П.Е. Тимченко, С.В. Яковлева, В.В. Якуткин // Тезисы докладов I-й Троицкой конференции по медицинской физике (19-21 мая 2004, Троицк). - 2004. - С. 62.

3. Воробьева, Е.В. Взаимодействие низкоинтенсивного лазерного излучения с растительной тканью [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, С.Н. Митягин, П.Е. Тимченко, В.В. Якуткин // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы»,

тез. докладов и сообщений III Международной научно-технической конференции (6-12 сентября 2004, Волгоград). - 2004. - С. 406.

4. Vorobjeva, E.V. Low level laser field integration with plant tissue [Текст] / E.V. Vorobjeva, R.V. Kozlov, P.E. Timchenko // International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics and Biophysics - Saratov Fall Meeting 2004, September 21-24, 2004, Saratov, Russia.

5. Воробьева, Е.В. Взаимодействие низкоинтенсивного лазерного излучения с растительной тканью [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, С.Н. Митягин, П.Е. Тимченко, В.В. Якуткин // Сборник статей Второго Самарского регионального конкурса-конференции научного работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике, - 2004. - С. 86-90.

6. Воробьева, Е.В. Сравнительный спектральный анализ обратного рассеяния излучения растительной и живой тканью [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, П.Е. Тимченко, В.В. Якуткин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2005. - Т. 8. - № 3. - С. 69-74.

7. Воробьева, Е.В. Сравнительный спектральный анализ обратного рассеянного излучения растительной и живой тканью [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, П.Е. Тимченко, В.В. Якуткин // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», тезисы докладов и сообщений, IV Международная научно-техническая конференция, 3-9 октября г. Нижний-Новгород, - 2005. - С. 288.

8. Воробьева, Е.В. Исследование кинетики оптических характеристик растительной ткани методом дифференциального обратного рассеяния [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, П.Е. Тимченко, В.В. Якуткин // Альманах клинической медицины. Т. XII. II Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (тезисы докладов, 16-19 мая). - М: МОНИКИ, 2006. - С. 16.

9. Воробьева, Е.В. Спектральный анализ кинетики оптических характеристик растительной ткани в поле низкоинтенсивного лазерного излучения [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, С.П. Котова, А.Р. Синдяева, П.Е. Тимченко, В.В. Якуткин // тезисы докладов и сообщений Международной конференции «Лазеры, Измерения, Информация - 2006» (7-9 июня 2006, г. Санкт - Петербург). - 2006. - С. 84-85.

10. Воробьева, Е.В. Спектральный анализ кинетики оптических характеристик растительной ткани в поле низкоинтенсивного оптического излучения [Текст] / Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, Р.В. Козлов, П.Е. Тимченко // Сборник статей всероссийского семинара по моделированию, дифракционной оптике и обработке изображений. (Самара, 20-22 июня 2006). - 2006. - С. 67-70.

11. Vorobjeva, E.V. Spectral kinetics of plant tissue [Текст] / E.V. Vorobjeva, V.P. Zakharov, S.P. Kotova, P.E. Timchenko, I.A. Bratchenko // International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics and Biophysics - Saratov Fall Meeting 2006, September 26-29, 2006, Saratov.

12. Воробьева, Е.В. Математическое моделирование оптических характеристик растительной ткани [Текст] / Е.В. Воробьева, И.А. Братченко, Е.В., В.П. Захаров, П.Е. Тимченко, С.П. Котова // Сборник конкурсных докладов IV Самарского регионального конкурса-конференции научных работ студентов

и молодых исследователей по оптике и лазерной физике (22-24 ноября 2006, Самара). - 2006. - С. 200-210.

13. Vorobjeva, E.V. Experimental researches of optical characteristics of the plant tissue [Текст] / E.V. Vorobjeva, V.P. Zakharov, P.E. Timchenko, S.P. Kotova, V.V. Yakutkin // LALS, International Laser Center and Faculty of Physics M.V. Lomonosov Moscow State University Moscow, - 2007. - p.57.

14. Vorobjeva, E.V. Experimental investigation of kinetics spectral characteristics [Текст] / E.V. Vorobjeva, V.P. Zakharov, S.P. Kotova, P.E. Timchenko // Proc. 15th International Conference on Advanced Laser Technologies (September 3 - 7 2007, Levi, Finland). - 2007. - P. 120.

15. Vorobjeva, E.V. Spectral kinetics of plant tissue [Текст] / E.V. Vorobjeva, V.P. Zakharov, S.P. Kotova, P.E. Timchenko, I.A. Bratchenko // SPIE Proceedings. - 2007. - V. 6535.

16. Воробьева, Е.В. Экспериментальные исследования и математическое моделирование оптических характеристик растительной ткани [Текст] / Е.В. Воробьева, И.А. Братченко, В.П. Захаров, П.Е. Тимченко, С.П. Котова // Известия СЦ РАН. - 2007. - Т. 9. - № 3. - С. 620-625.

17. Тимченко, Е.В. Экспериментальные исследования кинетики спектральных характеристик растительной ткани [Текст] / Е.В. Тимченко, В.П. Захаров, С.П. Котова, П.Е. Тимченко, Р.В. Козлов // тезисы докладов 15-ой Международной Конференции "Высокие Технологии В Медицине, Биологии И Геоэкологии - 2007" (10 - 14 сентября 2007, п. Абрау-Дюрсо, Краснодарский край), - 2007. - С. 32.

18. Тимченко, Е.В. Исследования динамики оптических параметров растительной ткани [Текст] / Е.В. Тимченко, В.П. Захаров, С.П. Котова, П.Е. Тимченко // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», тезисы докладов и сообщений, VI Международная научно-техническая конференция (17-23 сентября, г. Казань). 2007. - С. 443-444.

19. Timchenko, E.V. Experimental investigation of kinetics spectral characteristics of a plant tissue [Текст] / E.V. Timchenko, V.P. Zakharov, S.P. Kotova, P.E. Timchenko // SPIE Proceedings. - 2007. V. 6734

20. Воробьева, Е.В. Экологический мониторинг города на основе метода дифференциального обратного рассеяния излучения древесной культурой [Текст] / Е.В. Тимченко, В.П. Захаров, О.Н. Макурина, П.Е. Тимченко, С.П. Котова // Труды XVI Международной конференции (п. Абрау-Дюрсо, г. Новороссийск, Краснодарский край, 8-12 сентября 2008). - 2008. - С. 87.

21. Timchenko, E.V. Ecological monitoring of arboreal vegetation with the help of physical and chemical methods of research [Текст] / E.V. Timchenko, V.P. Zakharov, P.E. Timchenko, S.P. Kotova, O.N. Makurina, R.V. Kozlov // Труды конференции Topical Meeting on Optoinformatics '2008. - СПб.: СПбГУ ИТМО, - 2008. - С. 142.

22. Тимченко, Е.В. Экологический мониторинг древесной растительности с помощью оптических и химических методов исследования [Текст] / В.П. Захаров, Е.В. Тимченко, П.Е. Тимченко, С.П. Котова // тезисы докладов и сообщений Международной конференции «Лазеры, Измерения, Информация - 2008» (3-5 июня 2008, г. Санкт - Петербург). - 2008.

23. Тимченко, Е.В. Экологический мониторинг города на основе метода

дифференциального обратного рассеяния излучения древесной культурой [Текст] / Е.В. Тимченко, В.П. Захаров, О.Н. Макурина, П.Е. Тимченко, С.П. Котова // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», тезисы докладов и сообщений VI Международной научно-технической конференции (15-21 сентября 2008, Самара). - 2008.

24. Тимченко, Е.В. Экологический мониторинг города Самары с помощью метода дифференциального обратного рассеяния / Е.В. Тимченко, В.П. Захаров, О.Н. Макурина, П.Е. Тимченко, С.П. Котова, Р.В. Валиуллов // Вестник СГАУ - Самара, Изд-во СГАУ. - 2008. - № 2(15).

25. Тимченко, Е.В. Моделирование влияния покровных тканей растения на характеристики рассеянного обратного излучения [Текст] / Е.В. Тимченко, В.П. Захаров, И.А. Братченко // Вестник СГАУ. - 2008. - № 2(15).

26. Timchenko, E.V. Ecological Monitoring Of Megapolis On The Basis Of Differential Backscattering Control Of Leave Wood Culture [Текст] / E.V. Timchenko, V.P. Zakharov, O.N. Makurina, P.E. Timchenko, S.P. Kotova // Proc. International conference advanced laser technology (ALT'08), September 13-18 2008, Hungary. - 2008. - p. 88.

Подписано в печать 11.03.09. Тираж 100 экземпляров. Отпечатано с готового оригинал-макета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.