

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.3

КОНТРОЛЬ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

© 2011 г. В. П. Захаров*, доктор физ.-мат. наук; Е. В. Тимченко*, канд. физ.-мат. наук;
П. Е. Тимченко*, канд. физ.-мат. наук; О. Н. Макурина**, доктор биол. наук;
А. Д. Золотухина*; С. В. Алембеков*

* ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара

** ГОУ ВПО «Самарский государственный университет», г. Самара

E-mail: Vorobjeva.82@mail.ru

Представлены статистические результаты исследований спектральных характеристик древесных культур города Самары. Метод дифференциального обратного рассеяния использовался как основной метод контроля оптических характеристик растений. Все исследования проводились в одно и то же время суток на протяжении пяти месяцев вегетации зеленых листьев березы с мая по октябрь. В ходе исследования дополнительно контролировалось содержание основных пигментов в листьях древесных культур с помощью флуоресцентного анализа и биохимического метода Брагинского. Экспериментально показана корреляция данных биохимического анализа растений с данными, полученными оптическими методами, что подтверждает адекватность применения метода дифференциального обратного рассеяния для идентификации районов города по экологической значимости.

Ключевые слова: флуоресценция, метод обратного рассеяния, оптические коэффициенты, экологический мониторинг, растительная ткань.

Коды OCIS: 300.0300, 290.0290.

Поступила в редакцию 24.02.2011.

Введение

Наиболее широко применяемыми оптическими методами контроля состояния растений являются методы обратного рассеяния, комбинационного рассеяния, абсорбционный метод и флуоресцентный анализ. Фактически метод обратного рассеяния, так же как и абсорбционный метод, использует различия в спектрах поглощения химических компонентов растительной ткани, однако, в отличие от последнего, он позволяет осуществлять дистанционные измерения. Для определения концентрации хлорофилла в работах [1–9] были введены оптические коэффициенты (вегетационные индексы), использующие отношения интенсивностей обратного рассеяния в видимой и ИК областях спектра. Применение данных коэффици-

ентов хорошо зарекомендовало себя для оценки объема зеленой биомассы по данным дистанционного зондирования Земли из космоса [10, 11].

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 расте-

ний наиболее чувствительны 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 [12, 13].

В связи с этим одной из актуальных проблем является разработка и применение метода дифференциального обратного рассеяния для контроля атмосферных загрязнителей

Дифференциальные оптические коэффициенты

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 в работе [5], –

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

где R_{750} и R_{550} – коэффициенты отражения на длинах волн 750 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 λ , может быть задан в виде отношения пиков интенсивностей флуоресценции J_{740} и J_{684} на длинах волн 740 и 684 нм соответственно

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

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 $\mu_a(\mathbf{r}, \lambda)$ и рассеяния $\mu_s(\mathbf{r}, \lambda)$. Для планарной модели растительной ткани распределение спектральной плотности лучевой интенсивности I в точке \mathbf{r} в направлении \mathbf{s} может быть описано транспортным уравнением переноса (ТПИ)

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

где первый член описывает затухание лучевого потока $I(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \lambda)$ с коэффициентом $\mu = \mu_a + \mu_s$; второй член обусловлен приростом потока излучения за счет рассеянного излучения, распространяющегося по всем другим направлениям \mathbf{s}' ; $\rho_s(\mathbf{s}\mathbf{s}')$ – фазовая функция рассеяния, а $\chi(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \lambda, \lambda_i)$ определяет вклад от внутренних источников (флуоресценции), наличие которых связано с распределенными в среде пигментами.

Коэффициент рассеяния μ_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 μ_a определяется пространственным распределением химических компонентов среды, вносящим существенный вклад в поглощение на длине волны λ , т. е. определяется прежде всего концентрацией светопоглощающих пигментов и их спектральными свойствами:

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

где $C_i(\mathbf{r})$ – концентрация i -го химического компонента, $\alpha_i(\mathbf{r}, \lambda)$ – спектрально зависимый молярный коэффициент поглощения, а μ_{a0} – вклад неучтенных компонентов среды. Основными составляющими растительной ткани, входящими в сумму выражения (4), являются вода, лигнин, белок, целлюлоза, гемицеллюлоза и светопоглощающие пигменты: хлорофилл a (C_a), хлорофилл b (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 μ_{a0} функцией только координат.

Решение интегродифференциального 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:

$$K \approx k_0 + k_c C_{a+b},$$

$$F \approx \frac{\eta_f(740)}{\eta_f(684)} (f_0 + f_1 C_a + f_2 C_b), \quad (5)$$

где $\eta_f(\lambda)$ – квантовый выход флуоресценции на длине волны λ , f_i – постоянные коэффициенты, $C_{a+b} = C_a + C_b$ – суммарная концентрация хлорофиллов в листе, $k_c \approx \alpha_a(550) + \alpha_b(550)$, 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 флуоресценции является их линейной комбинацией. Данные зависимости качественно правильно отражают экспериментально наблюдаемые результаты.

Биофизические исследования показали, 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 влагосодержания в них под действием стресса может приводить к изменению коэффициентов поглощения μ_a и рассеяния μ_s и, как следствие, к изменению коэффициента обратного рассеяния K за счет увеличения среднего оптического пути лучей в растительной ткани. С учетом медленного изменения оптических коэффициентов среды от указанных параметров, можно принять что данная зависимость носит параметрический характер

$$\mu_a(t) = \mu_a(t, \{T\}, \{C_k^*\}),$$

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

$$\eta_f(t) = \eta_f(t, \{T\}, \{C_k^*\}),$$

где время t отражает изменение данных параметров вследствие естественного жизненного цикла растения, $\{T\}$ учитывает влияние климатических факторов (прежде всего температуры и влажности), а $\{C_k^*\}$ – 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 относи-

тельно малых концентраций загрязнителей C_k^* , т. е. при отсутствии залповых выбросов. Тогда, для “вычленения” параметрической зависимости оптических коэффициентов только от концентрации загрязнителей удобно ввести дифференциальные коэффициенты

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

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

являющиеся, по сути, отношением экспериментально измеренных оптических коэффициентов к их значениям в условиях отсутствия загрязнителей, т. е. соответствующих естественным условиям. Дифференциальные коэффициенты наиболее целесообразно применять при контроле состояния растений на достаточно большой территории, где заведомо можно выделить участок, слабо подверженный воздействию антропогенных факторов (7). Кроме того, их удобно использовать для уменьшения статистического разброса результатов измерений.

Результаты исследований

Все исследования проводились с помощью экспериментального стенда на базе спектрографа Andor Shamrock 303 (диапазон 200–1200 нм, погрешность определения длины волны 0,1 нм), который обеспечивал измерение оптических параметров с погрешностью 1,5% ($P = 0,95$) [14, 15].

Исследования по установлению функциональных зависимостей дифференциальных коэффициентов (7) от концентрации антропогенных веществ в атмосфере проводились в природных условиях на протяжении двух лет. В качестве объекта исследования была выбрана береза повислая, которая, по данным биологических исследований [7, 8], является одной из наиболее чувствительных древесных культур. Пункты наблюдения (пункты 1–4) обусловлены наличием постов Гидрометеоцентра по контролю присутствия вредных веществ в атмосферном воздухе. Пункт 5 находился в сквере, удаленном от транспортных магистралей, и использовался в качестве контрольного пункта, отражающего естественную календарную тенденцию изменения оптических характеристик растений в процессе жизненного цикла в условиях средней полосы России. Все исследования проводились в одно и то же время суток. Одно-

временно с регистрацией оптических характеристик растений в каждом пункте наблюдения контролировались концентрации следующих атмосферных загрязнителей (данные Самарского Гидрометеоцентра): оксид углерода (CO), диоксид серы (SO₂), диоксид азота (NO₂), формальдегиды (CH₂O), пыль. Для каждого эксперимента отбиралось по три контрольных листа с трех разных ярусов трех разных берез в пределах каждого пункта наблюдения.

Для выявления статистического разброса оптических характеристик листьев с растений, находящихся в пределах одного пункта наблюдения, были измерены дифференциальные оптические коэффициенты листьев с 6 берез, расположенных на расстоянии 500 м 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 рис. 1 представлены данные изменения концентрации атмосферных загрязнителей, температуры

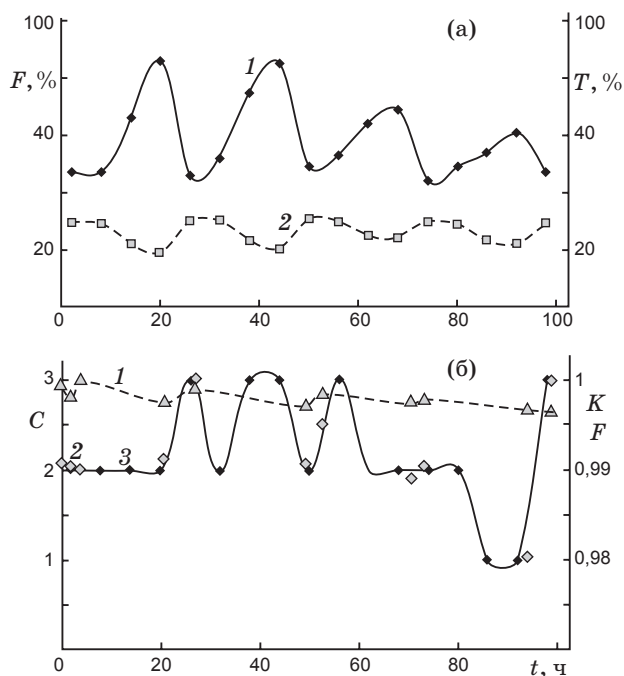


Рис. 1. Зависимости температуры (2) и влажности (1) – а; концентрации CO (1) в атмосфере и нормированных оптических коэффициентов K (♦ – 2) и F (▲ – 3) – (б) от времени в пределах пункта 3.

и влажности в пункте 3, а также коэффициента обратного рассеяния K и коэффициента флуоресценции F , полученные при измерении в период с 15 по 19 июля. 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 связь проявляется только для коэффициента обратного рассеяния K в зависимости от концентрации CO, а коэффициент флуоресценции F остается практически неизменным (рис. 1б).

Характерные корреляции между концентрацией загрязнителей в пунктах наблюдения и значениями коэффициента обратного рассеяния K и дифференциальным коэффициентом $\Delta_2 K$ представлены на рис. 2.

Анализ представленных данных показывает, что, как и следовало ожидать, увеличение коэффициента обратного рассеяния K от пункта к пункту сопровождается аналогичным увеличением концентрации хлорофилла C_{a+b} . При этом эта тенденция обратна тенденции изменения концентраций CO и NO₂, т. е. увеличению K соответствует уменьшение концентраций загрязнителей и наоборот. Корреляций между значениями оптического коэффициента и концентрацией SO₂ не обнаружено. Напротив, изменение дифференциального коэффициента $\Delta_2 K$ отражает характер изменения как CO, так и NO₂ (основных компонентов выбросов автомобильных двигателей), что подтверждает правильность введения данного коэффициента как характеристики, выражающей

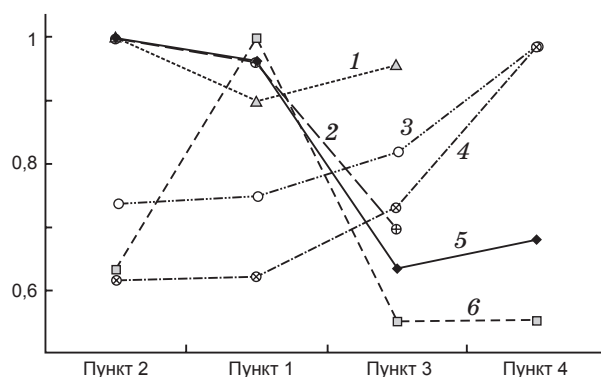


Рис. 2. Нормированные концентрации атмосферных загрязнителей SO₂ (1), CO (5), NO₂ (6), коэффициентов K (3) и $\Delta_2 K$ (2) и суммарной концентрации хлорофиллов $a + b$ (4) для различных пунктов в сентябре.

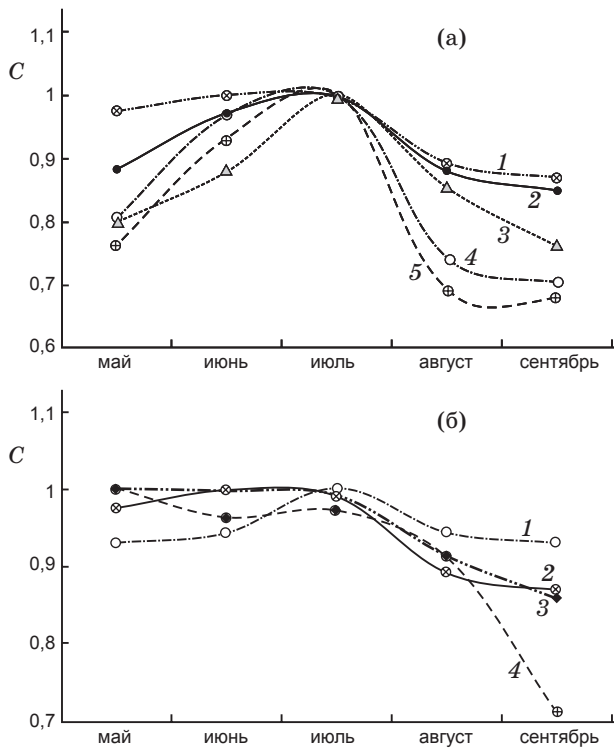


Рис. 3. Изменения коэффициента обратного рассеяния K (4), дифференциального коэффициента $\Delta_2 K$ (1), коэффициента K_M , рассчитанного с помощью математической модели [14, 18] (5), коэффициента флуоресценции F (2) и концентрации CO (3) – а; изменения коэффициентов флуоресценции F (2) и $\Delta_2 F$ (1), отношений концентраций хлорофиллов C_a/C_b (3) и концентрации NO_2 (4) – б (в пункте наблюдения 1).

воздействие антропогенных факторов на растение. Следует подчеркнуть, что этот коэффициент отражает интегрированное воздействие данных загрязнителей и имеет нелинейный параметрический характер.

Графики изменения коэффициентов обратного рассеяния K и флуоресценции F , а также дифференциальных коэффициентов (7) $\Delta_2 K$ и $\Delta_2 F$ для пункта 1 в течение жизненного цикла растения представлены на рис. 3. Здесь же приведена расчетная кривая (пунктир) коэффициента обратного рассеяния K_M , полученная с помощью математической модели [18]. Видно хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений.

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, содержащая хлорофиллы обоих типов. Отмечается слабовыраженная обратная корреляция между коэффициентом флуоресценции и изменением концентрации NO_2 , сказывается “демпфирующее” и накопительное действие репродукционного механизма растения. Функциональная зависимость дифференциального коэффициента обратного рассеяния $\Delta_2 K$ от времени качественно совпадает с аналогичной зависимостью для загрязнителя CO .

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента обратного рассеяния K от суммарной концентрации хлорофилла C_{a+b} . Экспериментально измеренные значения отмечены точками. Видно, что в отличие от линейной зависимости, характерной для растения в отсутствие 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,

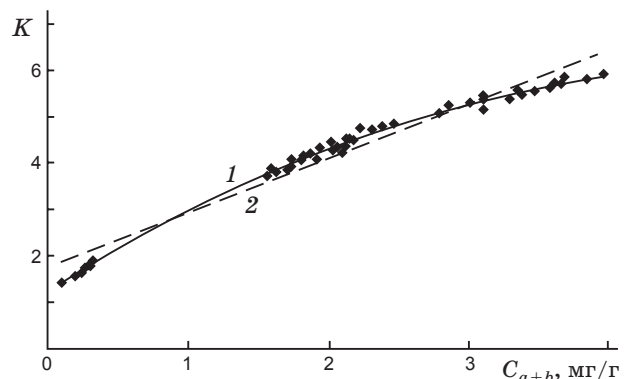


Рис. 4. Зависимость коэффициента обратного рассеяния K от концентрации хлорофиллов C_{a+b} . 1 – экспериментальные результаты, 2 – аппроксимация экспериментальных результатов.

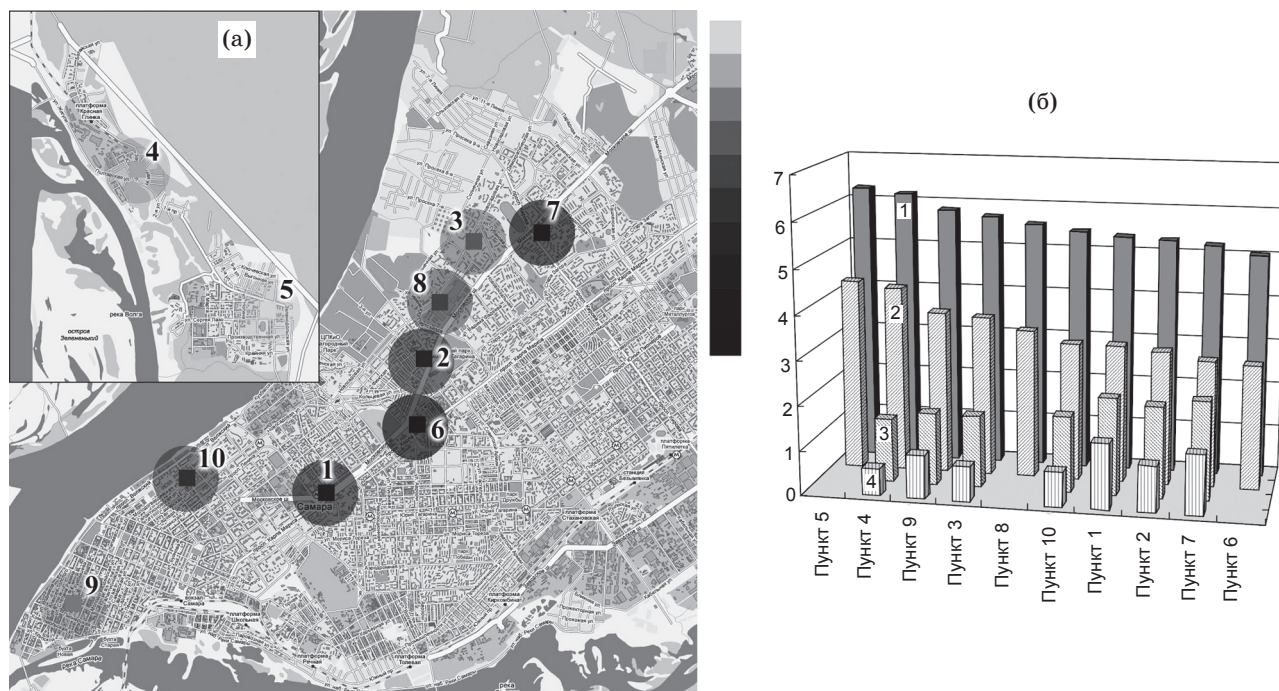


Рис. 5. Экологическое картографирование города Самары. а – пункты наблюдения г. Самары: 1 – пересечение ул. Советской Армии и Московского шоссе, 2 – Ст. м. Московская – пересечение Московского шоссе и ул. Гагарина; 3 – Гидрометеоцентр – ул. Ново-Садовая, 4 – Красная Клинка – ул. Батайская, 5 – Поселок Управленческий – ул. Сергея Лазо, 6 – Центральный Автовокзал, 7 – Проспект Кирова, 8 – Завод Тарасова, 9 – Площадь Революции, 10 – Ул. Молодогвардейская (Теремок); б – зависимости коэффициента обратного рассеяния K (столбец 1), суммарной концентрации хлорофиллов C_{a+b} (столбец 2) и концентрации атмосферных загрязнителей CO (столбец 3) и NO_2 (столбец 4) для всех пунктов исследования в июне.

который был апробирован на примере города Самары. Гистограмма изменения оптических коэффициентов и концентрации загрязнителей в исследованных районах города Самары (рис. 5б) ясно показывает обратную тенденцию изменения оптических характеристик растения и концентрации антропогенных веществ в атмосфере – повышение коэффициента K соответствует интегральному уменьшению концентрации загрязнителей и наоборот.

Выводы

1. Введены дифференциальные коэффициенты, определенные как отношения коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 750 и 550 нм и флуоресценции на длинах волн 740 и 684 нм к их значениям в отсутствие загрязнителей. С помощью этих коэффициентов получены зависимости оптических характеристик растений от концентрации внешних загрязнителей.

2. Получены экспериментальные зависимости между оптическим дифференциальным коэффициентом и интегральной суммарной концентрацией антропогенных веществ, характерных для выхлопов двигателей внутреннего сгорания (CO , NO_2 , SO_2). Показано, что наибольшее влияние на оптические характеристики растения оказывает оксид углерода.

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

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (2009–2013 гг.), выполняемой в рамках мероприятия 1.3.1. “Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук”.

* * * * *

1. Rouse J.W., Haas R.W., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation // NASA/GSFC Final Report. 1974. P. 1–137.
2. Huete A.R. A soil adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sens. Environ. 1988. V. 25. P. 295–309.
3. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS // Remote Sens. Environ. 1997. № 59. P. 440–451.
4. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // J. of plant physiology. 2003. № 160(3). P. 271–282.
5. Мерзляк М.Н. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 5. С. 707–716.
6. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
7. Козодеров В.В. Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исследование Земли из космоса. 2006. № 2. С. 79–88.
8. Головкин В.А. Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса // Исследование Земли из космоса. 2006. № 2. С. 11–23.
9. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С. Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 57–65.
10. Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Rakitin V.Y. Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening // Physiol Plant. 1999. № 106. P. 135–141.
11. Gopal R., Mishra K.B., Zeeshan S.M. Prasad Laser-induced chlorophyll fluorescence spectra of mung plants growing under nickel stress // Current Science. 2002. V. 83. № 7. P. 880–884.
12. Saito Y., Kanoh M., Hatake K., Kawahara T.D., Nomura A. Investigation of laser-induced fluorescence of several leaves for application to lidar vegetation monitoring // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 431–437.
13. Козодеров В.В. Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исследование Земли из космоса. 2006. № 2. С. 79–88.
14. Братченко И.А., Воробьева Е.В., Захаров В.П., Тимченко П.Е., Котова С.П. Экспериментальные исследования и математическое моделирование оптических характеристик растительной ткани // Изв. СНЦ РАН. 2007. Т. 9. № 3. С. 620–625.
15. Захаров В.П., Макурина О.Н., Тимченко Е.В., Тимченко П.Е., Котова С.П., Валиуллов Р.В. Экологический мониторинг города Самары с помощью метода дифференциального обратного рассеяния // Вестник СГАУ – Самара. 2008. № 2(15). С. 261–271
16. Майдебурга И.С. Влияние загрязнения городской среды на биохимические показатели древесных растений // Естественные и технические науки. М.: Изд-во “Компания Спутник+”, 2006. № 4(24). С. 136–141.
17. Дружкина Т.А. Проблемы скрининговой оценки урбанизированных территорий на примере г. Саратова // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2007. № 1. С. 6–9.
18. Захаров В.П., Братченко И.А., Синдяева А.Р., Тимченко Е.В. Моделирование распределения энергии оптического излучения в растительной ткани // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. № 6. С. 957–962.