

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

В. П. Захаров¹, О. Н. Макурина², Е. В. Тимченко¹, П. Е. Тимченко¹,
И. А. Братченко¹, С. П. Котова³

Представлены результаты исследований спектральных характеристик древесных культур города Самары как способа измерения концентраций загрязнителей атмосферы. В качестве объектов были выбраны одновозрастные насаждения березы повислой в десяти точках города Самары, вблизи основных автомагистралей. Показано, что отношение K интенсивностей обратного рассеяния света на длинах волн 750 и 550 нм чувствительно к наличию загрязнителей и нечувствительно к условиям измерений. Экспериментально установлена связь между величиной коэффициента K и концентрацией хлорофиллов в листе, а также их зависимость от интегральной величины суммарной концентрации антропогенных веществ, характерных для выхлопов двигателей внутреннего сгорания (CO , NO_2 , SO_2). Наибольшее влияние на величину коэффициента K оказывает концентрация оксида углерода. Это позволяет применить описанный метод, который был апробирован на примере города Самары, для экологического картографирования территорий городов.

Ключевые слова: растительная ткань, экологическое картографирование, спектроскопия, метод обратного рассеяния, флуоресценция.

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королева (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34; e-mail: Vorobjeva.82@mail.ru).

² Самарский государственный университет, биологический факультет (443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1).

³ Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221).

1. *Введение.* Одной из наиболее актуальных задач экологического мониторинга является разработка методов дистанционного контроля природной среды, подвергающейся воздействию естественных и антропогенных факторов.

Следует отметить, что существующие методы контроля, такие как абсорбционный метод спектрального анализа [1–2], пламенно-ионизационный, пламенно-фотометрический [3], хемилюминесцентный, флуоресцентный [4], радиометрический, гравиметрический [5], электрохимический [6] методы, лазерный мониторинг [7], как правило, базируются на измерении концентраций различного рода загрязнителей в окружающей среде, в частности, концентрации твердых частиц (пыли), формальдегидов, углеводородов, диоксида азота, тяжелых металлов. Большую нагрузку на природную среду оказывают выбросы окиси углерода, которые особенно значительны вблизи международных автомобильных трасс и на территории крупных городов. Так, биохимические исследования влияния нефтепродуктов и выхлопов автомобильного транспорта [8] на растения показывают, что меняются как биологические характеристики растения (масса, высота, площадь и размер листа), так и содержание в них белков и связанных с ними хлорофиллов. Следует также учитывать возможность накопительного эффекта, связанного с жизненным биологическим циклом объектов природной среды и приводящего к “усилению” воздействия антропогенных факторов на природную среду. Так как листья растений являются наиболее чувствительными к действию атмосферных загрязнителей, древесные культуры могут быть использованы как “живые датчики” экологического состояния среды, а в качестве контролируемых параметров могут использоваться оптические коэффициенты.

2. *Методика экспериментов.* В результате биологических исследований [9] установлено, что наиболее чувствительной к атмосферным загрязнителям является береза повислая, в связи с чем она и была выбрана в качестве объекта контроля. Пункты отбора листьев березы обусловлены наличием в них постов Самарского гидрометеоцентра по измерению концентрации загрязнителей в атмосфере [10] и насыщенностью окружающего воздуха продуктами сгорания топлива автомобильных двигателей от близлежащих транспортных магистралей.

Все исследования проводились в одно и то же время суток на протяжении пяти месяцев вегетации зеленой пластины березы с мая по октябрь 2007 и 2008 годов. Для каждого эксперимента отбиралось по три контрольных листа с трех разных ярусов трех разных берез в пределах каждого пункта наблюдения. Для каждого листа проводилось измерение спектра обратного рассеяния. После этого данные образцы использовались



Рис. 1: Положение пунктов контроля в городе Самаре.

для определения концентрации хлорофилла в них биохимическим методом Брагинского [11].

Пункты 4 и 5 находятся в зеленой зоне города Самары, однако пункт 4 находится вблизи оживленной автотрассы, а отбор листьев в пункте 5 осуществлялся из сквера, удаленного от транспортных магистралей. Данный пункт (Поселок Управленческий) использовался в качестве контрольного пункта, отражающего естественную календарную тенденцию изменения оптического состояния растений в процессе жизненного цикла в условиях средней полосы России.

Нам удалось найти измеряемый параметр, чувствительный к наличию и количеству атмосферных загрязнений и нечувствительный к условиям измерений и частным особенностям объектов, например, к расстоянию до листа, степени его увядания и т.д. Таким параметром оказалось отношение интенсивностей R обратного рассеяния света на длинах волн 750 и 550 нм

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

Будем далее называть его относительным коэффициентом обратного рассеяния.

Измеренные в пункте 5 значения K_5 использовались при определении дифференциального коэффициента обратного рассеяния ΔK в других пунктах наблюдения

$$\Delta K = \frac{K_5(t, \{T\}, 0) - K_i(t, \{T\}, \{C\})}{K_5(t, \{T\}, 0)}, \quad (2)$$

где зависимость от времени t отражает изменение данных параметров вследствие есте-

ственного жизненного цикла растения, $\{T\}$ – учитывает влияние климатических факторов (прежде всего температуры и влажности), а $\{C^*\}$ – параметрическую зависимость от концентрации атмосферных загрязнителей.

Для выявления статистического разброса оптических характеристик листьев с растений, расположенных в пределах одного пункта наблюдения, были измерены дифференциальные оптические коэффициенты ΔK 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%.

3. *Результаты исследований.* Все исследования проводились на многофункциональном экспериментальном стенде, который ранее был использован в наших работах [12].

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

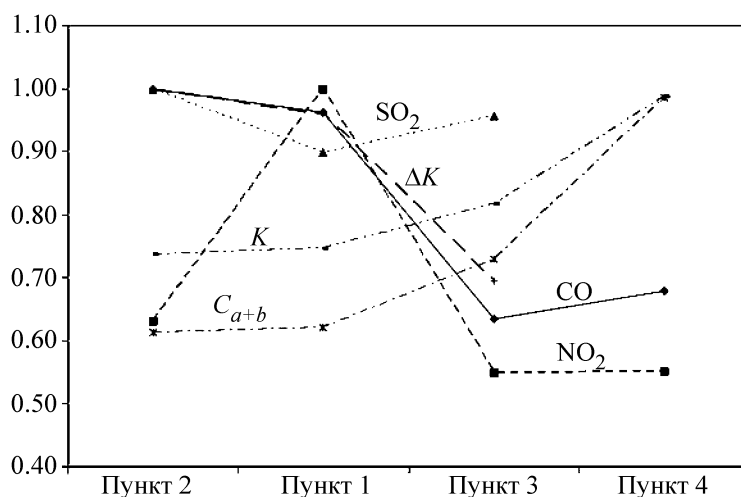


Рис. 2: Нормированные на максимальную концентрацию атмосферных загрязнителей и значения коэффициентов K и ΔK для различных пунктов в сентябре.

Анализ представленных данных показывает, что, как и следовало ожидать, увеличение значения относительного коэффициента обратного рассеяния K от пункта к пункту сопровождается аналогичным увеличением концентрации хлорофилла C_{a+b} . Причем увеличение концентраций CO и NO_2 ведёт к уменьшению величины K и увеличению ΔK . Корреляций между значениями оптических коэффициентов и концентрацией SO_2 не обнаружено. Напротив, изменение дифференциального коэффициента ΔK отражает характер изменения как CO , так и NO_2 (основных компонентов выбросов автомо-

бильных двигателей). Следует подчеркнуть, что данный коэффициент отражает интегрированное воздействие данных загрязнителей и имеет нелинейный параметрический характер.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента K от суммарной концентрации хлорофилла C_{a+b} . Аппроксимация измеренных значений представлена на рисунке штрих-пунктирной линией. В отличие от линейной зависимости, характерной для растения в отсутствие внешней антропогенной нагрузки [13], данная связь является полиномиальной и может быть представлена в виде:

$$K = k_0 + k_1 \cdot C_{a+b} - k_2 \cdot C_{a+b}^2, \quad (3)$$

где постоянные $k_0 = 1.22$, $k_1 = 1.92$, $k_2 = 0.19$, а C_{a+b} выражено в мг/г.

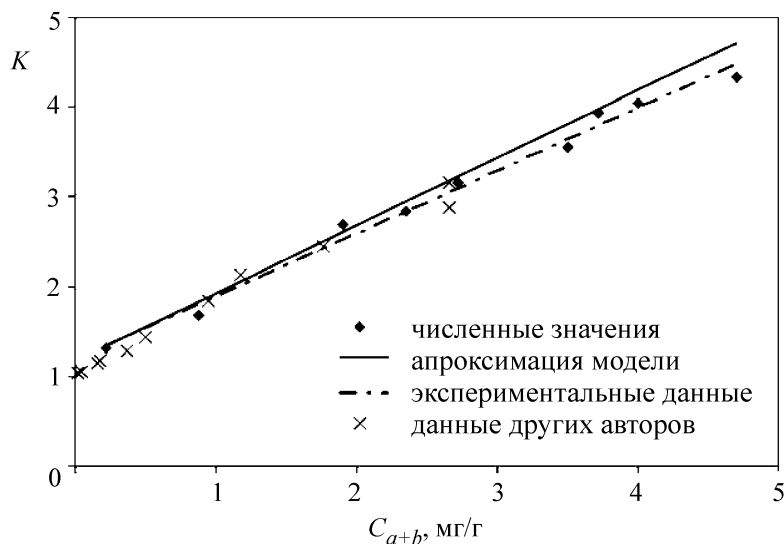


Рис. 3: Зависимость относительного коэффициента обратного рассеяния K от суммарной концентрации хлорофилла C_{a+b} . Ромбы – значения, рассчитанные по модели [14], сплошная – аппроксимация модели [14], штрих-пунктир – аппроксимация экспериментальных данных, косые кресты – данные других авторов [15].

Установленные параметрические функциональные связи между значениями K и концентрацией атмосферных загрязнителей позволяют применить оптический метод контроля состояния растений, который был апробирован на примере города Самары, для экологического картографирования территорий городов.

Гистограмма изменения оптических коэффициентов и концентрации загрязнителей в исследованных районах города Самары представлена на рис. 4.

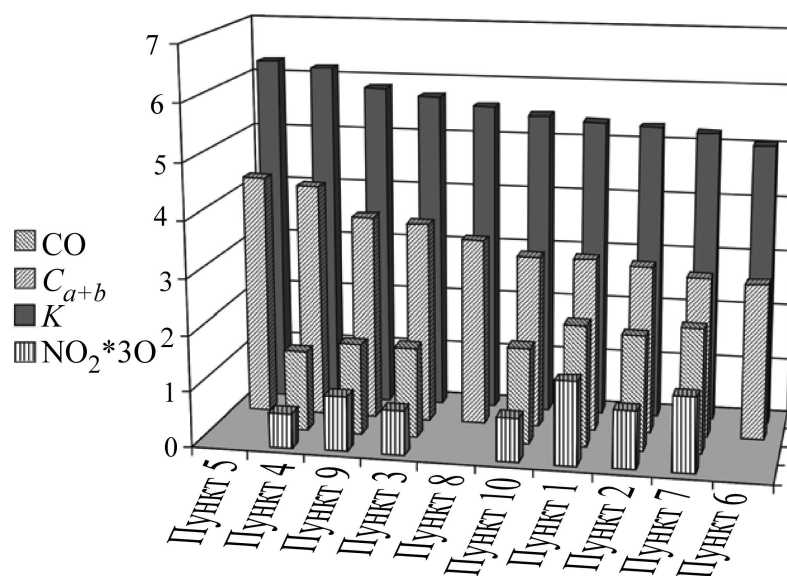


Рис. 4: Относительные коэффициента обратного рассеяния K , суммарные концентрации хлорофиллов C_{a+b} и концентрации атмосферных загрязнителей CO и NO_2 для всех пунктов исследования в июне.

Таким образом показано, что повышение коэффициента K соответствует интегральному уменьшению концентрации загрязнителей и наоборот. Из гистограммы видно, что наименее экологически благополучное состояние соответствует пункту 6 (Автовокзал).

4. *Выводы.* Найден параметр, чувствительный к наличию загрязнителей и нечувствительный к условиям измерений – отношение интенсивностей обратного рассеяния света на длинах волн 750 и 550 нм.

Экспериментально установлена корреляция между интегральной величиной суммарной концентрации антропогенных веществ, характерных для выхлопов двигателей внутреннего сгорания (CO , NO_2 , SO_2) и изменением величины коэффициента обратного рассеяния. Детальный анализ показал, что наибольшее влияние на величину K оказывает концентрация оксида углерода.

Установлено, что присутствие атмосферных антропогенных факторов приводит к нелинейности зависимости величины K от суммарной концентрации хлорофилла. Проведенные экспериментальные исследования позволили предложить квадратичную полиномиальную аппроксимацию (3) данной зависимости.

Установленные функциональные связи дифференциального коэффициента обратного рассеяния с концентрацией хлорофиллов в листе и их параметрические зависимости

от концентрации атмосферных антропогенных факторов позволили применить метод измерения оптических коэффициентов для экологического картографирования территории города, на примере города Самары.

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”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] П. И. Бреслер, *Оптические абсорбционные газоанализаторы и их приложение* (Л., Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980).
- [2] В. М. Немец, А. А. Петров, А. А. Соловьев, *Спектральный анализ неорганических газов* (Л., Химия, 1988).
- [3] И. М. Назаров, *Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения окружающей природной среды* (Л., Гидрометеиздат, 1989).
- [4] Б. И. Герасимов, И. В. Кораблев, В. Р. Козлов, С. В. Мищенко, *Методы и приборы экологического мониторинга: Учебное пособие* (Тамбов, ТГТУ, 1996).
- [5] Ю. А. Израэль, *Экология и контроль состояния природной среды* (Л., Гидрометеиздат, 1984).
- [6] *Электроаналитические методы в контроле окружающей среды*. Под ред. Р. Кальведа (М., Химия, 1990).
- [7] M. N. Proffitt and A. O. Langford, *Appl. Opt.* **36**, 2568 (1997).
- [8] S. K. Rafiq, V. A. Ganai, G. A. Bhat, *Int. J. Environ. Res.* **2**(4), 371 (2008).
- [9] И. С. Майдебура, *Естественные и технические науки*, № 4(сер. 24), 136 (2006).
- [10] *Исследования содержания концентрации вредных веществ в городе Самаре: отчёт о НИР* (Самарский гидрометеоцентр, 2007).
- [11] Л. П. Брагинский, В: *Проблемы аналитической химии* (М., Москва, 1997), стр. 278.
- [12] В. П. Захаров, О. Н. Макурина, Е. В. Тимченко, и др., *Экологический мониторинг города Самары с помощью метода дифференциального обратного рассеяния*. В: *Вестник СГАУ* (Самара, Изд-во СГАУ, 2008), № 2(15), стр. 261.
- [13] M. N. Merzlyak, A. A. Gitelson, O. B. Chivkunova, V. Y. Rakitin. *Physiol Plant.* **106**, 135 (1999).

- [14] В. П. Захаров, И. А. Братченко, А. Р. Синдяева, Е. В. Тимченко, Оптика и спектроскопия **107**(6), 957 (2009).
- [15] М. Н. Мерзляк, Физиология растений **44**(5), 707 (1997).

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 21 июня 2010 г.