

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

© 2008 В.П. Захаров¹, О.Н. Макурина², Е.В.Тимченко^{1,3}, П.Е.Тимченко¹,
С.П. Котова³, Р.В. Валиуллов¹

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет

² Самарский государственный университет

³ Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Исследовано применение метода дифференциального обратного рассеяния и флуоресцентного анализа для оценки экологического качества древесных культур на территории города Самары. Показана корреляция оптических характеристик листьев древесных культур с данными химического анализа содержания основных пигментов в них. Экспериментально установлено, что метод дифференциального обратного рассеяния позволяет идентифицировать районы города по экологической значимости.

Экологический мониторинг, дифференциальное обратное рассеяние, флюоресценция, химический анализ, нелинейный коэффициент, дифференциальный коэффициент, атмосферные загрязнители

Введение

Одной из наиболее актуальных задач экологического мониторинга является разработка оптических методов дистанционного контроля природной среды, подвергающейся воздействию естественных и антропогенных факторов. Следует отметить, что существующие методы контроля, такие, как абсорбционный анализ и метод обратного рассеяния [1], флуоресцентный анализ [2], как правило, базируются на измерении концентрации 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. Вместе с тем данные выбросы оказывают интегрированное воздействие на биологические объекты окружающей среды, и во многих случаях комбинированное многофакторное воздействие может приводить к существенной экологической нагрузке на биологические объекты даже при соблюдении норм по каждому отдельно взятому загрязнителю. Следует также учитывать возможность накопительного эффекта, связанного с жизненным биологиче-

ским циклом объектов природной среды, и, следовательно, к «усилению» воздействия антропогенных факторов на природную среду. С этой точки зрения, по мнению авторов наиболее естественным критерием благополучия экологического состояния является контроль наиболее значимых биологических свойств объектов природной среды. Учитывая, что листья растений являются наиболее чувствительными к действию атмосферных загрязнителей, древесные культуры могут быть использованы как «живые датчики» экологического состояния среды, а в качестве основного контролируемого параметра может использоваться жизненный потенциал растения [3], напрямую связанный с концентрацией хлорофилла а и в в листьях растений.

Целью данной работы является разработка оптического метода определения жизненного потенциала растений и применение его для экологического контроля городских территорий на примере города Самары. Как было показано нами ранее [4], дифференциальный метод обратного рассеяния позволяет проводить спектральный анализ растительной среды и, в частности, определять относительную концентрацию хлорофилла в исследуемой среде. Альтернативным оптическим дистанционным методом контроля

является метод лазерной индуцированной флюоресценции [5,6,7]. Следует отметить, что последний метод является активным, т.е. требует дополнительного источника лазерного излучения, в то время как метод обратного рассеяния может быть реализован и как активное, и как пассивное устройство, используя естественные источники освещения.

1. Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны близкие по структуре одновозрастные насаждения березы в пяти точках города Самары (см. табл.1 и рис.1), расположенных на Московском шоссе, пересекающем город Самару и являющемся одновременно транспортной магистралью республиканского значения.

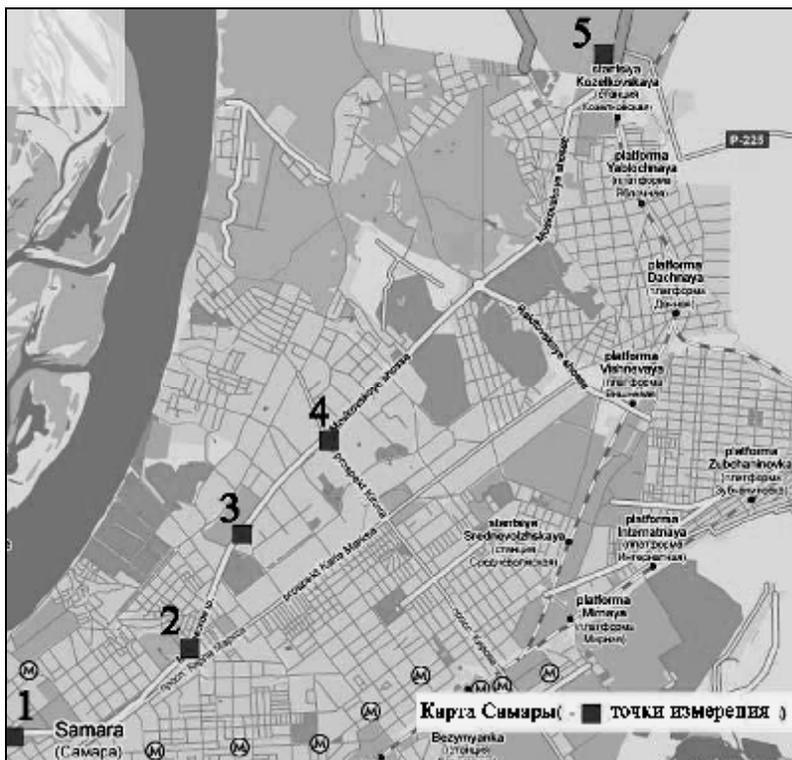


Рис. 1. Положение пунктов контроля

Таблица 1. Пункты исследования

Пункт	Положение (пересечение)	Примечание
1	Площадь Революции	
2	Центральный автовокзал	Пересечение двух республиканских магистралей
3	Завод имени Тарасова	
4	Проспект Кирова	Пересечение крупнейших транспортных магистралей г.Самары
5	Поселок Управленческий	Зеленая зона г. Самары

Пункт 5 (поселок Управленческий), находящийся в зеленой зоне города, 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 время суток на протяжении пяти месяцев вегетации зеленой пластины березы.

Отбиралось по три контрольных листа с разных ярусов трех различных берез в пределах каждого пункта наблюдения.

Спектральная интенсивность обратного рассеяния листьев берез регистрировалась с помощью экспериментального стенда, представленного на рис. 2 [5].

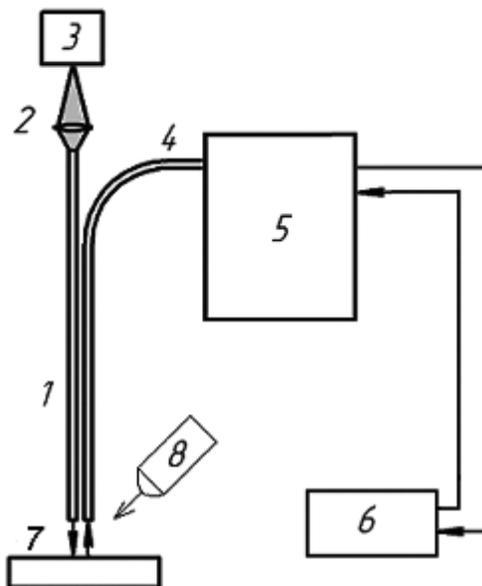


Рис. 2 - Экспериментальный стенд:
1 – подающее волокно, 2 – фокусирующая линза, 3 – источник света (галогеновая лампа),
4 – приемное волокно, 5 – спектрограф «shamrock sr-303i», 6 – компьютер,
7 – объект исследования, 8 – лазерный диод

Экспериментальная установка включала в себя источник излучения на основе галогеновой лампы, волоконную систему сбора и подачи излучения и спектрофотометр SR-303i, что обеспечивало измерения с погрешностью, не превышающей 4% в видимой и ближней инфракрасной областях спектра от 400 до 1000 нм [4,6]. Эта область спектра соответствует полосам эффективного поглощения основных пигментов, участвующих в фотосинтезе листа. Учитывая, что основным поглотителем излучения является хлорофилл, который участвует в фотосинтезе, он был выбран в качестве основного датчика жизнестойкости древесных культур.

Для исследования интенсивности флюоресценции листьев берез тепловой источник заменялся на лазерный диод мощностью 1 мВт на длине волны 460 нм, которая попадает в полосу поглощения хлорофилла.

Для контроля адекватности оптических методов на тех же исследуемых образцах дополнительно проводился биохимический

анализ фотосинтетических пигментов по методу Брагинского [8].

2. Результаты исследования

2.1. Биохимический анализ

Результаты химического анализа по определению количественного содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы по методу Брагинского [8] представлены на рис. 3.

Видно, что процесс завершения вегетации (июнь) сопровождается увеличением концентрации хлорофилла в массе листа с последующим спадом концентрации по мере старения листа и практически полным его исчезновением в октябре. В то же время деградация хлорофиллов в ходе старения сопровождается сохранением значительной части каротиноидов, что обуславливает более глубокое проникновение излучения в массу листа и приводит вследствие этого к увеличению поглощения в области 550 нм.

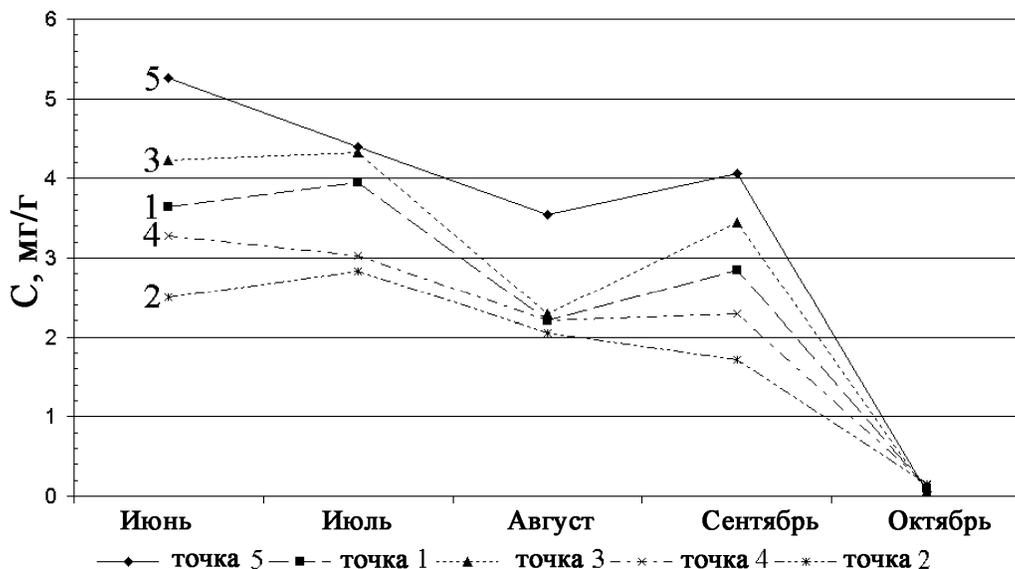


Рис. 3. Содержание хлорофилла (a+b) в листьях березы на различных этапах вегетации, полученное методом Брагинского [8]

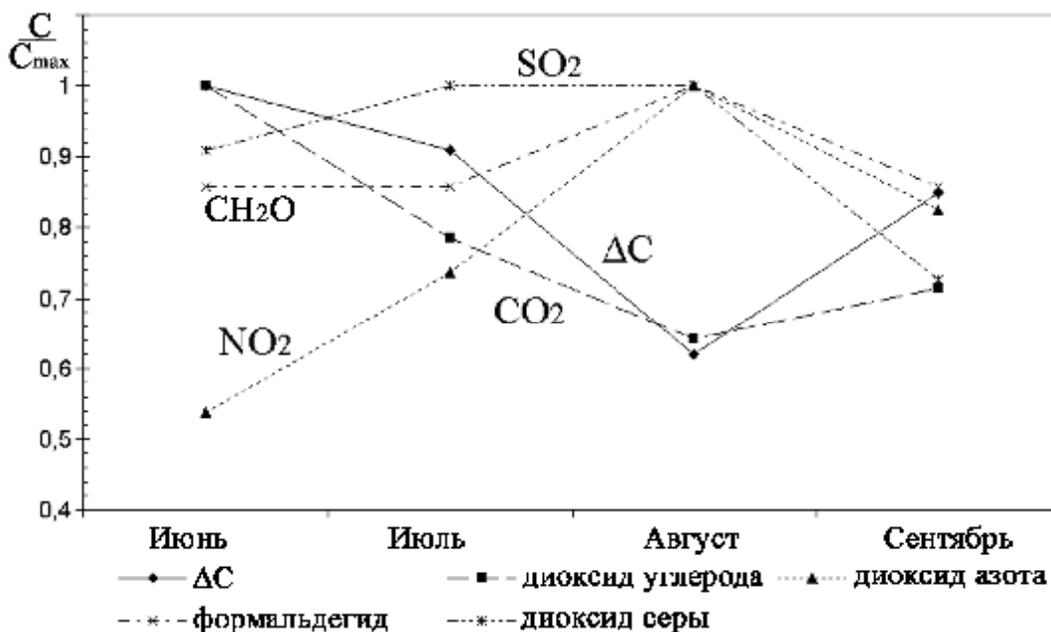


Рис.4. Нормированные концентрации хлорофиллов a и b в листьях березы и основных атмосферных загрязнителей[9] в пункте наблюдения 4

Характер изменения концентрации хлорофилла носит наиболее плавный характер только в контрольном пункте, соответствующем зеленой зоне. Во всех остальных контрольных пунктах наблюдается нелинейный характер изменения концентрации, связанный с влиянием внешних загрязнителей. Это позволяет ввести функцию ΔC , учитывающую влияние внешних загрязнителей на изменение концентрации хлорофилла:

$$\Delta C(t) = C(t) / C_0(t), \quad (1)$$

где $C_0(t)$ – изменение концентрации, обусловленное естественным биофизическим жизненным циклом растения, а $C(t)$ – концентрация хлорофиллов в листьях растения в пункте наблюдения.

На рис.4 представлены графики изменения нормированных на максимальное значение концентраций хлорофилла в листьях

березы и различных атмосферных загрязнителей в воздухе в контрольном пункте 4. Видно, что основной вклад в изменение нелинейной концентрации $\Delta C(t)$ вносит смесь углекислого газа.

2.2. Спектральный анализ

Характерная статистически усредненная нормированная спектральная зависимость коэффициента обратного рассеяния представлена на рис. 5а. Видно, что характер зависимости коэффициента обратного рассеяния от длины волны имеет качественно схожий характер (коэффициент корреляции превышает 0,94) для всех пунктов наблюдения, существенно отличаясь только амплитудой в спектральном диапазоне вблизи 550 нм, где лежат основные полосы поглощения хлорофиллов *a* и *b*. Спектральная интенсивность рассеяния вблизи 750 нм для всех пунктов наблюдения практически идентична. Это обусловлено тем фактором, что в качестве объекта исследования использовался один вид одновозрастной древесной растительности (береза), поэтому на данной длине волны основной вклад в интенсивность рассеяния вносят межклеточные вещества, характерные для данного вида растительности, которые практически неизменны на протяжении активной фазы жизненного цикла листа [4]. Фактически величина локального максимума вблизи 550 нм напрямую связана с концентрацией основных фотосинтезирующих пигментов растения и может быть использована как количественный критерий жизненного потенциала растения. Увеличение амплитуды пика соответствует меньшей концентрации хлорофилла и, следовательно, менее экологически благополучной ситуации в пункте наблюдения. Следовательно, согласно данным рис.5 наименее благоприятное состояние окружающей среды соответствует пункту 2, т.е. пересечению межреспубликанских трасс с максимальным пиковым значением выбросов углекислого газа.

Одновременно проводилась регистрация интенсивности лазерно-индуцированной флуоресценции, характерная спектральная зависимость которой представлена на рис. 5б. Индуцированная флуоресценция имеет два характерных для хлорофилла максимума в красной области спектра на длинах волн 685

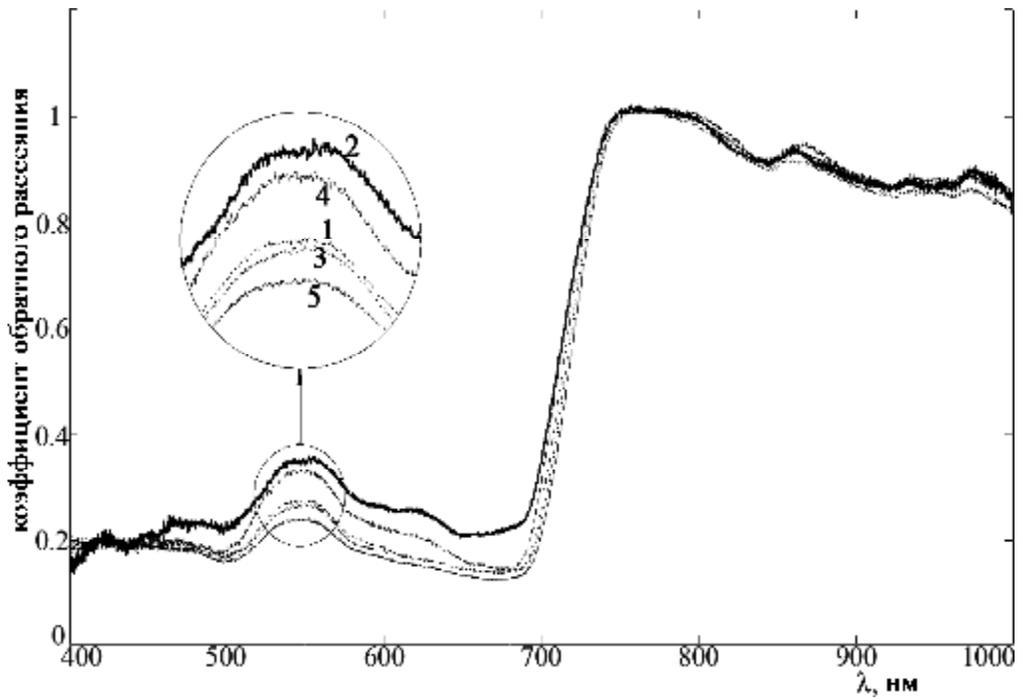
и 735-740 нм [7], однако, за счет уширения идет частичное перекрытие спектров люминесценции и уверенная регистрация возможна только при превышении концентрации хлорофилла определенного порогового значения.

Как видно из графиков рис. 5б, флуоресцентные отклики уменьшаются в процессе уменьшения экологической значимости пунктов наблюдения. Последующее уменьшение интенсивности флуоресценции связано, по-видимому, с уменьшением концентрации хлорофилла: высокая фотосинтетическая активность не требуется в условиях стресса и фотосинтетический аппарат редуцируется. По мере старения листа концентрация хлорофилла падает и флуоресцентный отклик наблюдается только в области 684 нм (рис. 6), что свидетельствует о деградации хлорофилла в процессе старения листа и является характерным для древесных культур с хорошими защитными механизмами.

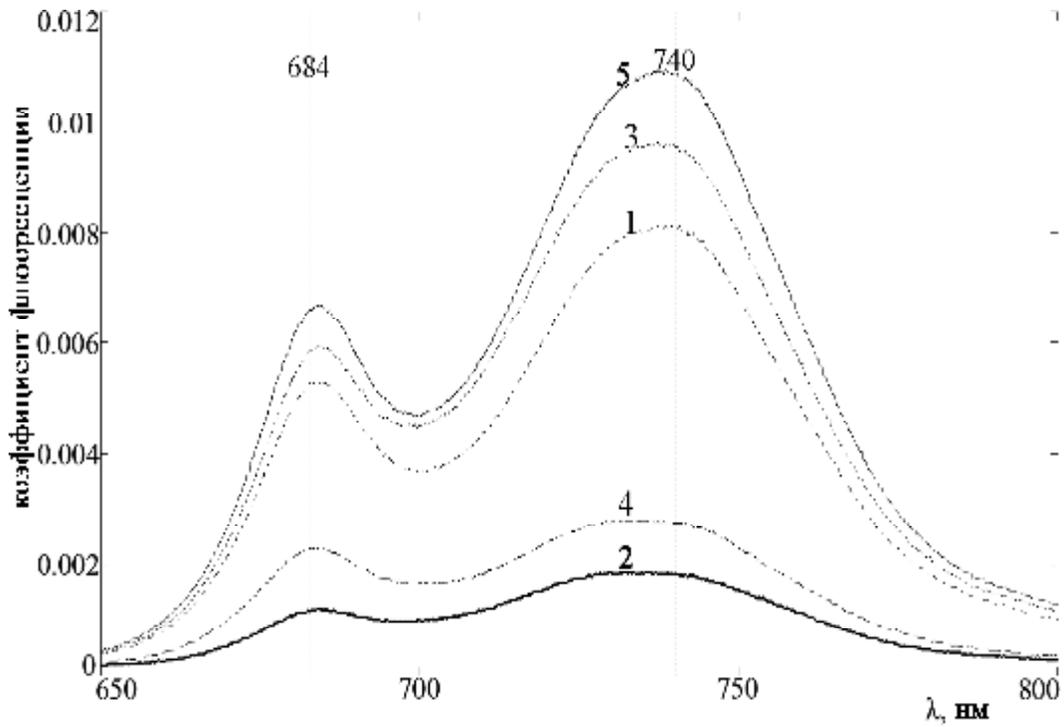
Из приведенных результатов также следует, что защитные механизмы жизнестойких древесных культур, находящихся в экологически неблагоприятной среде с повышенным содержанием углекислого газа (рис. 4), срабатывают медленнее, о чем отчетливо свидетельствует меньшая степень деградации хлорофилла в экологически неблагоприятных пунктах наблюдения 3 и 4, соответствующих пересечению интенсивно загруженных трасс (рис. 6).

Следует, однако, иметь в виду, что изменение абсолютного значения интенсивности обратного рассеяния обусловлено несколькими факторами: состоянием поверхности (включая ворсистость и влажность), естественным изменением концентрации (см. формулу (1)) и изменением спектральных характеристик вследствие аккумуляции в массе листа загрязнителей атмосферы. Для исключения первого фактора, который не зависит от состояния окружающей среды, весь последующий анализ проводился для дифференциального коэффициента обратного рассеяния, который определялся как отношение коэффициентов рассеяния R на длине волны 750 нм и 550 нм:

$$K(t) = \frac{R_{750}(t)}{R_{550}(t)} \quad (2)$$



а)



б)

Рис. 5 - Спектральная интенсивность обратного рассеяния (а) и лазерно-индуцированной флуоресценции (б) излучения от листьев березы в августе в различных пунктах наблюдения: 1 (— · — · штрих-штрих пунктир), 2 (— жирная сплошная кривая), 3 (— · — штрих-пунктир), 4 (---- пунктир), 5 (— тонкая сплошная кривая)

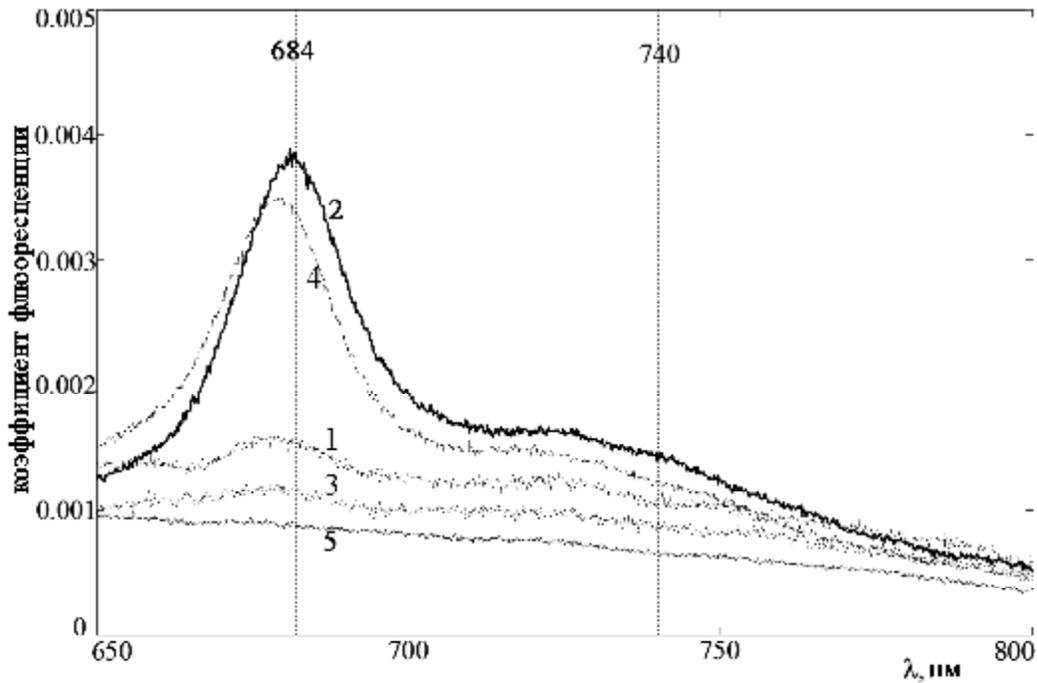


Рис. 6. Лазерно-индуцированная флуоресценция хлорофилла листьев березы в октябре в различных пунктах наблюдения: 1 (— · — · штрих-штрих-пунктир), 2 (— жирная сплошная кривая), 3 (— · — штрих-пунктир), 4 (---- пунктир), 5 (— тонкая сплошная кривая)

Учитывая, что влияние шероховатости поверхности на коэффициент рассеяния слабо зависит от длины волны в видимом диапазоне спектра, использование формулы (2) практически полностью (погрешность не более 0,1%) исключало влияние состояния поверхности на анализируемые зависимости. Аналогично, используя корреляцию интенсивностей в пиках с содержанием хлорофилла в листьях, для флуоресцентного отклика удобно использовать дифференциальный коэффициент, определяемый как отношение интенсивностей флуоресценции на длинах волн 740 и 684 нм

$$F(t) \approx \frac{F_{684}(t)}{F_{740}(t)}. \quad (3)$$

По аналогии с формулой (1) наряду с относительным коэффициентом флуоресценции $F(t)$ использовался нелинейный коэффициент флуоресценции $\Delta F(t)$

$$\Delta F(t) = \frac{F_n(t)}{F_0(t)}, \quad (4)$$

где n – номер пункта наблюдения, а в качестве естественного коэффициента флуоресценции F_0 использовались значения в контрольном пункте 5, соответствующем зеленой зоне города.

На рис. 7 представлены зависимости дифференциальных коэффициентов обратного рассеяния, и флуоресценции от времени.

Как видно из рис. 7, знак производной функции дифференциального коэффициента обратного рассеяния $K(t)$ совпадает с знаком производной функции $\Delta C(t)$, а знак производной функции дифференциального коэффициента флуоресценции $F(t)$ – с производной функции календарного изменения концентрации CO_2 . Следовательно, можно утверждать, что дифференциальные функции содержат информацию об этих загрязнителях.

Анализ зависимости (рис. 8) от времени нелинейного коэффициента $\Delta F(t)$ показывает, что коэффициент флуоресценции $\Delta F(t)$ качественно правильно отражает тенденцию изменение жизненного потенциала растения, однако наблюдаются и существенные отличия. Они, прежде всего, связаны с меньшим значением производной по времени от данных функций (сказывается «демпфирующее» и накопительное действие репродукционного механизма растения). Кроме того, если функциональная зависимость изменения концентрации хлорофилла практически повторяет зарегистрированную среднестатистическую зависимость от времени концен-

трации окиси углерода (ввиду его прямого участия в работе фотосинтетического аппарата листа), то коэффициент флюоресценции ввиду перекрытия спектров различных веществ, аккумулированных листом, включают в себя наряду с этим и количественные зависимости от других загрязнителей, в частности формальдегидов и диоксида азота

(рис. 8), имеющие обратный знак производной по сравнению с временной зависимостью концентрации диоксида углерода. Таким образом, можно утверждать, что оптические методы контроля описывают многофакторную интегрированную зависимость жизненного потенциала растений от уровня загрязнения окружающей среды.

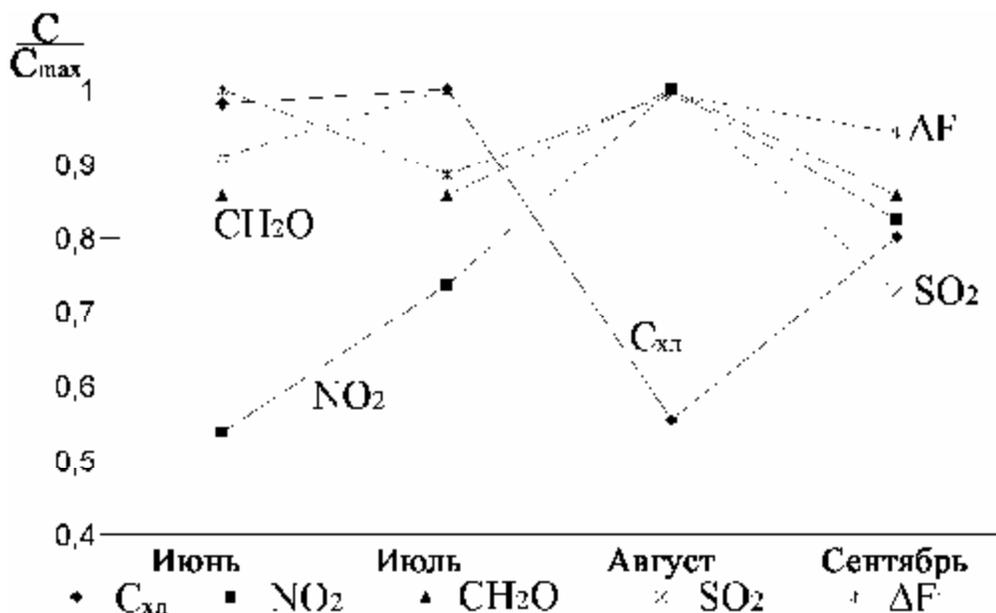


Рис. 7. Изменения дифференциальных коэффициентов обратного рассеяния $K(t)$ и флюоресценции $F(t)$ листьев березы и нормированной концентрации основных атмосферных загрязнителей (по данным работы [8])

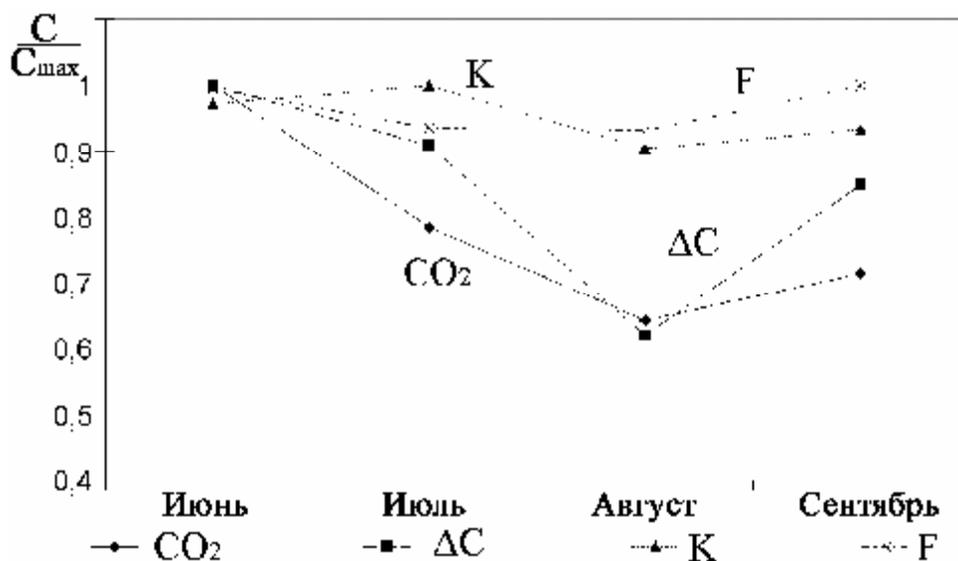


Рис. 8. Изменения нелинейного коэффициента флюоресценции $\Delta F(t)$, концентрации хлорофиллов в листьях березы, полученные по методу Брагинского, и концентрации основных атмосферных загрязнителей (по данным работы [8])

Выводы

1. Использование метода дифференциального обратного рассеяния позволяет давать качественную оценку состояния древесных культур в различные периоды вегетации и определять его жизненный потенциал, объективно ранжируя тем самым районы города по степени экологического состояния.

2. Анализ нелинейного коэффициента обратного флуоресценции показал, что его значения коррелируют с изменением концентрации атмосферных загрязнителей для различных районов города Самары.

3. Изменение физиологического состояния растения, вызванные антропогенными факторами, непосредственно отражаются на значениях интенсивности максимумов спектральной интенсивности флуоресценции и зависят от степени загрязнения (в том числе многофакторного) в отсутствие визуальных признаков повреждения и, даже, при отсутствии изменений концентрации хлорофилла в массе листа.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2006-2008 годы) и гранта РФФИ 08-02-99038-р_офи.

Библиографический список

1. **Mezlyak, M.N.** Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves [Текст] / M.N. Mezlyak, A.A. Gitelson // *Geophysical research letters*. – 2006. – v.33. – P.1-5.

2. **Saito, Y.** Investigation of laser – induced fluorescence of several leaves for application to lidar vegetation monitoring [Текст] / Y. Saito [and other] // *Appl. Opt.* – 1998. – v. 37. – p. 431-437.

3. **Мерзляк, М.Н.** Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе [Текст] / М.Н. Мерзляк // *Физиология растений*. – 1997. – Том 44, №5. – С.707-716.

4. **Воробьева, Е.В.** Экспериментальные исследования и математическое моделирование оптических характеристик растительной ткани [Текст] / Е.В. Воробьева [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2007. – Т.9, №3 (21). – С. 620-625.

5. **Веселовский, В.А.** Люминесценция растений [Текст] / В.А. Веселовский, Т.В. Веселова – М.: Наука, 1990.

6. **Захаров, В.П.** Моделирование влияния покровных тканей растения на характеристики рассеянного обратного излучения [Текст] / В.П. Захаров, И.А. Братченко, Е.В. Тимченко // *Вестник СГАУ*, 2008.

7. **Fateeva, N.L.** Application of the method of laser-induced fluorescence [Текст] / N.L. Fateeva, G.G. Matvienko // *SPIE Proceedings on «Remote Sensing»*. – 2003. – 5232. – P.652-657.

8. **Braginsky, L.P.** Problems of analytic chemistry: [Текст] / L.P. Braginsky – Moscow, Science, 1997. – P. 27-38.

9. Исследования содержания концентрации вредных веществ в городе Самары [Текст] // Отчет гидрометеоцентра, 2006.

Информация об авторах

Захаров Валерий Павлович, профессор кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, доктор физико-математических наук, профессор, zakharov@ssau.ru. Область научных интересов – физика плазмы, нелинейная оптика, взаимодействия лазерного излучения с биообъектами, медицинская лазерная техника

Тимченко Елена Владимировна, инженер, аспирантка 3-го курса Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (специальность «оптика»), vorobjeva.82@mail.ru. Область научных интересов – оптические методы

диагностики, взаимодействие низкоинтенсивного лазерного излучения с биологическими объектами.

Валиуллов Руслан Валерьевич, инженер, соискатель 3-го курса Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (специальность «приборы и методы экспериментальной физики»), mts_rus@list.ru. Область научных интересов – оптические методы диагностики, взаимодействие низкоинтенсивного лазерного излучения с биологическими объектами.

Тимченко Павел Евгеньевич инженер, аспирант 3-го курса Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (специальность «приборы и методы экспериментальной физики»), timpavel@mail.ru. Область научных интересов – оптические методы диагностики, 3D визуализация многократно рассеивающих сред.

Котова Светлана Павловна, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией автоматизации и моделирования лазерных систем Самарского филиала ФИАН, кандидат физико-математических наук, доцент, kotova@fian.smr.ru. Область научных интересов – разработка корректоров волнового фронта, распространение лазерного излучения в биотканях, методы лазерной манипуляции микроскопическими объектами.

Макурина Ольга Николаевна, профессор, доктор биологических наук, профессор, Самарский государственный университет, dekanat.05.54@mail.ru. Область научных интересов – биохимия, химический анализ, экология.