

Флуоресценция листьев тополей, растущих вблизи автомобильных дорог

В.В. Заворуев^{1,2}, Е.Н. Заворуева^{2*}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок

²Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82

Поступила в редакцию 30.07.2010 г.

Исследована динамика отношения интенсивностей дальней красной F_{734} к красной F_{682} флуоресценции хлорофилла листьев тополей, растущих вблизи автомобильных дорог. Установлено, что величина параметра F_{734}/F_{682} достоверно выше у растений, расположенных вблизи магистралей с интенсивным автомобильным движением. Обсуждается влияние температуры и диоксида углерода на изучаемый параметр.

Ключевые слова: красная и дальняя красная флуоресценция хлорофилла, листья тополя, температура, диоксид углерода; red and far-red fluorescence of chlorophyll, the poplar leaves, temperature, carbon dioxide.

Для исследования и контроля влияния окружающей среды на фотосинтезирующие организмы используются различные флуоресцентные параметры. Один из них — отношение интенсивностей дальней красной F_{734} к красной F_{682} флуоресценции хлорофилла. Величина параметра F_{734}/F_{682} изменяется в результате влияния как климатических, так и антропогенных факторов [1–3]. Выявлены закономерности изменения параметра F_{734}/F_{682} листьев деревьев в зависимости от времени их вегетации [2, 4], наличия в питательной среде тяжелых металлов [5], степени загрязнения воздушной среды [6]. Установлено, что в тех районах г. Красноярск, где индекс загрязнения атмосферы характеризуется как очень высокий и где основная доля выбросов приходится на промышленные предприятия, величина параметра F_{734}/F_{682} листьев деревьев ниже, чем у тех же растений, растущих в благоприятных экологических условиях [7].

В этих промышленных районах наблюдается интенсивное движение транспорта и, следовательно, в атмосферу в большом количестве выбрасываются выхлопные газы двигателей автомобилей. Чтобы оценить их влияние на интенсивность красной и дальней красной флуоресценции хлорофилла, была исследована вегетационная динамика параметра F_{734}/F_{682} листьев деревьев, растущих в жилых районах г. Красноярск вблизи автомобильных дорог. Результаты представлены в настоящей статье.

* Валерий Владимирович Заворуев (valzav@icm.krasn.ru); Елена Николаевна Заворуева (elena_zavoruева@mail.ru).

Материал и методы исследования

Объектом исследования являлись листья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Пробы собирали в мае–октябре 2008 г. Отбор проб осуществляли с деревьев, произрастающих на трех придорожных участках.

Контрольные деревья располагались вблизи дороги с низкой интенсивностью движения машин (около 100 авто/ч). Этот участок (№ 1) расположен на высоте 310–312 м над уровнем моря в районе Сибирского федерального университета.

Деревья на участке № 2 росли вблизи перекрестка с высокой интенсивностью движения (более 4200 авто/ч). Перекресток (пересечение ул. Высотная и просп. Свободный) расположен в Октябрьском районе на высоте 202 м над уровнем моря.

Тополя на участке № 3 испытывали влияние автотранспортного потока с интенсивностью движения около 2100 авто/ч. Участок расположен на высоте 159 м над уровнем моря вблизи пересечения ул. Профсоюзов с просп. Ленина.

Методика измерения интенсивности красной и дальней красной флуоресценции хлорофилла листьев деревьев дана в работе [8], описание флуориметра — в [9].

Перед регистрацией флуоресценции высечки листьев деревьев выдерживали в темноте в чашке Петри с влажной фильтровальной бумагой в течение 10–15 мин [10].

Фотосинтетические пигменты из листьев экстрагировали 96%-м этанолом, концентрации пигментов определяли спектрофотометрически, используя коэффициенты экстинкции [11].

Результаты и их обсуждение

Динамика изменения параметра F_{734}/F_{682} , характеризующего количество реакционных центров первой фотосистемы (РЦ-I) [12] для листьев тополей, растущих в различных экологических условиях, показана на рис. 1.

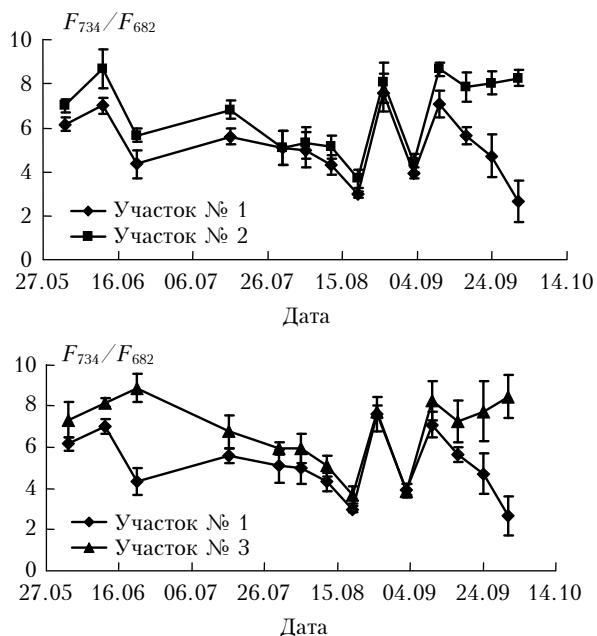


Рис. 1. Динамика изменения отношения интенсивностей дальней красной к красной флуоресценции хлорофилла листьев тополей, растущих в различных экологических условиях

Листья тополей, растущих вблизи автомобильных дорог с интенсивным движением (участки № 2 и 3), характеризуются в большинстве случаев высокими значениями параметра F_{734}/F_{682} по сравнению с контрольными значениями (участок № 1).

Увеличение количества РЦ-I в листьях могли вызвать различия в температурных условиях в местах произрастания тополей. Термические различия обусловлены двумя причинами. Во-первых, участки располагаются на различной высоте над уровнем моря. Во-вторых, участки № 2 и 3 располагаются в так называемых «островах тепла», причем зона № 3 теплее, чем зона № 2. В «островах тепла» температура воздуха была выше, чем в контроле, почти на 2 и 1° соответственно.

Известно, что с увеличением температуры увеличивается содержание хлорофилла в растениях [13]. На рис. 2 показана динамика концентрации суммы хлорофиллов в листьях исследуемых тополей, растущих в различных температурных условиях.

Полученные результаты находятся в полном соответствии с литературными данными [13]. Концентрация суммы хлорофиллов была выше в листьях деревьев, произрастающих в районе «островов тепла» (участки № 2 и 3), чем у тополей, растущих на участке № 1. Причем на участке № 3 концентрация пигментов в листьях была выше, чем на уча-

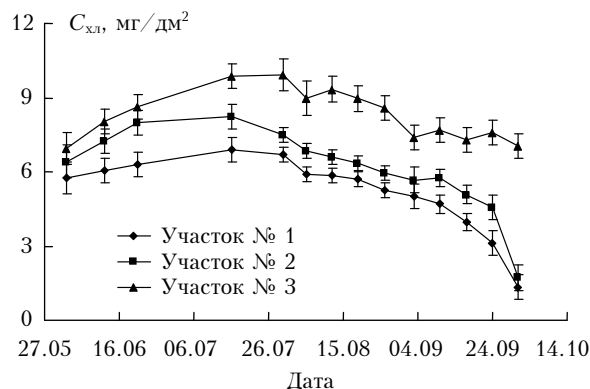


Рис. 2. Динамика изменения концентрации суммы хлорофиллов в листьях тополей, растущих в различных экологических условиях

стке № 2, т.е. чем выше температура окружающей среды, тем больше концентрация хлорофилла в листьях деревьев.

Для реакционных центров первой фотосистемы такая температурная закономерность не сохраняется. Действительно, по сравнению с участком № 1 наибольшее количество достоверных различий величин параметра F_{734}/F_{682} наблюдается на кривой, характеризующей участок № 2 (см. рис. 1), где температура окружающей среды была ниже, чем на участке № 3.

Существенное влияние температурного фактора на содержание реакционных центров первой фотосистемы в листьях тополей проявляется при понижении температуры воздуха. Это следует из анализа динамики параметра F_{734}/F_{682} (см. рис. 1) и динамики среднесуточной температуры (рис. 3).

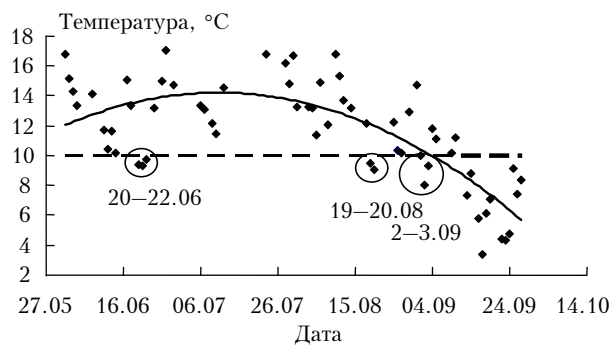


Рис. 3. Среднесуточная температура воздуха с мая по октябрь 2008 г.

Резкое падение параметра F_{734}/F_{682} , а значит, и концентрации РЦ-I, наблюдалось 21 июня, 19 августа, 3 сентября. В эти дни среднесуточная температура была ниже 10°С (на рис. 3 эти периоды выделены кружочками). Такой устойчивый температурный режим устанавливается после 14 сентября. В этот период количество РЦ-I в листьях тополей, растущих на участке № 1, монотонно уменьшается.

Подобное уменьшение концентрации реакционных центров первой фотосистемы при температуре ниже 10°С отмечалось ранее в работах других ав-

торов [3, 14]. Однако в отличие от известной закономерности в листьях деревьев, находящихся вблизи дорог с интенсивным автомобильным движением (участки № 2 и 3), при устойчивой среднесуточной температуре ниже 10 °С концентрация РЦ-I практически не изменяется (см. рис. 1).

Ранее было показано, что антропогенное воздействие на листья деревьев вызывает уменьшение величины параметра F_{734}/F_{682} по сравнению с контролем [3, 6]. Для листьев тополей, растущих вблизи дорог с интенсивным автомобильным движением, такая закономерность не сохраняется. Причина различия может заключаться в том, что на фоне многочисленных токсических веществ, выбрасываемых автомобильными двигателями, в атмосферу поступает компонент, который благоприятно влияет на фотосинтез деревьев. Таковым компонентом является диоксид углерода — основной и самый массовый продукт сгорания автомобильного топлива. Известно, что высокие концентрации CO_2 наблюдаются вблизи автомагистралей [15].

Загрязнение атмосферы диоксидом углерода, вероятно, приводит к адаптационной перестройке в фотосинтетическом аппарате в листьях тополей — к увеличению концентрации РЦ-I.

Подтверждением сделанного предположения являются результаты исследований, проведенных на фототрофах различного уровня организации. Установлено, что содержание реакционных центров первой фотосистемы в листьях растений *Nicotiana tabacum* увеличивается при увеличении концентрации диоксида углерода и снижении концентрации кислорода [16]. Более того, на культурах микроводорослей *Chlorococcum littorale* и *Chlorella sp.* показано увеличение флуоресцентного параметра F_{734}/F_{682} при аэрации суспензии воздухом с высоким содержанием CO_2 [17].

Вернемся к анализу результатов исследования, представленных на рис. 1. Количество точек параметра F_{734}/F_{682} , имеющих достоверное отличие от контроля, больше для участка № 2, чем для участка № 3. На участке № 2 движение автотранспорта почти в 2 раза интенсивнее, чем на участке № 3. Следовательно, эти участки различаются количеством выбрасываемого диоксида углерода. Вполне справедливо полагать, что повышение концентрации CO_2 вызывает увеличение отношения F_{734}/F_{682} . Однако в эту гипотезу не укладываются три точки графиков в районе дат 15.08–04.09. В них значения параметра F_{734}/F_{682} находятся в пределах ошибок измерений для всех трех участков. Этот факт объясним, если учесть, что по величине индекса загрязнения атмосферы Красноярск входит в число самых грязных городов России. В воздушной среде города очень часто регистрируются залповые выбросы токсических веществ в концентрациях, многократно превышающих ПДК. Число исследованных проб атмосферного воздуха, превышающих 5,1 ПДК из числа контролируемых на постах в Красноярске в 2008 г., составило по 1,2-диметилбензолу 35 случаев, по толуолу — 11, по этилбензолу — 8. Вблизи участков № 2 и 3 была зафиксирована мак-

симальная разовая концентрация формальдегида, равная 0,25 мг/м³ (7,3 ПДК), ксилола — 3,3 ПДК, толуола — 2,65 ПДК [18, 19]. Залповые выбросы токсических веществ в атмосферу (15.08.08–04.09.08) могли привести к синхронизации хода кривых F_{734}/F_{682} на исследуемых участках. Это предположение подтверждается данными о том, что пятичасовое воздействие озона вызывает ответную реакцию растений на физиологическом и генетическом уровнях [20].

В период синхронного хода кривых F_{734}/F_{682} (см. рис. 1) наблюдалось два случая падения среднесуточной температуры воздуха ниже 10 °С (см. рис. 3), которое происходило на фоне продолжительных дождей. Сочетание климатического и токсикологического воздействия на фотосинтетический аппарат листьев деревьев могло «затенить» эффект стимулирующего влияния диоксида углерода на величину параметра F_{734}/F_{682} .

На протяжении вегетации тополей, кроме периода 15.08.08–04.09.08, средние значения параметра F_{734}/F_{682} были выше у листьев деревьев, растущих вблизи дорог с интенсивным автомобильным движением. Большое количество достоверных различий величины F_{734}/F_{682} зафиксировано на участке № 2, где самый высокий поток машин. Проведенный анализ литературных и экспериментальных данных позволяет сделать заключение, что диоксид углерода оказывает влияние на фотосинтетический аппарат тополей, увеличивая значение параметра F_{734}/F_{682} и, следовательно, концентрацию РЦ-I, по сравнению с этим показателем деревьев, растущих в экологически чистых условиях.

1. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Гришаев М.В. Влияние коротковолновой ультрафиолетовой радиации на флуоресценцию древесных растений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 714–721.
2. Заворуева Е.Н., Заворуев В.В. Флуоресцентный мониторинг фотосинтетического аппарата мелколиственных деревьев при антропогенном воздействии // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 319–321.
3. Sonoike K. The Different Roles of Chilling Temperatures in the Photoinhibition of Photosystem I and Photosystem II // J. Photochem. Photobiol. B. Biol. 1999. V. 48, N 2–3. P. 136–141.
4. Заворуев В.В., Заворуева Е.Н. Изменение отношения пиков красной флуоресценции хлорофилла листьев *Populus balsamifera* в процессе вегетации // Докл. РАН. 2002. Т. 387, № 2. С. 258–260.
5. Заворуева Е.Н., Заворуев В.В. Флуоресцентный мониторинг фотосинтетического аппарата мелколиственных деревьев при антропогенном воздействии // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 319–321.
6. Павлова Е.А., Заворуева Е.Н., Заворуев В.В. Влияние городской среды на флуоресцентные характеристики листьев деревьев в процессе их вегетации // Матер. Всерос. конф. «Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-ем тысячелетии». Томск, 2006. С. 573–576.
7. Заворуева Е.Н. Изменение флуоресцентных характеристик листьев деревьев в процессе их вегетации в зависимости от загрязненности атмосферы // Матер. конф. «Контроль и реабилитация окружающей среды». Томск, 2006. С. 184–186.

8. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N., Shelegov A.V. Fluorescence of Cucumber Leaves Induced within the Photoexcitation Wavelength Range 380–540 nm and Its Dependence on Vegetation Time and Illumination Regime // *Биофизика*. 2000. V. 45, N 4. P. 704–711.
9. Заворуев В.В., Шелегов А.В., Заворуева Е.Н. Двухволновой флуориметр для исследования люминесценции растений. Препр. / ИБФ СО РАН (Красноярск). 1995. № 226Б. 22 с.
10. Lichtenthaler H.K., Rindler U. The Role of Chlorophyll Fluorescence in Letection Stress Condition in Plants // *CRC Crit. Rev. Anal. Chem.* 1988. V. 19, suppl. 1. S. 29–85.
11. Wintermans I.F., De Mots A. Spectrophotometric Characteristics of Chlorophyll a and b their Pheophytins in Ethanol // *Biochim. Biophys. Acta.* 1965. V. 109. P. 448–453.
12. Заворуева Е.Н., Заворуев В.В. Корреляция концентрации реакционных центров первой фотосистемы с величиной отношения дальней красной и красной флуоресценции хлорофилла фототрофов // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 7. С. 648–650.
13. Kima S.-H., Gitz D.C., Sicher R.C., Baker J.T., Timlin D.J., Reddy V.R. Temperature Dependence of Growth, Development, and Photosynthesis in Maize under Elevated CO₂ // *Environ. and Experim. Botany*. 2007. V. 61, N 3. P. 224–236.
14. Terashima I., Noguchi K., Itoh-Nemoto T., Park Y.-M., Kubo A., Tanaka K. The cause of PSI photoinhibition at low temperatures in leaves of Cucumis sativus, a chilling sensitive plant // *Physiol. Plant.* 1998. V. 103, N 3. P. 295–303.
15. Буренин Н.С. Некоторые результаты наблюдений за загрязнением воздуха на автомагистралях // *Тр. ГГО*. 1974. Вып. 314. С. 136–147.
16. Peterson R.B. Effects of O₂ and CO₂ Concentration on Quantum Yields of Photosystems I and II in Tobacco Leaf Tissue // *Plant Physiol.* 1991. V. 97, N 4. P. 1388–1394.
17. Saton A., Kurano N., Senger H., Miyachi S. Regulation of Energy Balance in Photosystems in Response to Change in CO₂ Concentrations and Light Intensities during Growth in Extremely-High-CO₂-Tolerant Green Microalgae // *Plant Cell Physiol.* 2002. V. 43, N 4. P. 440–451.
18. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2008 год». Красноярск, 2009. 226 с.
19. Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Красноярском крае за 2008 год». Красноярск, 2009. 201 с.
20. Diara C., Castagna A., Baldan B., Sodi A.M., Sahr T., Langebartels C., Sebastiani L., Ranieri A. Differences in the kinetics and scale of signalling molecule production modulate the ozone sensitivity of hybrid poplar clones: the roles of H₂O₂, ethylene and salicylic acid // *New Phytologist*. 2005. V. 168, N 2. P. 351–364.

V.V. Zavoruev, E.N. Zavorueva. **Fluorescence of poplar leaves, growing near the road.**

The dynamics of the intensity ratio of far-red F_{734} to red F_{682} fluorescence chlorophyll of poplar leaves growing near roads is studied. It is established that the parameter F_{734}/F_{682} significantly higher in plants growing near highways with heavy traffic. The effect of temperature and carbon dioxide on the studied parameter is discussed.