

УДК [582.091:581.5](470.345-25)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ г. САРАНСКА ПО ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА

А. С. Лукаткин¹, В. В. Ревин¹, Д. И. Башмаков¹, Т. Е. Кренделева²,
Т. К. Антал², А. Б. Рубин²

¹ Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева
Россия, 430005, Саранск, Большевикская, 68
E-mail: aslukatkin@yandex.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Россия, 119899, Москва, Воробьевы горы, биологический факультет

Поступила в редакцию 16.04.09 г.

Экологическая оценка состояния древесных растений г. Саранска по флуоресценции хлорофилла. – Лукаткин А. С., Ревин В. В., Башмаков Д. И., Кренделева Т. Е., Антал Т. К., Рубин А. Б. – Измеряли параметры флуоресценции хлорофилла у однолетних побегов клена (*Acer negundo* L.), березы (*Betula pendula* Roth), тополя (*Populus balsamifera* L.) и липы (*Tilia cordata* Mill.), собранных с растений, произрастающих в разных по уровню загрязнения районах г. Саранска (Республика Мордовия) и пригородных территориях. Выявлено хорошее физиологическое состояние древесных насаждений в Саранске (за исключением центральной промышленной зоны и леса Химмаша). Наиболее чувствительным к стрессовым факторам оказался фотосинтетический аппарат липы, наиболее толерантным – тополя. Показана высокая корреляция разброса значений внутри выборки со средними значениями Fv/Fm по выборке.

Ключевые слова: флуоресценция хлорофилла, деревья, *Acer negundo*, *Betula pendula*, *Populus balsamifera*, *Tilia cordata*, городские насаждения, загрязнение, Саранск, Республика Мордовия.

Chlorophyll-fluorescence ecological estimation of wood plant status in Saransk City. – Lukatkin A. S., Revin V. V., Bashmakov D. I., Krendeleva T. E., Antal T. K., and Rubin A. B. – Chlorophyll fluorescence parameters were measured in the annual shoots of maple (*Acer negundo* L.), poplar (*Populus balsamifera* L.), birch (*Betula pendula* Roth), and linden (*Tilia cordata* Mill.) plants growing in several areas of Saransk City (Mordovian Republic) and its suburban territories. A good physiological status of the arboreal plantations in Saransk was detected (except for the central industrial zone and the Khimmash forest). The photosynthetic apparatus of linden was most sensitive to stress factors, and that of poplar was most tolerant. A high correlation of the dispersion of values in the sample with the average Fv/Fm values over the sample is revealed.

Key words: chlorophyll fluorescence, maple, poplar, birch, linden, tree stand, pollution, Saransk City, Mordovian Republic.

Растения, произрастающие в городских условиях, подвергаются стрессовому воздействию комплекса антропогенных факторов: смога, кислотных дождей, избытка тяжелых металлов, антигололедных средств и др. Известно, что фотосинтетический аппарат растений чрезвычайно чувствителен к действию как природных, так и антропогенных факторов (Венедиктов и др., 1999; Нестеренко и др., 2007). Нарушения в его функционировании могут быть выявлены по характеристикам флуоресценции хлорофилла еще до того, когда появляются внешние прояв-

ления, указывающие на нарушение физиологических функций. Высокая информативность флуоресценции хлорофилла связана с тем, что изменения состояния фотосинтетического аппарата сопровождаются изменениями вероятности тушения энергии электронного возбуждения молекул хлорофилла, что проявляется в изменении квантового выхода флуоресценции хлорофилла под действием света (Rohasek, Bartak, 2000).

Флуоресценцию хлорофилла, возбуждаемую слабым светом при открытых реакционных центрах после адаптации образцов к темноте, обозначают как F_0 . Под действием насыщающей фотосинтез вспышки света регистрируется флуоресценция при закрытых центрах (F_m). Максимальная эффективность использования энергии света реакционными центрами фотосистемы 2 рассчитывается как отношение переменной флуоресценции ($F_v = F_m - F_0$) к максимальной (F_m), т.е. F_v/F_m . Этот параметр характеризует максимальную эффективность первичных процессов фотосинтеза, которая зависит от физиологического состояния растения. Многочисленные измерения показали, что эффективность фотосинтеза (как и величина F_v/F_m) в неблагоприятных условиях снижена (Нестеренко и др., 2007). Этот показатель снижается при стрессовом воздействии внешних факторов (низкая температура, освещенность, засоление, дефицит минерального питания) (Loreto, Bonghi, 1988; Zhou et al., 2004), а также токсических веществ – гербицидов (Lambrev, Goltsev, 1999; Dvorak, Remesova, 2001), тяжелых металлов (Яковлева и др., 2005; Vassilev, Manolov, 1999; Jasiewicz et al., 1999), техногенных поллютантов (Григорьев, Пахарькова, 1999; Собчак, Григорьев, 2007), загрязнений нефтью (Фатеева и др., 2001) и др.

Клетки феллодермы коры молодых побегов деревьев, содержащие достаточное количество хлоропластов, обладают оптическими свойствами, которые делают возможным измерение флуоресценции хлорофилла на ветках. Однолетние побеги, отрастающие за вегетационный сезон, уже испытали действие неблагоприятных факторов среды; из них на следующий год будут отрастать новые побеги. Кроме того, хлоропласты коры обладают фотосинтетической активностью в условиях, когда листья еще не распустились, либо уже опали. Даже во время зимнего покоя растений ветки, перенесенные в лабораторные условия, в течение нескольких дней выходят из состояния покоя, что позволяет проводить мониторинг древесных насаждений в средних широтах практически круглый год.

Измерения, проведенные на улицах Москвы, четко доказали, что параметры флуоресценции хлорофилла коры однолетних побегов чутко реагируют на неблагоприятные факторы среды (засоление, выхлопные газы) (Венедиктов и др., 1999), а малогабаритный прибор со специальной лапкой для веточек пригоден для измерений флуоресценции коры древесных растений и может быть использован для характеристики состояния растений в городских экосистемах. Специальные исследования показали, что идентичные результаты получаются и на срезанных веточках, если сохранять их несколько часов во влажной камере или 1 – 2 суток, опустив срезы в воду. Работа со срезанными побегами возможна и в зимнее время после выхода из состояния покоя спустя нескольких суток при комнатной температуре в воде: хлоропласты однолетних побегов «запоминают» условия, при кото-

рых они вошли в покой. Кроме снижения абсолютного значения величины Fv/Fm , при неблагоприятных условиях наблюдается возрастание средней дисперсии, и разброс тем больше, чем сильнее стрессорное воздействие. Эта же закономерность может быть отнесена к популяции: чем хуже состояние растений, тем выше разброс между средними показателями отдельных деревьев.

Основной задачей работы было проведение с помощью флуоресцентного метода обследования физиологического состояния деревьев в разных районах г. Саранска, различающихся по экологическому состоянию (главным образом – по степени загрязненности тяжелыми металлами).

Измерения проводили в летний период в черте города, в том числе в промышленных зонах (центральной и Северной) и жилых районах (Светотехника, Химмаш), а также в пригородной лесной зоне и в удаленном на 15 км от г. Саранска населенном пункте (Болотниково). Объектами служили однолетние побеги распространенных в городских условиях видов деревьев: *Acer negundo* Linnaeus, 1753; *Betula pendula* Roth, 1788; *Populus balsamifera* Linnaeus, 1753, и *Tilia cordata* Miller, 1759. Параметр Fv/Fm измеряли в коре под верхушечной почкой однолетних побегов с помощью переносного флуорометра РАМ-2000 ('Walz, Effelrich', Germany), дополненного специальной насадкой для фиксации побега в нужном положении. Были обследованы побеги с 7 – 30 деревьев каждого вида внутри каждой зоны. Статистическую обработку проводили с использованием стандартных пакетов Microsoft Excell и Statistica.

Результаты измерений относительной переменной флуоресценции коры однолетних побегов нижнего яруса представлены в таблице. Максимально возможная величина отношения Fv/Fm для функционирующих хлоропластов листьев теоретически равна 0.82, в природных условиях для листьев растений, находящихся в хорошем физиологическом состоянии, относительная переменная флуоресценция приближается к 0.80, для хлоропластов коры может быть чуть ниже (Венедиктов и др., 1999).

Из данных, приведенных в таблице, видно, что исследованные насаждения г. Саранска находятся в достаточно хорошем состоянии. В экологически более или менее благоприятных районах города для деревьев всех исследуемых видов растений Fv/Fm находится в пределах 0.77 – 0.78. Наименьшие значения Fv/Fm в хлоропластах коры однолетних побегов были зарегистрированы у клена, березы и липы в Никитинском овраге, относящемся к наиболее загрязненной тяжелыми металлами центральной промышленной зоне. В другой неблагоприятной по концентрации тяжелых металлов промышленной зоне – Северной, наблюдали угнетение фотосинтетической активности у липы. Это хорошо согласуется с проведенными ранее измерениями в Москве, которые показали, что липа наиболее чувствительна к техногенным загрязнениям (Венедиктов и др., 1999). У других видов деревьев в Северной промзоне величина Fv/Fm хлоропластов коры снижалась незначительно. Достоверное уменьшение фотосинтетической активности хлоропластов коры было обнаружено у клена, березы и липы в пригородной зоне (лес Химмаш), достаточно благополучной по содержанию тяжелых металлов. Данный результат может свидетельствовать о существовании какого-либо другого фактора, ухудшающего физиологическое состояние древесных насаждений. Это может быть, напри-

мер, повышенное содержание загрязнителей в атмосфере (SO₂, NO, NO₂), температурный или водный стресс, дефицит минерального питания (Григорьев, Пахарьков, 1999; Нестеренко и др., 2007). Однако это предположение нуждается в дополнительных исследованиях. Таким образом, в большинстве исследованных зон не регистрировали заметного снижения фотосинтетической активности растений, что свидетельствует об их удовлетворительном физиологическом состоянии.

Распределение параметра флуоресценции Fv/Fm у насаждений клена, березы, тополя и липы в 9 разных по загрязненности районах г. Саранска

Вид	Месторасположение	Кол-во измерений	(Fv/Fm) среднее	$SD, \%$
<i>Acer negundo</i> (Клен)	Никитинский овраг. Промзона	13	0.69	8.1
	Северная промзона	14	0.76	3.4
	Лес. Химмаш	10	0.71	8.9
	Лес. Светотехника	14	0.77	1.0
	Частный сектор. Юго-запад	17	0.76	1.4
	Частный сектор. Химмаш	20	0.73	4.7
	Пойма р. Инсар	13	0.74	4.3
<i>Betula pendula</i> (Береза)	п. Болотниково (контроль)	17	0.76	2.7
	Никитинский овраг. Промзона	23	0.72	7.7
	Северная промзона	12	0.77	1.9
	Лес. Химмаш	22	0.71	5.3
	Лес. Юго-запад	15	0.76	2.6
	Лес. Светотехника	12	0.78	3.6
	Частный сектор. Юго-запад	22	0.77	2.9
<i>Populus balsamifera</i> (Тополь)	Частный сектор. Химмаш	30	0.76	2.5
	Пойма р. Инсар	12	0.78	4.7
	п. Болотниково (контроль)	13	0.76	3.6
	Северная промзона	7	0.80	2.0
	Лес. Юго-запад	17	0.78	1.8
	Лес. Светотехника	15	0.79	1.7
	Частный сектор. Химмаш	12	0.78	2.3
<i>Tilia cordata</i> (Липа)	Пойма р. Инсар	9	0.77	3.3
	п. Болотниково (контроль)	17	0.73	5.2
	Никитинский овраг. Промзона	11	0.71	4.2
	Северная промзона	13	0.72	8.4
	Лес. Химмаш	13	0.73	2.0
	Лес. Юго-запад	13	0.75	1.5
	Лес. Светотехника	14	0.78	1.9
<i>Tilia cordata</i> (Липа)	Частный сектор. Юго-запад	17	0.76	2.6
	Частный сектор. Химмаш	14	0.75	4.4
	Пойма р. Инсар	16	0.78	3.1
	п. Болотниково (контроль)	11	0.78	1.5

Необходимо отметить несколько разную чувствительность деревьев к неблагоприятным воздействиям в зависимости от видовой принадлежности. Так, липа показала наибольшую чувствительность фотосинтетического аппарата к стрессовым факторам, в то время как тополь оказался наиболее резистентным к антропогенным воздействиям.

Кроме того, примечательно, что величина разброса значений флуоресценции внутри выборки (SD) коррелировала со средними значениями Fv/Fm по выборке (рисунок). Это свидетельствует о том, что в неблагоприятных условиях возрастает

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

гетерогенность среди побегов по фотосинтетической активности, то есть в этих условиях совместно существуют как вполне здоровые побеги, так и побеги в ослабленном физиологическом состоянии.

Исследование физиологического состояния деревьев (клена, липы, тополя и березы) в разных районах г. Саранска, различающихся по экологическому состоянию, было проведено с помощью флуоресцентного метода. Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Относительная переменная флуоресценция Fv/Fm хлоропластов коры однолетних побегов деревьев, растущих в относительно благоприятных с экологической точки зрения (по содержанию тяжелых металлов) районах г. Саранска, была в пределах 0.77 – 0.78, что свидетельствует о хорошем состоянии древесных насаждений.

2. Наименьшие значения Fv/Fm в хлоропластах коры однолетних побегов зарегистрированы у клена, березы и липы в Никитинском овраге, относящемся к наиболее загрязненной тяжелыми металлами центральной промышленной зоне, и у липы в Северной промышленной зоне.

3. Достоверное уменьшение фотосинтетической активности хлоропластов коры обнаружено у клена, березы и липы в лесной зоне Химмаша, достаточно благополучной по содержанию тяжелых металлов. По-видимому, здесь действует какой-то другой фактор, ухудшающий физиологическое состояние древесных насаждений.

4. Наиболее чувствительным (по активности фотосинтетического аппарата) к стрессовым факторам видом оказалась липа, в то время как тополь оказался наиболее резистентным к антропогенным воздействиям.

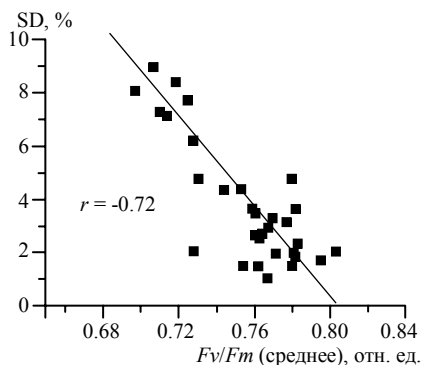
5. Величина разброса значений флуоресценции внутри выборки коррелировала со средними значениями Fv/Fm по выборке, что указывает на возрастание гетерогенности среди побегов по фотосинтетической активности в неблагоприятных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки по программе АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/624).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Венедиктов П. С., Волгин С. Л., Казимирко Ю. В., Кренделева Т. Е., Кукарских Г. П., Макарова В. В., Лаврухина О. Г., Погосян С. И., Яковлева О. В., Рубин А. Б. Использование флуоресценции хлорофилла для контроля физиологического состояния зеленых насаждений в городских экосистемах // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 6. С. 1037 – 1047.

Григорьев Ю. С., Пахарькова Н. В. Тепловой стресс и замедленная флуоресценция хлорофилла в оценке воздействия техногенного загрязнения атмосферы на деревья сосны //



Зависимость среднеквадратического отклонения (SD) от среднего по выборке отношения Fv/Fm , а также результат линейной регрессии зависимости и коэффициент корреляции (r)

Физиология растений – наука III тысячелетия : тез. докл. IV съезда о-ва физиологов растений России / И-т физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. М., 1999. Т. 1. С. 346.

Нестеренко Т. В., Тихомиров А. А., Шихов В. Н. Индукция флуоресценции хлорофилла и оценка устойчивости растений к неблагоприятным воздействиям // Журн. общ. биологии. 2007. Т. 68, № 6. С. 444 – 458.

Собчак Р. О., Григорьев Ю. С. Биоиндикационное значение флуоресценции хлорофилла некоторых древесно-кустарниковых растений в зимний период // Сиб. экол. журн. 2007. Т. 14, № 1. С. 53 – 59.

Фатеева Н. Л., Матвиенко Г. Г., Гришин А. И., Зотикова А. П., Бендер О. Г. Изменение спектров лазерно-индуцированной флуоресценции хлорофилла под воздействием факторов окружающей среды // Математические и физические методы в экологии и мониторинге природной среды : тр. Междунар. конф. / Моск. гос. ун-т леса. М., 2001. С. 114 – 118.

Яковлева О. В., Талипова Е. В., Кукарских Г. П., Кренделева Т. Е., Рубин А. Б. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях травянистых растений, растущих в разных экологических условиях // Биофизика. 2005. Т. 50, № 6. С. 1112 – 1119.

Dvořák J., Remešová I. Determination of phytotoxic effects of pre-emergence herbicides using a technique of very rapid fluorescence induction // Rostl. Vyroba. 2001. R. 47, № 2. S. 91 – 95.

Jasiewicz C., Rapacz M., Antonkiewicz J. Wpływ metali ciężkich na uszkodzenia błon komórkowych i aparatu fotosyntetycznego oraz plon topinamburu (*Helianthus tuberosus* L.) // Ekofizjologiczne aspekty reakcji roślin na działanie czynników stresowych. Warszawa, 1999. Cz. 2. S. 403 – 410.

Lambrev P., Goltsev V. Temperature affects herbicide-sensitivity of pea plants // Bulg. J. Plant Physiol. 1999. Vol. 25, № 3/4. P. 54 – 66.

Loreto F., Bonghi G. Analysis of stress status through natural fluorescent probes in intact leaves // Agr. mediterr, 1988. Vol. 118, № 4. P. 344 – 353.

Rohacek K., Bartak M. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications // Photosynthetica. 2000. Vol. 37, № 3. P. 339 – 363.

Vassilev A., Manolov P. Chlorophyll fluorescence of barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings grown in excess of Cd // Bulg. J. Plant Physiol. 1999. Vol. 25, № 3/4. P. 67 – 76.

Zhou Y.-H., Huang L.-F., Yu J.-Q. Effects of sustained chilling and low light on gas exchange, chlorophyll fluorescence quenching and absorbed light allocation in cucumber leaves // J. Plant Physiol. Molec. Biol. 2004. Vol. 30, № 2. P. 153 – 160.