

## МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВИДОВ ХВОЙНЫХ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ

Представлены материалы по выявлению механизмов адаптации растений к условиям урбанизированной среды. Показано, что структурно-функциональные параметры (размер хвои, толщина покровных тканей, объем проводящих тканей, интенсивность темнового дыхания, фотохимическая активность хлоропластов и флуоресценция хлорофилла) являются объективными показателями ослабления деревьев техногенными эмиссиями.

**Ключевые слова:** *Pinus sylvestris*; *Picea obovata*; урбанизированная среда; флуоресценция; темновое дыхание; анатомия хвои; техногенные эмиссии.

Хвойные деревья являются единственными вечнозелеными древесными растениями в сибирских городах. Это повышает их эстетическую роль в зимний период. Однако вечнозеленые растения более уязвимы к воздействию аэротехногенных примесей по сравнению с листопадными видами из-за многолетнего накопления токсикантов на листовом аппарате.

Цель работы заключалась в изучении морфофункциональных особенностей хвойных деревьев в условиях городской среды. Нами были исследованы морфологические, физиологические и анатомические изменения в организмах древесных растений с использованием традиционных и современных оперативных методов.

### Объекты и методы исследований

Наши исследования экологии городских хвойных деревьев проводились в трёх взаимосвязанных направлениях. Это морфометрическая оценка состояния хвойных деревьев в черте города; оценка состояния фотосинтетического аппарата растений на разных уровнях структурной организации (кроны, побега, листа) и исследование особенностей некоторых физиологических процессов.

В качестве объектов были выбраны 25-летние посадки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ldb.) в г. Томске. Томск не входит в перечень городов РФ с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, суммарные выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ всеми источниками в 1996 г. составили 70,81 тыс. т/год, в том числе от автотранспорта – 46,77 тыс. т/год [1]. Однако даже такой уровень загрязнения сказывается на росте и состоянии городских насаждений.

Пробные площади были расположены в двух слабо загрязненных районах (Лагерный сад и Академгородок), в средне загрязненной зоне находится Московский тракт. Высокий уровень загрязнения был представлен микрорайонами Каштак, Михайловская роща и ГРЭС-2 [2]. Контрольная точка располагалась в 20 км к юго-западу от города.

Для исследования структурно-функциональных и морфологических изменений хвои 2-го года вегетации с 10 отдельно стоящих деревьев из средней части кроны с южной стороны срезались по 2–3 беспольные модельные ветви. Структурные параметры измерялись на поперечном срезе хвои под микроскопом «МБИ-3» при помощи окуляр-микрометра «МОВ-1–15<sup>x</sup>». Концентрация пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды) в хвое растений определялась спектрофотометри-

ческим методом трехкратной повторности [3] на спектрофотометре СФ-26. Определение фотохимической активности изолированных хлоропластов проводили по реакции фотовосстановления феррицианида калия ( $K_3Fe(CN)_6$ ) [4]. Исследование газообмена растений выполнялось на базе Института оптики атмосферы СО РАН высокочувствительным методом лазерной оптико-акустической спектроскопии [5].

Регистрацию флуоресцентных параметров хвои сосны обыкновенной и ели сибирской проводили на флуориметрах «Фотон-5» и «Фотон-7-1», разработанных на кафедре экологии КрасГУ. Оценку глубины зимнего покоя и динамики выхода из этого состояния проводили посредством регистрации термоиндуцированных изменений нулевого уровня флуоресценции (ТИНУФ) хлорофилла хвои исследуемых растений в диапазоне от 20 до 75°C при средней скорости нагрева 5 град/мин [6]. В качестве показателей замедленной флуоресценции взяты значения амплитуд быстрой (миллисекундной) и медленной (секундной) компонент затухания послесвечения, а также их отношение – относительный параметр (ОП) ЗФ. Регистрация быстрой и медленной компонент ЗФ производилась, соответственно, на высоком (ЗФв) и низком (ЗФн) возбуждающем свете. ОП ЗФ, благодаря относительности измеряемой величины, практически не зависит от массы и размера исследуемого образца [7].

Все результаты проведенных исследований были статистически обработаны ( $\alpha = 0,05$ ) по типовым методикам [8, 9].

### Результаты и обсуждение

Анализ морфометрических показателей роста сосны обыкновенной показал, что с увеличением техногенной нагрузки наблюдаются уменьшение линейного прироста ствола, снижение класса бонитета и апикальной доминантности, а также увеличение интенсивности плодоношения (табл. 1) [10].

По морфолого-анатомическим изменениям побегов и хвои установлено, что в городских условиях у сосны значительно снижается густота охвоения побегов и появляется склонность к ксероморфизму в строении листового аппарата [11]. Это выражается в том, что под действием техногенных эмиссий у растений утолщается кутикула, клетки мезофилла становятся более вытянутыми и уменьшается размер хвоинок.

Наряду с уменьшением густоты охвоения 3–5-летних побегов у городских деревьев наблюдается увеличение количества хвои 1–2-го года (рис. 1, 2). Таким образом, растения компенсируют потерю более старой хвои.

Средние значения морфометрических параметров сосновых деревьев

Уровень загрязнения	Диаметр ствола, см	Высота ствола, м	Длина кроны, м	ДК /ШК	Плодоношение	Бонитет
Контроль	15,1 ± 0,8	14,0 ± 0,2	7,1 ± 0,3	2,2	0,9 ± 0,2	Iб
Слабый	13,5 ± 0,7	8,7 ± 0,3	6,6 ± 0,3	1,8	1,8 ± 0,4	I
Слабый	12,7 ± 0,4	8,7 ± 0,2	6,2 ± 0,2	1,6	2,7 ± 0,3	II
Средний	18,3 ± 0,8	9,9 ± 0,2	6,7 ± 0,3	1,6	3,6 ± 0,4	II
Сильный	12,8 ± 0,4	7,4 ± 0,2	5,4 ± 0,2	1,5	2,6 ± 0,4	III
Сильный	17,6 ± 0,9	8,0 ± 0,3	6,3 ± 0,3	1,3	4,8 ± 0,3	III

Примечание. ШК – ширина кроны, ДК – длина кроны.

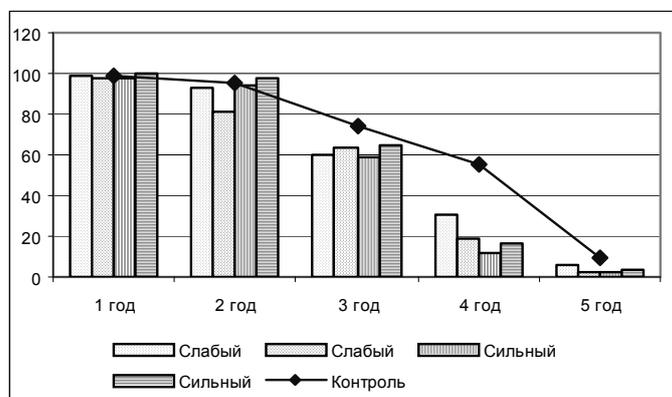


Рис. 1. Густота охвоения побегов сосны в зависимости от уровня загрязнения района произрастания, %

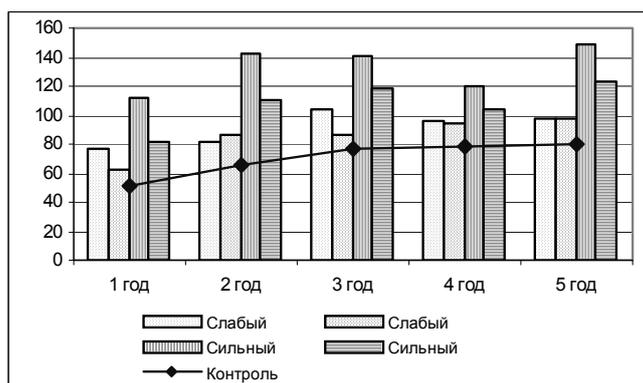


Рис. 2. Количество ежегодно образующейся хвои на побегах сосны в зависимости от уровня загрязнения района произрастания, шт.

Морфологические и структурные изменения листового аппарата растений в большинстве случаев являются следствием функциональных нарушений. Обнаружено, что у городских деревьев содержание пигментов незначительно отличается от контрольного насаждения, что свидетельствует о сформированности фотосинтетического аппарата и его устойчивой работе. Однако фотохимическая активность хлоропластов заметно ниже в условиях города, при этом наиболее высокая активность зафиксирована в Академгородке (93% от фоновых показателей), из чего можно сделать заключение о преимущественной чистоте этого района. В других же районах города фотохимическая активность была примерно одинаковой и составила 71–74% от контрольных значений.

Помимо рассмотренных традиционных методов функциональной диагностики мы апробировали три современных методики: метод лазерной оптико-

акустической спектроскопии и два флуоресцентных метода.

В результате изучения кинетики  $\text{CO}_2$  газообмена было обнаружено, что деревья, произрастающие в городской среде, отличаются более высокой интенсивностью дыхательных процессов (количество выделенного  $\text{CO}_2$  в первые сутки превосходит в 1,3 раза, а к третьим суткам – больше чем в 2 раза фоновые значения) (рис. 3).

Регистрация различных параметров быстрой и замедленной флуоресценции широко используется для изучения процессов фотосинтеза и влияния факторов внешней среды на растения. На рис. 4 представлена динамика выхода из состояния покоя ели сибирской из четырех контрастных по уровню загрязнения точек города. Для сравнения приводятся данные по сосне в слабо загрязненном и сильно загрязненном районах.

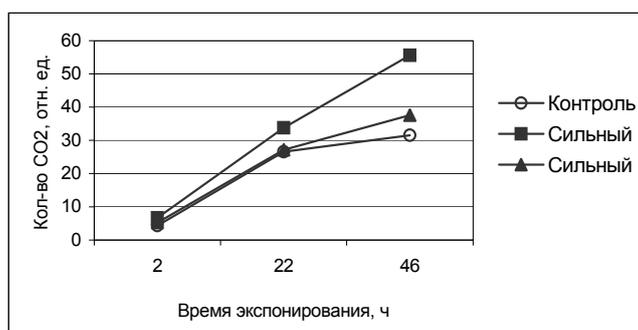


Рис. 3. Темновое дыхание хвои сосны в зависимости от уровня загрязнения района произрастания

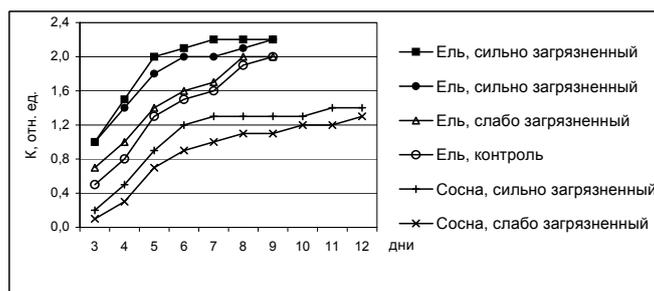


Рис. 4. Изменение отношения низко- и высокотемпературного максимумов нулевого уровня флуоресценции (K) хвои сосны и ели из различных районов г. Томска по мере выхода из состояния зимнего покоя в лабораторных условиях (март)

Оценку выхода хвои из покоя проводили по коэффициенту K, который рассчитывался как отношение амплитуд низкотемпературного (50–55°C) и высокотемпературного (около 70°C) максимумов на полученных термограммах [12]. Чем больше этот показатель, тем выше активность фотосинтетического аппарата растения и меньше глубина его покоя. Анализ полученных результатов показал, что чем выше загазованность воздуха в районе произрастания, тем быстрее растения выходят из состояния покоя [13].

Одновременно с исследованиями по ТИНУФ хвои проводился анализ показателей замедленной флуоресценции растений в наиболее контрастных по уровню загрязнения точках города. Из табл. 2 следует, что интенсивность флуоресценции как по значению амплитуды замедленной флуоресценции на высоком возбуждающем свете, так и по её относительному показателю выше у растений из более загрязненных районов, что подтверждает более быстрый выход данных растений из покоя.

Таблица 2

Значения показателей замедленной флуоресценции хвои сосны и ели, произрастающих в контрастных по уровню атмосферного загрязнения районах г. Томска (март)

Порода	Район города	ЗФв	ОП ЗФ
Ель	Контроль	691 ± 34	3,31 ± 0,09
	Сильно загрязненный	1166 ± 61	5,08 ± 0,13
Сосна	Слабо загрязненный	1634 ± 57	5,13 ± 0,13
	Сильно загрязненный	2753 ± 73	6,11 ± 0,12

Примечание. ЗФв – интенсивность замедленной флуоресценции на высоком возбуждающем свете; ОП ЗФ – относительный показатель замедленной флуоресценции.

В городской среде у хвойных растений происходят изменения на всех структурных уровнях, нарушаются основные физиологические процессы. Пока эти отклонения ввиду сравнительно невысокого уровня атмосферного загрязнения в Томске и молодого возраста исследуемых растений носят незначительный характер. Сосну обыкновенную можно эффективно использовать в качестве биоиндикатора

экологического состояния урбанизированных экосистем. А структурно-функциональные параметры, такие как размер хвои, толщина покровных тканей, объем проводящих тканей, интенсивность темнового дыхания, фотохимическая активность хлоропластов и флуоресценция хлорофилла, являются объективными показателями ослабления деревьев техногенными эмиссиями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экологический мониторинг. Состояние окружающей природной среды Томской области в 1996 году // Государственный комитет по охране окружающей среды Томской области. Томск, 1997. 202 с.
2. Сводный том предельно допустимых выбросов (ПДВ) вредных веществ в атмосферу г. Томска. Пояснительная записка / В.М. Торопов, А.П. Быков и др. Новосибирск, 1997. Кн. 1. 433 с.

3. *Специальный практикум по биохимии и физиологии растений* / Под ред. М.М. Окунцова. Томск: Изд-во ТГУ, 1974. 144 с.
4. *Гавриленко В.Ф., Ладыгина М.Е., Хандобина Л.М.* Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание. М.: Высш. шк., 1975. 392 с.
5. *Агеев Б.Г., Антипов А.Б., Астафурова Т.П., Воробьева Н.А. и др.* Кинетика выделения CO<sub>2</sub> травянистыми и хвойными растениями при воздействии озона // *Оптика атмосферы и океана*. 1998. Т. 11, № 4. С. 355–358.
6. *Пахарькова Н.В.* Замедленная флуоресценция хлорофилла хвойных в условиях техногенного загрязнения атмосферы: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 1999. 22 с.
7. *Григорьев Ю.С., Фуряев Е.А., Андреев А.А.* Способ определения содержания фитотоксических веществ // Патент № 2069851. Бюл. изобр. № 33 от 27.11.96.
8. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 245 с.
9. *Зайцев Г.Н.* Математический анализ биологических данных. М.: Наука, 1991. 184 с.
10. *Хан (Куровская) Л.В., Ильченко Н.В.* Особенности роста сосны обыкновенной и сосны кедровой сибирской в парках г. Томска // *Экология и рациональное природопользование на рубеже веков. Итоги и перспективы: Материалы Междунар. конф.* Томск, 2000. С. 106–108.
11. *Хан (Куровская) Л.В.* Морфологические изменения хвои сосны обыкновенной в условиях городской среды // *Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. информ. материалов междунар. науч.-техн. конф. «Лес-2000»*. Брянск: РИО БГИТА, 2000. Вып. 1. С. 91–92.
12. *Гаевский Н.А., Сорокина Г.А., Гольд В.М., Миролюбовская И.В.* Сезонные изменения фотосинтетического аппарата древесных и кустарниковых пород // *Физиология растений*. 1991. Т. 38, № 4. С. 685–688.
13. *Хан (Куровская) Л.В.* Влияние аэротехногенного загрязнения на физиологическое состояние сосны обыкновенной // *Науки о человеке: Сб. ст. молодых ученых и специалистов по материалам международного конгресса «Научная молодежь на пороге XXI века»*. Томск, 18–19 мая 2000 г. Томск: СГМУ, 2000. С. 179–181.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 1 июня 2009 г.