

УДК 577.355:504.06

АДАПТАЦИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ХВОИ *PICEA OBOVATA* LEDEB. В УСЛОВИЯХ ПРЕОБЛАДАЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ВЫБРОСОВ ПРОМЗОНЫ Г. КЕМЕРОВО

© 2016 О.М. Легощина¹, О.А. Неверова¹, А.А. Быков²¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Институт экологии человека СО РАН, г. Кемерово² Институт вычислительных технологий (Кемеровский филиал) СО РАН

Статья поступила в редакцию 19.05.2016

Изучены адаптивные перестройки ассимиляционного аппарата хвои ели сибирской в условиях преобладающего влияния промышленных выбросов. Установлено, что выбросы предприятий промзоны вызывают снижение уровня зеленых пигментов. Выявлены адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата связанные с возрастанием относительной доли хлорофилла *a/b*, и как следствие повышение фотосинтетической способности хвои у *Picea obovata* Ledeb. Содержание зеленых пигментов можно использовать в качестве дополнительного метода в оценки степени суммарного загрязнения среды.

Ключевые слова: комплексный показатель загрязнения атмосферы, промзона, пигмент, хвоя, фотосинтетическая способность, адаптация, перестройка

Город Кемерово является крупным промышленным центром, где мощным источником загрязнения атмосферного воздуха является промзона, включающая Кемеровскую ГРЭС, КАО «Химпром», ОАО «Кокс». Промзона расположена на границе Центрального и Заводского районов города в непосредственной близости к жилым кварталам. Приоритетными выбросами этих промышленных объектов являются оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, полиароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен и взвешенные вещества. Одним из способов оптимизации экологических условий крупных промышленных центров (в том числе г. Кемерово) является создание рациональной системы озеленения, обладающей высоким уровнем экологической адаптации и пластичности и, как следствие, высокими показателями декоративности и средоулучшающих свойств. Постоянное присутствие в атмосфере промышленных регионов фитотоксичных примесей приводит к необходимости формирования у растений такой структуры листа, которая позволяет сохранить относительное равновесие фотосинтетического аппарата. В процессе адаптации участвуют многие параметры, однако ведущим звеном следует считать изменение фотоактивной поверхности, регулируемой либо числом хлоропластов, либо их размерами, а, следовательно, и концентрацией пигментов в фотосинтетических мембранах [11, 13]. Благодаря выработанным адаптивным перестройкам растения способны полностью реализовать свои жизненные функции в неблагоприятных условиях среды. Данные растения можно использовать для озеленения территорий подвергающихся воздействию загрязняющих веществ. Такие растения очень ценны для выяснения механизмов их адаптации.

Цель исследований: изучить адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата хвои ели сибирской произрастающей в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово.

Объекты и методы исследований. Для исследований выбраны 6 площадок наблюдения (ПН), расположенные по факельному следу распространения выбросов от промзоны (по преобладающему юго-западному направлению ветров) (рис. 1).

Исследования проводили в летний период 2013 г. Для оценки среднего за длительный период загрязнения атмосферы г. Кемерово использован специальный модуль программного комплекса ЭРА, который согласован ГТО им. А.И. Воейкова (С-Петербург, Россия) на соответствие краткосрочной модели [12] и долгосрочной модели [8]. Комплекс ЭРА может быть применен для нормативных расчетов загрязнения атмосферы (подробнее см. www.logos-plus.ru) и позволяет использовать стандартные нормативные базы данных, накопленные в форматах программного комплекса ЭРА, отработанный интерфейс и все текстовые и графические возможности по представлению результатов (включая построение на цифровых и растровых картах). Для линейных и площадных источников используется процедура интегрирования с шагом, зависящим от удаления точки от источника, а шаг выбирается из условия не превышения вычислительной погрешности уровня 3%.

Основное соотношение для вычисления средней за длительный период концентрации *C* в точки с полярными координатами (*r, φ*) относительно источника имеет следующий общий вид:

$$C(r, \varphi) = \frac{p_1(\varphi)M}{r} \int_0^\infty du \int_0^\infty d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) q(r, u, \varphi, \lambda, H_e) \quad (1)$$

где *M* (г/сек) средний за период осреднения выброс источника, а расшифровка обозначений и формулы для подынтегральной функции *q* и эффективной высоты источника *H_e* представлены в [8]. В состав выражения (1) входят три функции, представляющие плотности распределения: направление ветра *p₁(φ)*; скорость

Легощина Ольга Михайловна, старший инженер биолог. E-mail: legoshchina@mail.ru

Неверова Ольга Александровна, доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией экологического биомониторинга. E-mail: nev11@yandex.ru

Быков Анатолий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: bykov@icc.kemsc.ru

ветра $p_2(u)$; безразмерный параметр λ интенсивности турбулентного перемешивания $p_3(\lambda)$. Для нормативных расчетов эти распределения, определяющие режим долговременного загрязнения атмосферы в окрестности источника, запрашиваются вместе с остальными необходимыми параметрами в ГТО им. А.И. Воейкова. Функция $p_1(\varphi)$ получается из стандартной 8-и румбовой розы ветров путем интерполяции, вид которой определен в [8].

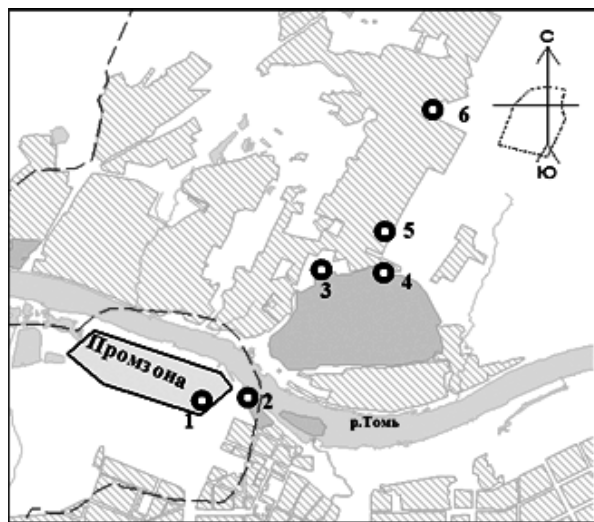


Рис. 1. Схема расположения площадок наблюдения в плане г. Кемерово:

ПН: 1 – сквер у проходной ГРЭС (ул. Станционная, 17); 2 – парк им. Горького (вблизи спорткомплекса); 3 – территория станции Юннатов (пр. Шахтеров 10); 4 – территория санатория «Журавлик» (ул. Терешковой 7); 5 – сквер им. Шахтеров (между пр. Шахтеров и ул. Институтской); 6 – двор сельской больницы (ул. Авроры, 12). Расстояние от ПН 1 по прямой составляет: до 2 ПН – 1 км, до 3 – 3 км, до 4 – 4 км, до 5 – 4,5 км, до 6 – 6,5 км.

При расчете учтены данные инвентаризации из материалов сводного тома ПДВ г. Кемерово [1] приоритетных выбросов предприятий промзоны – оксидов азота, диоксида серы, оксида углерода, бенз(а)пирена и взвешенных веществ (зола, сажа и др.). В процессе моделирования рассчитывался условный безразмерный комплексный показатель (КП) суммарного среднегодового загрязнения атмосферы

$$КП = C_1 / ПДК C_1 + C_2 / ПДК C_2 + \dots + C_n / ПДК C_n,$$

где C – среднегодовая приземная концентрация, ПДКс – среднесуточная ПДК, а индексы 1, 2, 3, ..., n относятся к вышеперечисленным загрязняющим веществам. Данный показатель не является нормативным гигиеническим критерием, поскольку далеко не все учтенные вещества обладают эффектом однонаправленного воздействия на человека. Он носит смысл «суммарной техногенной нагрузки», создаваемой промышленностью посредством атмосферного переноса загрязнения на ту или иную территорию города.

Объектом исследований являлась ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) средневозрастного генеративного состояния, произрастающая в зоне действия выбросов предприятий промзоны. Анализировали хвою второго года жизни собранную с нижней трети кроны, повторность трехкратная. Определение количества фотосинтетических пигментов в хвое проводили спектрофотометрическим методом в 80%-й ацетоновой вытяжке

при соответствующих длинах волн $\lambda=663, 645$ и $440,5$ нм на спектрофотометре Leki SS 1207 [6]. Оценку фотосинтетической деятельности древесных растений проводили бескамерным методом, который позволяет рассчитать интенсивность фотосинтеза (ИФ) по количеству углеводов, образующихся в хвое на каждый грамм их исходного содержания ($мг \cdot г^{-1} \cdot ч^{-1}$) (расчет на сырую массу листа). Мерой содержания восстановленных веществ являлась оптическая плотность раствора в области спектра 590-610 нм. Опытный образец экспонировали в течение 4-х часов при $t=25 \pm 2$ и освещенности 25-30 тыс. люкс. Фиксацию и сжигание растительных образцов проводили раствором бихромата калия в серной кислоте. [4]. Для анализа данных использовался пакет прикладных программ Statistica 6.0. Для оценки степени зависимости и характера направленности связи между комплексным показателем загрязнения атмосферы и изучаемыми признаками, рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона. В качестве критерия достоверности принимали $p < 0.05$.

Результаты и их обсуждение. Анализ значений комплексного показателя загрязнения атмосферы (КПЗА) на пробных площадках показал, что значения КПЗА распределяются в порядке убывания при удалении от промзоны. Существенная разница между значениями КПЗА отмечается между 1 – 4 ПН. Так от 1 к 4 ПН значения КПЗА распределяются следующим образом: $17,97 > 10,43 > 8,13 > 6,87$. По мере удаления от промзоны, начиная с 4 по 6 ПН существенных различий в значениях КПЗА не наблюдается, данный показатель варьирует в пределах 6,87-6,21.

Проведенные исследования пигментного комплекса (ПК) в хвое ели сибирской показали, что максимальные значения хлорофилла *a* отмечались в июле на всех ПН, а хлорофилла *b* – в июне, июле и августе на разных ПН. В течение периода наблюдений происходило возрастание доли хлорофилла *a* в ПК, при этом доля хлорофилла *b* падала. По мере приближения к промзоне, в большинстве случаев, наблюдается снижение уровня зеленых пигментов (рис. 2). При этом минимальные значения содержания хлорофилла *a* и хлорофилла *b* отмечались на 1 ПН (сквер у проходной ГРЭС), где в среднем за вегетацию значения снижались на 19-27% и 21-57% в сравнении с 6 ПН (максимально удаленная от промзоны).

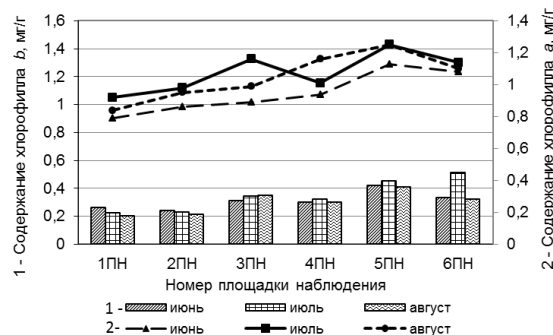


Рис. 2. Изменчивость содержания хлорофилла *b* (1) и хлорофилла *a* (2) хвои ели сибирской на ПН

Анализ содержания пигментов по месяцам показывает, что на ПН №1-№5 в сравнении с 6 ПН содержание хлорофилла *a* снижалось в июне на 13-27%, в июле на 11-19%, в августе на 10-24%, а содержание хлорофилла *b* – в июне на 6-27%, в июле на 33-57%, в августе на 6-38%. Как показывают экспериментальные

данные, выбросы промзоны в большей степени способствовали снижению содержания хлорофилла *b*, чем хлорофилла *a*. Важной характеристикой фотосинтетического аппарата (ФА) является отношение хлорофилла *a/b*. Полученные экспериментальные данные показывают, что, несмотря на выявленное снижение количества хлорофилла *a* и *b* в хвое ели по мере приближения к источнику выбросов, наблюдается тенденция к повышению соотношения хлорофилла *a/b* (рис. 3). Так в течение периода наблюдений на ПН1 и ПН2 значения соотношения хлорофилла *a/b* были выше в среднем на 9 и 90% в сравнении с ПН6.

Как известно, важной особенностью строения хлоропластов является наличие двух типов тилакоидов – а тилакоиды стромы и гран, которые различаются размерами, плотностью и взаиморасположением. Х. Лихтенгаллер с сотрудниками, изучая реакцию хлоропластов на действие света разной интенсивности, показал, что интенсивное освещение приводит к формированию хлоропластов с преобладанием тилакоидов стромы, а теневые условия – гран [14, 15]. В целом ламеллы стромы обладают большей эффективностью световосприятия и лучше защищены от повреждений, чем граны.

Поскольку фотоповреждения представляют собой универсальный тип повреждения хлоропластов и опосредуют действие других неблагоприятных факторов [9], фотозащитные перестройки ультраструктуры пластид также могут рассматриваться в качестве универсальных на органоидном уровне [7]. В этом смысле формирование хлоропластов «светового» типа с преобладанием ламелл стромы имеет более глубокое значение, чем просто адаптация к интенсивному свету. В наших исследованиях, по-видимому, по мере возрастания уровня техногенной нагрузки происходит перестройка ультраструктуры хлоропластов в сторону «световых» хлоропластов с преобладанием тилакоидов стромы, которые обладают большей эффективностью световосприятия. По заключению В.С. Николаевского (1979) высокая величина отношения хлорофилла *a/b* может служить признаком адаптации фотосинтетического аппарата к воздействию неблагоприятных факторов (высокая запыленность, выбросы промышленных предприятий) [10]. Полученные данные по содержанию зеленых пигментов и относительному содержанию хлорофилла *a/b* согласуются с данными по интенсивности фотосинтеза.

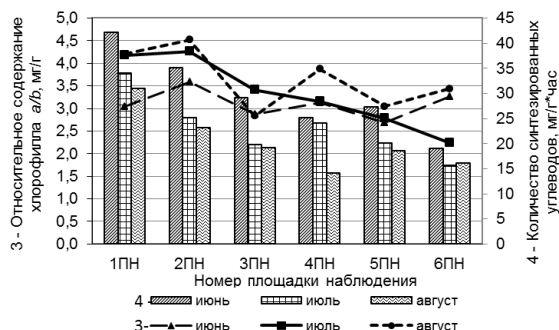


Рис. 3. Соотношения хлорофилла *a/b* (3) и интенсивность фотосинтеза (4) хвои ели сибирской на ПН

Результаты по изучению динамики интенсивности фотосинтеза хвои ели сибирской показали, что максимальные их значения отмечались в июне (рис. 3).

По мере приближения к промзоне (ПН5-ПН1) интенсивность фотосинтеза возрастала в июне на 32-121%, в июле на 27-117%, в августе на 16-98% в сравнении с ПН6. При этом максимальные значения выявлены на ПН1 и ПН2, где значения были выше в среднем на 44-121% в сравнении с ПН6.

Таким образом, при техногенном воздействии возрастают энергетические затраты растительной клетки на поддержание стабильного уровня обмена веществ. В таких условиях перераспределение энергетических ресурсов является определяющей адаптивной перестройкой биологической системы направленной на повышение эффективности энергопреобразующей деятельности ФА.

На основании проведенного корреляционного анализа были установлены достоверные отрицательные коэффициенты корреляции между значениями КПЗА и содержанием хлорофилла *a* в июне – августе ($r=-0,79$, $r=-0,74$ и $r=-0,85$ при $p<0,05$, $n=18$), а также между КПЗА и хлорофиллом *b* в июне – августе ($r=-0,61$; $r=-0,75$; $r=-0,77$, при $p<0,05$, $n=18$). Наблюдались положительные корреляции между комплексным показателем загрязнения атмосферы и относительным содержанием хлорофилла *a/b* в июле и августе ($r=0,77$ и $r=0,58$ при $p<0,05$, $n=18$), и интенсивностью фотосинтеза хвои ели в июне – августе ($r=0,91$, $r=0,91$ и $r=0,95$; при $p<0,05$, $n=18$).

Выводы:

1. Установлено, что в градиенте концентраций промышленных выбросов от промзоны г. Кемерово у *Picea obovata* Ledeb., отмечаются изменения характеристик фотосинтетического аппарата: наблюдается снижение уровня зеленых пигментов – хлорофилла *a* и в большей степени хлорофилла *b*, возрастание относительной доли хлорофилла *a/b*, повышение фотосинтетической способности хвои. Максимальные изменения характеристик фотосинтетического аппарата *Picea obovata* Ledeb., отмечаются на расстоянии до 1 км от промзоны по преобладающему распространению выбросом (КПЗА 17,97-10,43).

2. Выявлены адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата у *Picea obovata* Ledeb., произрастающей в зоне влияния промышленной выбросов от промзла, которые, очевидно, происходят на уровне ультраструктуры хлоропластов и характеризуются преобладанием тилакоидов стромы и приводят к увеличению соотношения хлорофилла *a/b* и, как следствие, увеличению фотосинтетической способности хвои.

3. Результаты корреляционного анализа установлено, что содержание зеленых пигментов находится в обратной зависимости от КПЗА, что дает возможность их использовать в качестве дополнительного метода в оценки степени суммарного загрязнения среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ажиганич, Т.Е. Проведение сводных расчетов загрязнения атмосферы г. Кемерово для нормирования выбросов и диагностических оценок / Т.Е. Ажиганич, Т.Г. Алексеев, А.А. Быков и др. // В кн. «Экология города. Проблемы. Решения». Труды V город. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2003. С. 41-45.
2. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей // под ред. Ф.Т. Ныстадта. – М.-Л.: Гидрометеиздат, 1985. 350 с.

3. Быков, А.А. Разработка и применение математических моделей для управления чистотой атмосферы по среднегодовым показателям. Автореф. канд. дисс. – М., Лаборатория мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета и АН СССР, 1988. 22 с.
4. Быков, О.Д. Бескамерный способ изучения фотосинтеза: Методические указания. – Л., 1974. 17с.
5. Веретенников, А.В. Физиология растений. – Воронеж: Воронежская гос. лесотехн. академия, 2002. 272 с.
6. Гавриленко, В.Ф. Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание. Учеб. пособие / В.Ф. Гавриленко, М.Е. Ладыгина, Л.М. Хандобина. – М.: Высшая школа, 1975. 391 с.
7. Гонтарь, О.Б. Возрастные аспекты адаптаций растений в экстремальных условиях / О.Б. Гонтарь, В.К. Жиров, А.Х. Хаитбаев, А.Ф. Говорова // Вестник МГТУ. 2006. Том 9, №5. С. 729-734.
8. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (Дополнение к ОНД-86). – С-Пб.: ГТО им. А.И. Воейкова, 2005. 15с.
9. Мерзляк, М.Н. Фотодеструкция пигментов и липидов в изолированных хлоропластах / М.Н. Мерзляк, С.И. Погосян // Биологические науки. 1986. №3. С. 8-20.
10. Николаевский, В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. – Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
11. Неверова, О.А. Оценка адаптивного потенциала *Betula pendula* Roth в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово / О.А. Неверова, А.А. Быков // Современные проблемы науки и образования. 2015. №2. С. 551-561.
12. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. 92 с.
13. Цандекова, О.Л. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений / О.Л. Цандекова, О.А. Неверова // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, №1(3). С. 853-856.
14. Grumbach, K.H. Chloroplast pigments and their biosynthesis in relations to light intensity / K.H. Grumbach, H.K. Lichtenthaller // Photochem. Photobiol. 1982. V.35, №2. P. 209-212.
15. Lichtenthaller, H.K. Effects of biocides on the development of the photosynthetic apparatus of radish seedlings grown under strong and weak light conditions // Z. Naturforsch., 1986. V.34, № 9. P.936-940.

ADAPTATION OF PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF *PICEA OBOVATA* LEDEB. NEEDLES IN THE DOMINANT INFLUENCE OF EMISSIONS IN KEMEROVO CITY INDUSTRIAL ZONE

© 2016 О.М. Legoshchina¹, О.А. Neverova¹, А.А. Bykov²

¹ Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry SB RAS,
Institute of Human Ecology, Kemerovo

² Institute of Computational Technologies SB RAS, Kemerovo

Studied the adaptive reconstruction of the Siberian spruce needles assimilation apparatus under the prevailing influence of industrial emissions. It has been established that the emissions of industrial zone enterprises cause a decrease in the level of green pigments. Revealed adaptive reconstruction of the photosynthetic apparatus associated with increase in the relative proportion of the chlorophyll a / b, and as a result increase the photosynthetic ability of the *Picea obovata* Ledeb. The content of green pigments can be used as additional method to assess the total pollution.

Key words: complex index of air pollution, industrial zone, pigment, needle, photosynthetic ability, adaptation, reconstruction

Olga Legoshchina, Senior Engineer Biologist. E-mail: legoshchina@mail.ru

Olga Neverova, Doctor of Biology, Professor, Chief of the Ecological Biomonitoring Laboratory. E-mail: nev11@yandex.ru

Anatoliy Bykov, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow. E-mail: bykov@icc.kemsc.ru