

Динамика содержания хлорофиллов в листьях березы повислой (*Betula pendula*) в условиях техногенного загрязнения города Бийска

Dynamics of chlorophyll concentration in the birch (*Betula pendula*) leaves under the conditions of technogenic pollution in the city of Biysk

Соколова Г. Г., Кондратьева И. А., Калгина М. В.

Sokolova G. G., Kondrateva I. A., Kalgina M. V.

Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия. E-mail: sokolova-gg@mail.ru, ira_kondrateva_1997@mail.ru, mariya.kalgina1@mail.ru
Altai State University, Barnaul, Russia

Реферат. В статье рассмотрены результаты биохимических исследований содержания хлорофиллов *a* и *b* в листьях берез, произрастающих в разных условиях города Бийска: контроль, парки, скверы, автомагистрали, автозаправки, заводы, ТЭЦ. В парковых зонах по сравнению с контролем содержание хлорофиллов *a* и *b* и отношение *a* / *b* ниже. Лучшие условия произрастания берез (сомкнутость крон, удаление от автомагистралей, меньшая частота посещаемости) способствуют увеличению содержания хлорофилла *a* и *b* в листьях. Разреженное расположение деревьев в скверах и их интенсивное посещение, выбросы промышленных предприятий, автомашин и ТЭЦ приводят к уменьшению содержания хлорофилла *a* и *b* в листьях. Независимо от условий произрастания в течение вегетационного периода наблюдается закономерное увеличение содержания хлорофилла *a*. Выявлено изменение содержания хлорофилла *a* в листьях берез, в городе Бийске, меняющееся в сторону уменьшения в следующем ряду мест произрастания: контроль → парки → скверы → автомагистрали → автозаправки → заводы → ТЭЦ. В динамике по месяцам во всех местах произрастания берез выявлено небольшое увеличение концентрации хлорофиллов в июле, а затем ее снижение в августе.

Ключевые слова. Листья березы, техногенное загрязнение, фотосинтез, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*.

Summary. The article considers the results of biochemical studies of chlorophyll content in leaves of birch growing in different conditions in the city of Biysk: control, parks, squares, highways, petrol stations, factories, thermal power plants. In park areas, compared with the control, the content of chlorophylls *a* and *b* and the *a* / *b* ratio are lower. The best conditions for the growth of birch trees (closeness of crowns, distance from highways, and lower frequency of attendance) contribute to an increase in the content of chlorophyll *a* and *b* in the leaves. The sparse location of trees in squares and their intensive visits, emissions from industrial enterprises, cars and thermal power plants lead to a decrease in the content of chlorophyll *a* and *b* in the leaves. Regardless of the growing conditions, a regular increase in the content of chlorophyll *a* is observed during the growing season. A change in the content of chlorophyll *a* in birch leaves has been revealed; in the city of Biysk, it is changing downward in the following row of growing places: control → parks → squares → highways → petrol stations → factories → CHP. In dynamics by month, a slight increase in the concentration of chlorophylls in July was detected in all places of birch growth, and then its decrease in August.

Key words. Birch leaves, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, photosynthesis, technogenic pollution.

Введение. Одним из наиболее эффективных средств улучшения городской среды является озеленение. Зеленые насаждения играют важную роль в снижении негативного воздействия окружающей среды, а также определяют степень комфортности среды города, выражающейся, прежде всего, в здоровье жителей. Но стремительное техногенное и антропогенное загрязнение, которое является неотъемлемой частью больших современных городов, неотвратно приводит к уменьшению жизнеспособности растений, их преждевременному старению, которое выражается в изменении как биохимического состава, так и физиологических процессов (Гарифзянов, 2012; Соколова, Богатова, 2019).

В настоящее время в исследованиях, связанных с биоиндикацией состояния окружающей среды, активно используются методы оценки содержания пигментного комплекса древесных растений, используемых в озеленении городов. Это связано с тем, что самыми чувствительными к воздействию факторов среды являются фотосинтетические пигменты, являющиеся показателями продуктивности

фотосинтеза и индикаторами состояния растений. В условиях городских экосистем из-за низкой влажности, более высоких температур воздуха и повышенного уровня загрязнения существенно снижается фотосинтетическая активность (Николаевский, 2002; Ибрагимова и др., 2010; Garrity et al., 2011; Яшин, Зайцев, 2015). Анализ содержания хлорофиллов в листьях показывает реакцию растения на изменение факторов окружающей среды, характер их воздействия и направленность адаптации. В течение вегетации фотосинтетическая активность листьев повышается до момента полного формирования листовой пластинки, затем с увеличением возраста – понижается (Неверова, Быков, 2013; Dobrota et al., 2015).

Исследования ряда авторов показали, что изменения содержания пигментов в листьях являются маркерами техногенной нагрузки (Marakaev et al., 2006), причем это касается хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, соотношения хлорофиллов и их суммы (Неверова, 2001; Цандекова, Неверова, 2010; Скочилова, Закамская, 2013). Некоторые авторы указывают на то, что снижение величины a / b может характеризовать газоустойчивость растений (Di Vittorio, 2009).

Цель исследований – изучить динамику содержания хлорофиллов в листьях березы повислой в условиях техногенного загрязнения Бийска.

Объекты и методы исследования. В качестве объекта исследования нами была выбрана береза повислая *Betula pendula* Roth, которая широко используется в озеленении г. Бийска. *Betula pendula* – дерево высотой 10–25 м с негустой пирамидальной кроной и повисшими ветвями. Кора гладкая, белая, у старых деревьев у основания ствола – черно-серая, с глубокими трещинами. Молодые побеги голые, красно-бурые, покрыты смолистыми железками. Листья голые, черешковые, от ромбически-яйцевидных до треугольно-яйцевидных, заостренные на верхушке, двоякопильчатые. Основание листа ромбическое или клиновидное. Береза – однодомное растение. Цветки мелкие, раздельнополые, собраны в сидячие, повисающие сережки. Мужские сережки бурого цвета, а женские – зеленого. Цветет одновременно с распусканием листьев в апреле-мае. Это светолюбивое, засухоустойчивое, морозостойкое растение, неприхотливое к почве (Ветчинникова, 2004).

Для оценки содержания хлорофиллов в листьях березы были заложены 18 пробных площадок в различных районах г. Бийска, которые при дальнейшем анализе были разделены на группы в связи с разной степенью загрязнения: контрольный участок, парки, скверы, автомагистрали, заводы, ТЭЦ. Контролем явилась условно чистая территория за пределами города. Сбор материала осуществлялся в течение 2020–2022 гг. Листья березы собраны в средней части кроны в количестве 100 экземпляров с одной точки.

Содержание хлорофиллов в листовых органах проводили методом спектрофотометрии с использованием спектрофотометра марки SHIMADZU UV-1800 в трехкратной повторности. Спектр поглощения фотосинтетических пигментов определялся на следующих длинах волн: 662 нм – для хлорофилла *a*, 644 нм – для хлорофилла *b*. Концентрации пигментов в листьях рассчитывались по формулам Mac-Kinney и Wettstein (Рогожин, 2013). Полученные данные были обработаны статистически с использованием пакета прикладных программ Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007. Достоверность различий между вариантами определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение. В ходе исследования нами были установлены следующие закономерности содержания хлорофиллов *a* и *b* в листьях берез *Betula pendula*, произрастающих в разных условиях загрязнения г. Бийска.

Хлорофилл *a*. На контрольном участке содержание хлорофилла *a* в листьях березы повислой колебалось в диапазоне от 5,97 до 5,31 мг/100 г. В течение вегетационного периода наблюдалось небольшое увеличение содержания хлорофилла *a* в июле и закономерное снижение его содержания в августе.

По сравнению с контролем в листьях берез, растущих в парках г. Бийска, содержание хлорофилла *a* в среднем составило 4,32 мг/100 г и было достоверно меньше на 22–27 %. В динамике по месяцам выявлено увеличение содержания хлорофилла *a* в июле, а затем его снижение в августе, что характерно и для контрольного участка. В скверах города Бийска содержание хлорофилла *a* в листьях берез варьировало от 3,10 до 4,05 мг/100 г, что достоверно ниже по сравнению с контролем на 30–41 %. Низкое содержание хлорофилла *a* в листьях берез отмечено в августе, а более высокое содержание – в июле (табл. 1).

Дальнейшее снижение содержания хлорофилла *a* по сравнению с контролем отмечено в листьях берез, растущих вдоль автомагистралей (на 46–53 %) и около автозаправочных станций (50–56 %). Среднее содержание хлорофилла *a* в этих точках колебалось от 2,31 до 3,18 мг/100 г. Тенденция изменения содержания хлорофилла *a* в течение вегетации также сохранилась.

Таблица 1

Динамика содержания хлорофилла *a* в листьях берез, растущих в г. Бийске

Место произрастания	Динамика содержания хлорофилла <i>a</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	5,57 ± 0,04	5,97 ± 0,08	5,31 ± 0,06
Парки	4,33 ± 0,04	4,54 ± 0,05	3,83 ± 0,06
Скверы	3,88 ± 0,04	4,05 ± 0,05	3,10 ± 0,08
Автомагистрали	2,82 ± 0,06	3,18 ± 0,05	2,45 ± 0,05
Автозаправки	2,67 ± 0,08	2,98 ± 0,08	2,31 ± 0,05
Заводы	2,67 ± 0,04	2,84 ± 0,06	2,05 ± 0,04
ТЭЦ	2,43 ± 0,07	2,62 ± 0,08	2,00 ± 0,07

Примеч.: **2,43 ± 0,07** – значение достоверно при $p \leq 0,05$.

Концентрация хлорофилла *a* в листьях берез, растущих около заводов (олеумный завод, стеклозавод, котельный завод), достоверно ниже по сравнению с контролем на 52–61 %, а растущих в районе ТЭЦ – на 56–62 %.

Таким образом, содержание хлорофилла *a* в листьях берез, в городе Бийске меняется в сторону уменьшения в следующем ряду мест произрастания: контроль → парки → скверы → автомагистрали → автозаправки → заводы → ТЭЦ. При этом его концентрация снижается на 22–61 % (табл. 1). Наибольшее влияние на содержание хлорофилла *a* оказывают выбросы промышленных предприятий и ТЭЦ.

Хлорофилл *b*. На контрольном участке содержание хлорофилла *b* в листьях березы повислой варьировало в диапазоне от 1,76 до 1,84 мг/100 г. В течение вегетационного периода отмечено его колебание, аналогичное изменению содержания хлорофилла *a* (табл. 2).

По сравнению с контролем в листьях берез, растущих в парках г. Бийска, содержание хлорофилла *b* в среднем составило 1,97 мг/100 г и было достоверно выше на 12–25 %. В динамике по месяцам выявлено увеличение содержания хлорофилла *b* в июле, а затем его снижение в августе, что характерно и для контрольного участка. В скверах города Бийска содержание хлорофилла *b* в листьях берез варьировало от 1,44 до 2,06 мг/100 г, что достоверно не отличается от контроля в июне – июле, но ниже по сравнению с контролем в августе на 18 % (табл. 2).

Различия в содержании хлорофилла *b* по сравнению с контролем не характерно для листьев берез, растущих вдоль автомагистралей, в июне – июле, достоверное отличие отмечено только в августе (на 10 %). Содержание хлорофилла *b* в листьях берез, растущих около автозаправок, отличается от контроля на 10–16 %. Тенденция колебания содержания хлорофилла *b* в течение вегетации сохраняется.

Таблица 2

Динамика содержания хлорофилла *b* в листьях берез, растущих в г. Бийске

Место произрастания	Динамика содержания хлорофилла <i>b</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	1,84 ± 0,09	2,00 ± 0,05	1,76 ± 0,08
Парки	2,10 ± 0,06	2,49 ± 0,04	1,31 ± 0,06
Скверы	1,88 ± 0,05	2,06 ± 0,04	1,44 ± 0,05
Автомагистрали	1,89 ± 0,05	2,17 ± 0,06	1,57 ± 0,04
Автозаправки	1,64 ± 0,08	1,68 ± 0,03	1,50 ± 0,08
Заводы	1,53 ± 0,09	1,58 ± 0,04	1,38 ± 0,04
ТЭЦ	1,44 ± 0,04	1,51 ± 0,06	1,34 ± 0,07

Примеч.: **1,44 ± 0,04** – значение достоверно при $p \leq 0,05$.

Концентрация хлорофилла *b* в листьях берез, растущих около заводов, достоверно ниже по сравнению с контролем на 16–21 %, а растущих в районе ТЭЦ – на 21–24 %.

Следовательно, содержание хлорофилла *b* в листьях достоверно снижается по сравнению с контролем у берез, растущих около автозаправок, заводов и ТЭЦ, причем наибольшее снижение концентрации хлорофилла *b* выявлено у берез, растущих в районе ТЭЦ.

Сумма хлорофиллов в листьях берез, растущих в разных точках г. Бийска, изменялась от 3,34 до 7,97 мг/100 г, причем наибольшее количество хлорофиллов отмечено для контрольной точки, а минимальное количество – для районов автозаправок и ТЭЦ. В динамике по месяцам во всех местах произрастания берез выявлено небольшое увеличение концентрации хлорофиллов в июле, а затем ее снижение в августе (табл. 3).

Таблица 3

Общее количество хлорофиллов *a* и *b* в листьях берез, растущих в г. Бийске

Место произрастания	Сумма хлорофиллов <i>a</i> и <i>b</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	7,41	7,97	7,07
Парки	6,43	7,03	5,14
Скверы	5,76	6,11	4,54
Автомагистрали	4,71	5,35	4,02
Автозаправки	4,31	4,66	3,81
Заводы	4,20	4,42	3,43
ТЭЦ	3,87	4,13	3,34

Соотношение хлорофиллов *a* / *b*. В условиях г. Бийска высокие показатели отношения хлорофилла *a* / *b* характерны для листьев берез, растущих в условно чистых местообитаниях (контроль, парки, скверы). Низкий уровень данного параметра отмечен для берез, растущих в местах техногенного загрязнения воздушной среды. Минимальное значение параметра наблюдается у берез, растущих около автозаправок (табл. 4).

Таблица 4

Соотношение хлорофиллов *a* / *b* в листьях берез, растущих в г. Бийске

Место произрастания	Отношение хлорофиллов <i>a</i> / <i>b</i>		
	июнь	июль	август
Контроль	3,03	2,99	3,02
Парки	2,06	1,82	2,92
Скверы	2,06	1,97	2,15
Автомагистрали	1,49	1,47	1,56
Автозаправки	1,63	1,77	1,54
Заводы	1,75	1,80	1,49
ТЭЦ	1,69	1,74	1,49

Установленные нами сезонные изменения содержания хлорофиллов можно рассматривать в качестве адаптивных реакций березы на физиолого-биохимическом уровне на действие техногенного загрязнения, что повышает ее устойчивость к техногенному загрязнению воздушной среды г. Барнаула.

В литературе содержится достаточное количество сведений по содержанию фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой, в которых отмечается снижение содержания пигментов в условиях загрязнения. Эти данные согласуются с полученными нами результатами.

Таким образом, результаты наших исследований подтверждают, что снижение количества хлорофилла *a* и *b*, их соотношения, а также их общего количества в листьях берез являются важной реакцией растений на возрастающий уровень загрязнения. Максимальное содержание данных фотосинтетических пигментов характерно для наиболее благоприятных и наименее загрязненных участков.

Выводы.

1. Динамика содержания хлорофиллов в листьях березы в городе Бийске зависит от условий произрастания и интенсивности техногенного загрязнения воздушного бассейна города.

2. В условиях техногенного загрязнения содержание хлорофилла *a* в листьях берез достоверно уменьшается от 22 до 61 % в следующем ряду мест произрастания: контроль → парки → скверы → автомагистрали → автозаправки → заводы → ТЭЦ.

3. Концентрация хлорофилла *b* в листьях достоверно снижается по сравнению с контролем у берез, растущих около автозаправок, заводов и ТЭЦ на 16–24 %.

4. Общее содержание хлорофиллов в листьях берез, растущих в разных точках г. Бийска, изменялось в широком диапазоне, минимальное количество отмечено для районов автозаправок и ТЭЦ. Низкий уровень соотношения хлорофиллов *a* / *b* отмечен в листьях берез, растущих в местах техногенного загрязнения воздушной среды.

ЛИТЕРАТУРА

Ветчинникова Л. В. Береза: вопросы изменчивости (морфо-физиологические и биохимические аспекты). – М.: Наука, 2004. – 183 с.

Гарифзянов А. Р. Образование перекиси водорода и появление окислительного стресса в листьях древесных растений в условиях промышленного загрязнения // *Фундаментальные исследования*, 2012. – № 1. – С. 151–155.

Ибрагимова С. С., Горелова В. В., Кочетов А. В., Шумный В. К. Роль различных метаболитов в формировании стрессоустойчивости растений // *Вестник Новосибирского государственного университета*, 2010. – Т. 8, № 3. – С. 98–103.

Неверова О. А. Биоэкологическая оценка загрязнения атмосферного воздуха по состоянию древесных растений. – Новосибирск: Наука, 2001. – 119 с.

Неверова О. А., Быков А. А. Оценка адаптивного потенциала *Betula pendula* Roth. в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово // *Сибирский экологический журнал*, 2013. – № 2. – С. 24–27.

Николаевский В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. – Пушкино: ВНИИЛМ, 2002. – 220 с.

Рогожин В. В. Практикум по биохимии. – СПб.: Лань, 2013. – 544 с.

Соколова Г. Г., Богатова В. А. Динамика содержания хлорофиллов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающей в парках города Барнаула // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2019. – № 18. – С. 531–534. DOI: 10.14258/pbssm.2019112

Скочилова Е. А., Закамская Е. С. Изучение биохимических показателей *Betula pendula* Roth. в условиях городской среды // *Известия Самарского научного центра РАН*, 2013. – № 3. – С. 782–784.

Цандекова О. Н., Неверова О. А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2010. – № 1. – С. 853–856.

Яшин Д. А., Зайцев Г. А. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях березы повислой в условиях промышленного загрязнения // *Известия Уфимского научного центра РАН*, 2015. – № 4(1). – С. 193–196.

Di Vittorio A. V. Pigment-based identification of ozone-damaged pine needles as a basis for spectral segregation of needle conditions // *J. Environ. Quality*, 2009. – Vol. 38 (3). – P. 855–867.

Dobrota C., Lazar L., Baciu C. Assessment of physiological state of *Betula pendula* and *Carpinus betulus* through leaf reflectance measurements // *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2015. – Vol. 216. – P. 26–34.

Garrity S. R., Eitel Jan U. H., Vierling L. A. Disentangling the relationships between plant pigments and the photochemical reflectance index reveals a new approach for remote estimation of carotenoid content // *Remote Sensing of Environment*, 2011. – Vol. 115 (2). – P. 628–635.

Marakaev O. A., Smirnova N. S., Zagoskina N. V. Technogenic stress and its effect on deciduous trees (an example from parks in Yaroslavl) // *Russian Journal of Ecology*, 2006. – Vol. 37, № 6. – P. 373–377.