

Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях города Барнаула

Impact of technogenic pollution on the pigment composition of birch leaves (*Betula pendula* Roth) in the urban conditions of Barnaul

Соколова Г. Г.

Sokolova G. G.

Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия. E-mail: sokolova-gg@mail.ru

Altai State University, Barnaul, Russia

Реферат. В статье рассмотрены результаты анализа содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды) в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог г. Барнаула. Высокий уровень загрязнения вызывает снижение количества хлорофилла *a* и *b*, изменение соотношения хлорофиллов *a/b*. В качестве защитного механизма от разрушения молекул хлорофилла *a* и органических веществ выступают каротиноиды. Их количество увеличивается в течение вегетационного сезона.

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

Summary. The article considers the results of analysis of photosynthetic pigments content (chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids) in birch leaves growing along the roads of Barnaul. High level of pollution causes decrease in amount of chlorophyll *a* and *b* and a change in chlorophyll *a/b* ratio. Carotenoids act as a protective mechanism against the destruction of chlorophyll *a* molecules and organic substances. Their number increases during the growing season.

Key words. Chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids, technogenic pollution, the birch leaves.

Введение. В настоящее время исследования урбоэкосистем достаточно актуальны, так как города становятся основной средой обитания человека. В последние десятилетия наблюдается интенсивное загрязнение атмосферы городов газообразными выбросами автотранспорта и промышленных предприятий, что создает угрозу здоровью населения. Наличие и количество растений в экосистеме города является наиболее существенным фактором нейтрализации газообразных токсикантов (Николаевский, 1979).

Для экологической оценки воздушной среды городов используются биоиндикационные методы, позволяющие охарактеризовать стабильность развития растений при различных уровнях загрязнения (Опекунова, 2004; Павлов, 2005). Растения реагируют на наличие в воздухе даже малых доз токсических веществ, влияние которых у людей и животных трудно выявить. Стабильность развития растения как способность организма к развитию без нарушений является индикаторным признаком (Ерофеева, Шаповалова, 2015). Наиболее доступным для широкого использования способами оценки стабильности развития являются оценка морфологических признаков и динамики содержания пигментов (Неверова, 2001; Федорова, 2002; Цандекова, Неверова, 2010).

Фотосинтез является неотъемлемым процессом жизнедеятельности растений. Основными фотосинтетическими пигментами растений являются хлорофилл *a*, хлорофилл *b* и каротиноиды. Преобладающим пигментом является хлорофилл *a*, выполняющий следующие важные функции: избирательное поглощает энергии света, запасание полученной энергии и преобразование ее фотохимическим путем в химическую энергию первичных фотовосстановленных и фотоокисленных соединений (Неверова, Быков, 2013; Тюлькова, 2019). Хлорофилл *b* и каротиноиды являются вспомогательными фотосинтетическими пигментами, они выполняют защитную функцию. В норме соотношение хлорофиллов

a , b и каротиноидов составляет примерно 5:3:2, что считается наиболее оптимальным для эффективного протекания фотосинтеза (Павлова и др., 2010; Чупахина, 2014).

Высокое содержание хлорофилла a и величина отношения хлорофилла a/b могут служить признаком благоприятных условий произрастания растений. Действие поллютантов приводит к изменению биохимического состава, в том числе пигментного комплекса, снижению биологической продуктивности (Уразгильдин и др., 2016).

Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городских экосистем показал, что ассимиляционный аппарат наиболее чувствителен к действию токсикантов (Заворуева, Заворуев, 2010; Скочилова, Закамская, 2013).

Основные источники загрязнения атмосферного воздуха в Барнауле – автотранспорт и теплоэлектростанции. В атмосферном воздухе города преобладают следующие загрязняющие вещества: пыль, сажа, диоксид азота, формальдегид, пыль, бензапирен и др. Эти соединения в значительной степени влияют на пигментный состав, разрушают хлорофилл a , изменяют соотношение основных и дополнительных фотосинтетических пигментов растений (Соколова, Калгина, 2019).

Одним из самых распространенных древесных видов растений, используемых для озеленения г. Барнаула, является береза повислая (*Betula pendula* Roth), крупное листопадное дерево, достигающее в высоту 20–25 м, с ажурной, часто неправильной кроной. Диаметр кроны составляет 7–12 м, диаметр ствола – до 80 см. Однолетние побеги красно-коричневого цвета, покрыты многочисленными смолистыми желёзками-бородавочками. Характерная особенность дерева – белая кора. Корневая система сильно развита, но не проникает в почву глубоко. Листья черешковые, от ромбически-яйцевидных до треугольно-яйцевидных, 3–7 см длиной и 2–5,5 см шириной, ярко-зелёные, заостренные на верхушке, двоякопильчатые. Основание листа ромбическое или клиновидное. Листья голые, глянцевые, тонкие, в молодом возрасте клейкие. Береза – однодомное, ветроопыляемое растение с невзрачными мелкими цветками, собранными в повисающие серёжки. Плоды продолговато-эллиптические, крылатые орешки. Это светолюбивое, засухоустойчивое, морозостойкое растение, неприхотливое к почве, хороший индикатор техногенного загрязнения воздушной среды (Бухарина и др., 2013; Соколова, Богатова, 2019).

Целью нашей работы явилось изучение динамики содержания фотосинтезирующих пигментов в листьях березы повислой, растущей на перекрестках и вдоль автодорог в г. Барнауле.

Материалы и методы. Для оценки содержания фотосинтетических пигментов отбирались листья березы, произрастающих на пяти перекрестках автодорог г. Барнаула: ул. Малахова – ул. Юрина, ул. Малахова – Павловский тракт, пр. Ленина – ул. Пролетарская, пр. Ленина – пр. Строителей, пр. Красноармейский – ул. Молодежная, пр. Красноармейский – ул. Партизанская, ул. Петрова – ул. Малахова. В качестве контроля служили листья березы повислой, произрастающей в районе Южно-Сибирского ботанического сада. На каждой пробной площадке выбиралось 10 деревьев одного возраста и размера с ярко выраженными видовыми признаками, растущими на открытом месте во избежание стрессового влияния затенения. Из нижней части кроны на уровне поднятой руки с максимального количества доступных веток, направленных условно на север, запад, восток и юг, отбирались 50–100 неповрежденных листьев, которые затем высушивались. Сбор растительного материала осуществлялся в период активной вегетации, т. е. июне, июле и августе в середине дня с 10.00 до 15.00 часов, когда содержание пигментов в листьях наибольшее.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях тополя оценивалось на спектрофотометре марки SHIMADZU UV-1800. Измерения максимумов поглощения пигментов проводились в трехкратной повторности на длине волн фотосинтетических пигментов: 662 нм – хлорофилл a , 644 нм – хлорофилл b , 440,5 нм – каротиноиды. Концентрации пигментов в листьях тополя рассчитывались в два этапа по формулам (Гулиев и др., 2009; Рогожин, 2013):

1 этап. Расчет концентрации пигментов листьев в спиртовом растворе (мг/л):

$$C_a = 9,784D_{662} - 0,99D_{644},$$
$$C_b = 21,426 D_{644} - 4,650D_{662},$$

$$C_a + C_b = 5,134D_{662} + 20,436D_{664},$$

$$C_k = 4,695D_{440,5} - 9,268(C_a - C_b),$$

где D_{662} , D_{664} и $D_{440,5}$ – оптическая плотность при длинах волн 662, 644, 440,5 нм соответственно; C_a , C_b , C_k – концентрация хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в листьях объектов исследования (мг/л).

2 этап. Расчет количества пигментов в пробе (мг/100 г):

$$C_o = C \cdot V \cdot V2 / m \cdot V1 \cdot 10,$$

где C – концентрация пигмента, мг/л; V – объем исходной вытяжки, мл; $V1$ – объем вытяжки, взятой для разбавления, мл; $V2$ – объем разбавленной вытяжки, мл; m – масса навески.

Полученные данные обработаны статистически с использованием *t*-критерия Стьюдента (Лаккин, 1990).

Результаты и обсуждение. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог г. Барнаула, выявил следующие закономерности их динамики.

Хлорофилл *a*. На контроле в листьях берез содержание хлорофилла *a* варьировало от 4,99 до 5,56 мг/100 г, причем отмечено небольшое увеличение концентрации хлорофилла *a* в июле и снижение в августе (табл. 1). Содержание хлорофилла *a* в листьях берез, растущих вдоль автодорог и на перекрестках, варьировало от 1,79 до 2,61 мг/100 г, что достоверно ниже по сравнению с контролем на 58–64% (табл. 1). Кроме того, на данных участках отмечено большое количество листьев с некрозами.

Отмечены колебания содержания хлорофилла *a* в листьях берез в течение июня–августа: в июле незначительное повышение (в среднем на 3%), в августе – снижение (в среднем на 15%). Наиболее неблагоприятные условия произрастания для берез на перекрестках пр. Ленина – пр. Строителей, Павловский тракт – ул. Малахова, которые являются оживленными транспортными развязками как для легковых, так и грузовых автомобилей.

Таблица 1

Динамика содержания хлорофилла *a* в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	5,20 ± 0,02	5,56 ± 0,01	4,99 ± 0,01
Ул. Малахова – ул. Юрина	2,52 ± 0,03	2,61 ± 0,03	1,88 ± 0,04
Пр. Красноармейский – ул. Молодежная	2,49 ± 0,06	2,55 ± 0,03	2,00 ± 0,01
Пр. Красноармейский – ул. Партизанская	2,47 ± 0,05	2,56 ± 0,06	1,94 ± 0,08
Ул. Петрова – ул. Малахова	2,44 ± 0,04	2,52 ± 0,05	1,91 ± 0,03
Пр. Ленина – ул. Пролетарская	2,42 ± 0,05	2,50 ± 0,08	1,81 ± 0,08
Пр. Ленина – пр. Строителей	2,31 ± 0,05	2,40 ± 0,07	1,86 ± 0,05
Павловский тракт – ул. Малахова	2,22 ± 0,07	2,34 ± 0,02	1,79 ± 0,05

Примеч.: 2,52 ± 0,03 – значение достоверно при $p < 0,05$.

Хлорофилл *b*. Содержание хлорофилла *b* в листьях берез, растущих на контрольном участке, изменялось от 2,43 до 2,92 мг/100 г, выявлено незначительное увеличение хлорофилла *b* в июле и снижение – в августе (табл. 2).

Содержание хлорофилла *b* в листьях берез, растущих вдоль автодорог и на перекрестках, варьировало от 1,81 до 2,29 мг/100 г, что достоверно ниже относительно контроля на 22–36% (табл. 4). Наименьшее содержание хлорофилла *b* характерно для листьев берез, произрастающих на перекрестках пр. Ленина – пр. Строителей, Павловский тракт – ул. Малахова.

В динамике по месяцам выделяется тенденция небольшого увеличения содержания хлорофилла *b* в июле (на 1–4%) и снижения в августе (на 7–20%).

Таблица 2

Динамика содержания хлорофилла *b* в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	2,88 ± 0,01	2,92 ± 0,01	2,43 ± 0,04
Ул. Малахова – ул. Юрина	2,21 ± 0,01	2,29 ± 0,03	1,98 ± 0,08
Пр. Красноармейский – ул. Молодежная	2,17 ± 0,02	2,22 ± 0,03	1,84 ± 0,05
Пр. Красноармейский – ул. Партизанская	2,19 ± 0,10	2,25 ± 0,07	1,98 ± 0,05
Ул. Петрова – ул. Малахова	2,17 ± 0,08	2,24 ± 0,02	1,88 ± 0,07
Пр. Ленина – ул. Пролетарская	2,18 ± 0,04	2,22 ± 0,01	1,81 ± 0,05
Пр. Ленина – пр. Строителей	2,13 ± 0,02	2,22 ± 0,05	1,99 ± 0,09
Павловский тракт – ул. Малахова	2,11 ± 0,03	2,19 ± 0,04	1,86 ± 0,02

Примеч.: **2,21 ± 0,01** – значение достоверно при $p < 0,05$.

Таким образом, результаты наших исследований коррелируют с литературными данными, согласно которым реакцией растений на высокий уровень загрязнения является снижение количества хлорофилла *a* и *b*, так как высокий уровень загрязнения поллютантами способствует снижению накопления и деструкции этих фотосинтетических пигментов (Уразгильдин и др., 2016). Максимальное содержание хлорофилла *a* и *b* в листьях берез в условиях г. Барнаула отмечено для наиболее благоприятных и наименее загрязненных участков.

Соотношение хлорофиллов *a/b*. Нами подсчитано отношение хлорофиллов *a/b* в листьях берез, произрастающих в г. Барнауле, как показатель потенциальной фотохимической активности листьев. Высокое содержание хлорофилла *a* и величина отношения хлорофилла *a/b*, могут служить признаком высокой потенциальной интенсивности фотосинтеза.

На контрольном участке в листьях берез соотношение хлорофиллов *a/b* соответствует норме (5 : 3) и оптимально для эффективного протекания фотосинтеза. С июня по август отмечено увеличение соотношения хлорофиллов *a/b*, объясняется естественными сезонными явлениями.

Соотношение хлорофиллов *a/b* в листьях берез, произрастающих на перекрестках и вдоль дорог, снижено по сравнению с контролем в среднем на 38–55 % (табл. 3). Более низкие показатели соотношения хлорофиллов *a/b* характерны для листьев берез, произрастающих на перекрестках пр. Ленина – пр. Строителей, Павловский тракт – ул. Малахова.

Таблица 3

Соотношение хлорофиллов *a/b* в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Отношение хлорофиллов <i>a/b</i>		
	июнь	июль	август
Контроль	1,81	1,90	2,05
Ул. Малахова – ул. Юрина	1,14	1,14	0,95
Пр. Красноармейский – ул. Молодежная	1,15	1,15	1,07
Пр. Красноармейский – ул. Партизанская	1,13	1,14	0,98
Ул. Петрова – ул. Малахова	1,12	1,13	1,02
Пр. Ленина – ул. Пролетарская	1,11	1,13	1,00
Пр. Ленина – пр. Строителей	1,08	1,08	0,93
Павловский тракт – ул. Малахова	1,05	1,07	0,96

Изменения отношения хлорофиллов *a/b* свидетельствуют о перестройках ультраструктуры тканей листьев, в первую очередь тиллакоидов стромы или гран (Николаевский, 1979). Высокие показате-

ли отношения хлорофилла *a/b* характерны для листьев берез, произрастающих в более благоприятных условиях и обладающих более высокой степенью защиты мембран хлоропластов от фотоповреждений и большей эффективностью светоусвоения (Чупахина, 2014).

Каротиноиды. Содержание каротиноидов в листьях берез на контроле изменялось от 1,63 до 1,70 мг/100 г с незначительным увеличением его в течение летних месяцев (табл. 4).

Таблица 4

Динамика содержания каротиноидов в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Содержание каротиноидов, мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	1,63 ± 0,01	1,65 ± 0,01	1,70 ± 0,02
Ул. Малахова – ул. Юрина	1,02 ± 0,01	1,11 ± 0,01	1,69 ± 0,02
Пр. Красноармейский – ул. Молодежная	1,09 ± 0,07	1,13 ± 0,07	1,78 ± 0,06
Пр. Красноармейский – ул. Партизанская	0,81 ± 0,04	0,93 ± 0,01	1,96 ± 0,03
Ул. Петрова – ул. Малахова	0,93 ± 0,01	1,04 ± 0,07	1,98 ± 0,01
Пр. Ленина – ул. Пролетарская	0,95 ± 0,06	1,12 ± 0,06	1,81 ± 0,03
Пр. Ленина – пр. Строителей	0,85 ± 0,02	0,98 ± 0,04	1,81 ± 0,06
Павловский тракт – ул. Малахова	0,95 ± 0,02	1,05 ± 0,05	1,99 ± 0,01

Примеч.: **1,02 ± 0,01** – значение достоверно при $p < 0,05$.

Среднее содержание каротиноидов в листьях берез, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках, составило от 0,85 до 1,99 мг/100 г, что достоверно ниже по сравнению с контролем на 38–48 % в июне и достоверно выше по сравнению с контролем на 17 % в августе (табл. 4). Наименьшее содержание каротиноидов по сравнению с контролем отмечено в листьях берез, произрастающих на перекрестках пр. Ленина – пр. Строителей и пр. Красноармейский – ул. Партизанская, наибольшее – в листьях берез, произрастающих в районе ул. Малахова – ул. Юрина и пр. Красноармейский – ул. Молодежная.

Результаты анализа динамики содержания каротиноидов в течение вегетационного периода в листьях берез, растущих вдоль автодорог и на перекрестках, показали четкую тенденцию увеличения их концентрации. Соотношение содержания хлорофилла *a* к содержанию каротиноидов составляет приблизительно 5 : 2, что соответствует нормам, указанным в литературе (Николаевский, 1979).

Увеличение содержания каротиноидов в листьях берез, растущих при более высоком уровне техногенного загрязнения, в течение июня-августа свидетельствует об активации защитных механизмов, направленных на снижение негативного воздействия загрязнения и сохранении молекул хлорофилла *a* от разрушения. Каротиноиды частично берут на себя функции хлорофилла *a*, компенсируя недостаток основного пигмента, что подтверждается и литературными данными (Калверт, 2006; Ибрагимова и др., 2010; Якубова, 2011).

Таким образом, в условиях техногенного загрязнения в листьях берез, растущих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле, содержание хлорофилла *a* достоверно ниже по сравнению с контролем на 58–64 %, содержание хлорофилла *b* – на 22–36 %, содержание каротиноидов – достоверно ниже по сравнению с контролем на 38–48 % в июне и достоверно выше по сравнению с контролем на 17 % в августе.

ЛИТЕРАТУРА

Бухарина П. А., Кузьмин П. А., Гибадулина И. И. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) // Ботанические исследования, 2013. – Вып. 1. – С. 20–25.

Гулиев Р. Б., Азизов Б. М., Аббасзаде А. А. Оценка содержания хлорофилла в растениях, подвернутых антропогенному воздействию, спектрофотометрическим методом // Оптика и спектроскопия, 2009. – Т. 106. – № 3. – С. 514–520.

Ерофеева Е. А., Шатовалова К. В. Многолетний сравнительный анализ устойчивости *Betula pendula* (Betulaceae, Fagales) и *Tilia cordata* (Malvaceae, Malvales) к автотранспортному загрязнению // Поволжский экологический журнал, 2015. – № 4. – С. 390–399.

Заворуева Е. Н., Заворув В. В. Динамика флуоресценции и концентрации хлорофиллов листьев берез, растущих вблизи автомобильных дорог // Сибирский экологический журнал, 2010. – № 9. – С. 129–134.

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

Калверт Т. М. Эколого-физиологические особенности адаптации древесных растений к условиям крупных промышленных центров // Лесоведение, 2006. – № 7. – С. 34–36.

Лакин Г. Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1990. – С. 350–352.

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. Биологические основы газоустойчивости растений // Наука, 1979. – № 5. – С. 22–28.

Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 265 с.

Павлов И. Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2005. – 370 с.

Павлова Л. М., Котельникова И. М., Куимова Н. Г., Леусова Н. Ю., Шумилова Л. П. Состояние фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных растений в городской среде // Вестник российского университета дружбы народов, 2010. – № 2. – С. 11–19.

Розожин В. В. Практикум по биохимии. – СПб.: Лань, 2013. – С. 344–356.

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.

Соколова Г. Г., Калгина М. В. Динамика содержания пигментов в листьях тополя черного (*Populus nigra* L.), растущего около автодорог в г. Бийске // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2019. – № 18. – С. 535–539. DOI: 10.14258/pbssm.2019113.

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.

Тюлькова Е. Г. Функциональные особенности фотосинтетической системы древесных растений в техногенных условиях // Журнал Белорусского государственного университета. Серия Экология, 2019. – № 1. – С. 32–39.

Уразильдин Р. Ф., Зайцев Г. А., Кулагин А. Ю., Яшин Д. А. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях промышленного загрязнения // Карельский научный журнал, 2016. – Т. 5. – № 1. – С. 93–98.

Федорова А. И. Биоиндикация загрязнения городской среды // Известия Российской академии наук. Серия географии, 2002. – № 1. – С. 72–80.

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.

Чупахина Г. Н. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2014. – № 2. – С. 181–185.

Якубова М. М. Экологические аспекты биохимической адаптации // Известия академии наук республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук, 2011. – № 1. С. 73–79.