

Научная статья

УДК 630\*161:581.192.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47

### Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии

**В.В. Стасова\***, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [AAAG-8220-2021](https://orcid.org/0000-0001-9325-6715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9325-6715>

**Л.Н. Скрипальщикова**, канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотр.;

Researcher ID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

**Н.В. Астраханцева**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [P-7560-2017](https://orcid.org/0000-0001-6014-2148),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6014-2148>

**А.П. Барченков**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, Россия, 660036; [vistasova@mail.ru](mailto:vistasova@mail.ru), [lara@ksc.krasn.ru](mailto:lara@ksc.krasn.ru), [astr\\_nat@mail.ru](mailto:astr_nat@mail.ru), [alexbarchenkov@mail.ru](mailto:alexbarchenkov@mail.ru)

Поступила в редакцию 29.03.21 / Одобрена после рецензирования 03.07.21 / Принята к печати 05.07.21

**Аннотация.** Изучено содержание фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях техногенных нагрузок и в фоновых условиях. Исследования проводили в березняках разнотравного типа леса в пригородной зоне г. Красноярска. Древостои, испытывающие техногенные нагрузки, расположены к востоку от города по направлению основного переноса воздушных масс, фоновые – в северном и западном направлениях от города, техногенная нагрузка на эти древостои минимальна. Содержание фотосинтетических пигментов определяли в этанольных экстрактах, расчет проводили на 1 г абсолютно сухой массы листьев. Аккумуляцию пыли листовой поверхностью оценивали по методике Ж. Детри (1973). В промытых листьях определяли содержание ионов цинка, свинца, алюминия и фтора. Показано, что содержание хлорофилла *a* в листьях берез из условно чистых мест произрастания несколько ниже, чем в листьях из древоствоев, подвергающихся техногенным нагрузкам. Содержание хлорофилла *b* в листьях берез из разных мест произрастания оказалось в 2,5–3 раза ниже, чем хлорофилла *a*, и сопоставимо с содержанием каротиноидов. Общее содержание хлорофиллов колебалось от 5,4 до 7,3 мг/г абсолютно сухой массы, соотношение форм хлорофиллов – от 2,5 до 3, отношение суммы содержания хлорофиллов к суммарному содержанию каротиноидов – от 3,4 до 3,8. При увеличении пылевой нагрузки росло содержание всех фотосинтетических пигментов. Накопление ионов цинка в клетках листа березы отрицательно сказывалось на содержании пигментов, особенно хлорофилла *a*, но с соотношением пигментов не коррелировало. Значимой корреляции содержания свинца и фотосинтетических пигментов не установлено. При увеличении концентрации алюминия в листьях количество хлорофиллов и каротиноидов достоверно возрастало, связи уровня алюминия с соотношением пигментов не обнаружено. Между содержанием фтора в листовой массе и количеством разных форм хлорофилла достоверных корреляций не найдено. Полученные результаты свидетельствуют об адаптивной реакции фотосинтетического аппарата на присутствие поллютантов в концентрациях ниже пороговых значений.

**Ключевые слова:** пригородные леса, техногенное влияние, береза повислая, пигменты листьев, хлорофиллы, каротиноиды, техногенная пыль, цинк, свинец, алюминий, фтор, Красноярск

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках базовых проектов фундаментальных исследований Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата», № 0287-2021-0008 и «Снижение рисков возрастающего воздействия болезней и вредителей на лесные экосистемы в условиях глобальных изменений окружающей среды», № 0287-2021-0011.

**Для цитирования:** Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П. Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 35–47. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-35-47>

Original article

### Photosynthetic Pigments in Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) with Technogenic Load

**Victoria V. Stasova**<sup>✉</sup>, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [AAG-8220-2021](https://orcid.org/0000-0001-9325-6715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9325-6715>

**Larisa N. Skripal'shchikova**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist, Assoc.Prof.;

Researcher ID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

**Natalya V. Astrakhantseva**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [P-7560-2017](https://orcid.org/0000-0001-6014-2148), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6014-2148>

**Alexey P. Barchenkov**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [vistasova@mail.ru](mailto:vistasova@mail.ru)<sup>✉</sup>, [lara@ksc.krasn.ru](mailto:lara@ksc.krasn.ru), [astr\\_nat@mail.ru](mailto:astr_nat@mail.ru), [alexbarchenkov@mail.ru](mailto:alexbarchenkov@mail.ru)

Received on March 29, 2021 / Approved after reviewing on July 03, 2021 / Accepted on July 05, 2021

**Abstract.** The content of photosynthetic pigments in silver birch leaves (*Betula pendula* Roth.) is studied in areas with technogenic load and in baseline conditions. The research is performed in a forb type of birch forest in the suburbs of Krasnoyarsk. The wood stands exposed to a high level of technogenic pressure are located to the east of the city in the prevailing direction of air mass movement. The reference stands are under the least technogenic pollution and grow in western and northern areas of the city. The photosynthetic pigments are determined in ethanol extracts, calculated per 1 g of absolute dry mass (a.d.m.) of the leaves. A level of dust deposition on leaf surfaces is evaluated according to the method of J. Detrie (1973). The amounts of zinc, lead, aluminum, and fluorine ions are estimated in the washed leaves. It is found that the content of chlorophyll *a* inside the birch leaves from a relatively clean environment is slightly lower compared to the concentration in the leaves with the technogenic load. The chlorophyll *b* concentration is 2.5–3 times less than chlorophyll *a* and is close to the amount of carotenoids. The total chlorophyll content in birch leaves from different locations ranges from 5.4 to 7.3 mg/g a.d.m., the ratio of chlorophyll forms varies from 2.5 to 3, the proportion of net chlorophyll to carotenoids is between 3.4 and 3.8. As the level of dust increases, the content of the total photosynthetic pigments also rises.



The accumulation of zinc ions in the birch leaf cells has a negative effect on pigment content, especially chlorophyll *a*, but doesn't correlate with the ratio of the pigments. There has not been any correlation found between the lead and the photosynthetic pigments. It is noted that the rise in the concentration of aluminum significantly affects the contents of the chlorophylls and the carotenoids, while no relationship has been discovered between the concentration of aluminum and the proportion of the pigments. The relationship between fluorine and different forms of chlorophyll is absent as well. The results indicate the adaptive response of the photosynthetic system to the presence of pollutants in concentrations below the threshold values that are indicated in the literature.

**Keywords:** suburban forests, technogenic impact, *Betula pendula* Roth., leaf pigments, chlorophylls, carotenoids, technogenic dust, zinc, lead, aluminum, fluorine, Krasnoyarsk

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the basic research projects of V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS "Natural and Anthropogenic Dynamics of Middle Siberia Taiga Forests in Changing Climate", № 0287-2021-0008, and "Reducing the Risks of the Increasing Impact of Diseases and Pests on Forest Ecosystems in the Context of Global Environmental Changes", № 0287-2021-0011.

**For citation:** Stasova V.V., Skripal'shchikova L.N., Astrakhantseva N.V., Barchenkov A.P. Photosynthetic Pigments in Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) with Technogenic Load. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 3, pp. 35–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-35-47>

### Введение

Содержание фотосинтетических пигментов часто используют в качестве индикатора воздействия загрязняющих веществ. Хроническое воздействие даже небольших доз двуокиси серы, оксидов азота и соединений фтора может приводить к потере хлорофилла и снижению фотосинтеза [12]. Принципиальная возможность использования содержания фотосинтетических пигментов для целей индикации суммарного загрязнения окружающей среды показана О.А. Неверовой [16].

Внешним проявлением изменения концентрации фотосинтетических пигментов является изменение окраски листьев (общая дехромация, локальные хлорозы). Показатель дехромации древесных пород варьирует в широком диапазоне – от 10 до 60 %, наиболее подвержены дехромации хвойные породы, из лиственных – тополь [25].

Количественное определение содержания пигментов в листьях растений, произрастающих в городской среде, и особенно вблизи крупных промышленных предприятий, показало, что усиление техногенной нагрузки сопровождается снижением концентрации хлорофиллов и каротиноидов [15, 24, 26]. Следствием этого является уменьшение фотосинтетической способности ассимиляционного аппарата. Максимальное снижение фотосинтетической способности отмечалось у сирени и липы, минимальное – у сосны и ели. Выявлено, что у лиственных пород по сравнению с хвойными фотосинтетическая способность падает в большей степени, что, вероятно, связано с большей потенциальной интенсивностью газообмена у первых [15].

Соотношение содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов также не остается постоянным. Изменения в соотношении пигментов зависят от интенсивности техногенной нагрузки, химического состава поллютантов и видовой принадлежности растения [11, 19]. У устойчивых видов при низкой концентрации сернистого газа наблюдалось повышение содержания пигментов [18]. Изменение соотношения пигментов свидетельствует о преимущественном разрушении одного из них или активации синтеза других. Для березы повислой отмечался более стабильный уровень хлорофилла *a* при большей изменчивости содержания хлорофилла *b* и каротиноидов [8]. Авторы считают, что поддержание стабильного уровня концентрации хлорофилла *a*, представленного как в реакционных центрах, так и в антенном комплексе, является показателем поддержания физиологической нормы, необходимой для оптимизации протекания фотосинтеза. Содержание хлорофилла *b* и каротиноидов обычно более изменчиво, так как первый, синтезируясь в дополнительном количестве, компенсирует недостаточное освещение (поступление световых квантов ниже уровня насыщения), а вторые, помимо участия в фотосинтезе, выполняют роль важнейших компонентов антиоксидантной системы. Они выступают в качестве эффективной защиты от свободных радикалов, которые образуются в результате метаболических реакций не только в листьях, но и в других органах растений [8].

Тяжелые металлы являются одними из наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды в условиях городских территорий. В придорожных посадках содержание суммы хлорофиллов в листьях березы повислой (г. Кемерово) снижалось на 8–34 % по сравнению с контролем, а также отмечалось большее уменьшение содержания хлорофилла *b* по сравнению с хлорофиллом *a* [24]. Исследования содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой и тополя бальзамического в районах г. Красноярска с разным уровнем загрязнения показали уменьшение среднего содержания хлорофилла *a* – на 8–13 %, хлорофилла *b* – на 20–38 %, суммы хлорофиллов – на 13–19 %, суммы каротиноидов – на 2–7 % [10].

Цель работы – оценка содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы под воздействием техногенных нагрузок и в фоновых условиях, а также влияния некоторых компонентов загрязнения на состав и концентрацию пигментов.

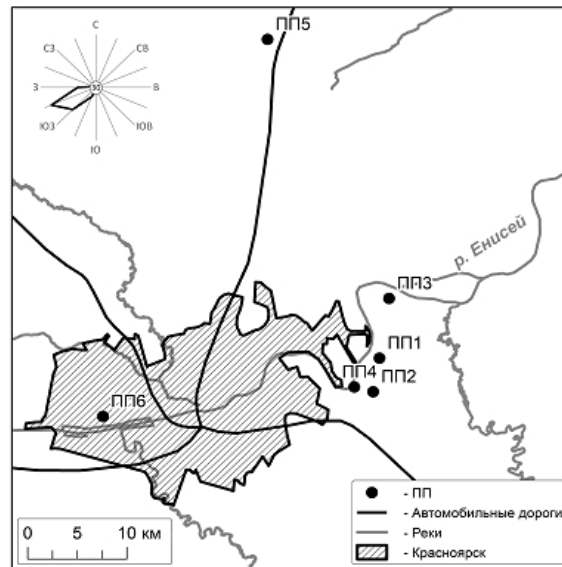
#### *Объекты и методы исследования*

Исследования проводили в 2016 г. в березняках разнотравного типа на мониторинговых пробных площадях (ПП), заложенных в пригородной зоне г. Красноярска и подвергающихся антропогенным нагрузкам различной интенсивности [20]. ПП 1–4 расположены к востоку от города по направлению основного переноса воздушных масс, содержащих выбросы промышленных предприятий и автотранспорта (буферная зона). Выбранные для сравнения ПП 5 и 6 расположены соответственно в северном и западном направлении от города, техногенная нагрузка на них минимальна, и они рассматривались как фоновые (рис. 1). Средний возраст древостоев 50–80 лет [20].

На каждой ПП в начале августа отобрали по 5 модельных деревьев, средних по высоте и диаметру. Листья отбирали по периметру нижней части кроны каждого модельного дерева, из них методом «конверта» получали среднюю пробу 20 листьев.

Рис. 1. Схема расположения исследуемых березовых насаждений: ПП 1 – злаково-разнотравный березняк; ПП 2 и 3 – разнотравно-злаковые березняки; ПП 4 – разнотравно-осочковый березняк; ПП 5 и 6 – разнотравные березняки

Fig. 1. Location of the studied birch stands. Buffer zone: ПП 1 – graminous-forb; ПП 2 – graminous-forb; ПП 3 – graminous-forb; ПП 4 – sedge-forb. Reference: ПП 5 – forb; ПП 6 – forb



Содержание фотосинтетических пигментов устанавливали в этанольных экстрактах по общепринятой методике [31, 32], расчет проводили на 1 г абсолютно сухой массы (а.с.м.) листьев. Остальные листья, собранные с модельного дерева, использовали для определения аккумуляции пыли листовой поверхностью [6]. Для этого каждый образец листьев взвешивали и промывали в 1 л дистиллированной воды. Смывы фильтровали через абсолютно сухой фильтр. Количество пыли на листовой массе находили по разнице между заполненным и абсолютно сухим фильтром и пересчитывали на 1 кг а.с.м. листьев [6]. Для химического анализа промытые листья высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С. Содержание тяжелых металлов, алюминия и валового фтора в листьях определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Красноярский».

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Содержание цинка, свинца, алюминия и фтора, выявленное в листьях березы в пригородах Красноярска, сравнили со значениями, указанными для растений как нормальные и токсичные [7]. Не отмечено повышения концентраций изученных элементов до значений, вызывающих повреждения растений (табл. 1).

Основную часть фотосинтетических пигментов листьев березы составляет хлорофилл *a*. В листьях берез из условно чистых мест произрастания (ПП 5 и 6) его содержание несколько ниже, чем в листьях из древостоев, подвергающихся техногенным нагрузкам (рис. 2). Содержание хлорофилла *b* в листьях березы из разных мест произрастания составляет от 1,3 до 1,8 мг/г а.с.м., что в 2,5–3 раза ниже, чем хлорофилла *a*, и сопоставимо с содержанием каротиноидов. Общее количество хлорофиллов колеблется от 5,4 до 7,3 мг/г а.с.м. листьев, соотношение форм хлорофиллов – от 2,5 до 3,0, отношение суммы содержания хлорофиллов к суммарному содержанию каротиноидов – от 3,4 до 3,8 и не позволяет выявить связи показателя с особенностями условий произрастания исследуемых березовых древостоев (рис. 3).

Таблица 1

**Аккумуляция пыли на поверхности листьев и содержание элементов  
(мг/кг а.с.м.) в листовой массе березы повислой**  
**Dust deposition on leaf surfaces and content of chemical elements  
(mg/kg a.d.m.) in leaf mass of silver birch**

№ ПП / концентрация элементов в растениях [7]	Пыль	Zn	Pb	Al	F
1	5,04±1,24	69,0±14,0	4,60±1,20	42,0±11,0	13,86±1,48
2	7,94±1,74	92,0±18,0	9,10±2,30	93,0±24,0	13,12±1,30
3	3,11±0,41	34,7±6,9	0,95±0,24	145,0±38,0	13,68±1,52
4	5,08±0,66	86,0±17,0	1,95±0,49	37,1±9,6	13,90±1,46
5	2,03±0,65	93,0±19,0	0,11±0,03	11,8±3,1	7,64±0,86
6	1,28±0,24	85,0±19,0	0,29±0,07	36,8±9,6	10,96±1,32
Нормальная	–	27–150	5–10	–	5–30
Токсичная	–	100–400	30–100	200	50–500

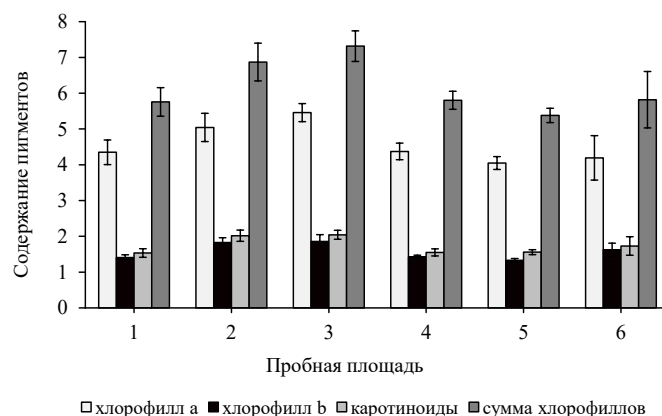


Рис. 2. Содержание хлорофиллов *a*, *b*, суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях берез из разных мест произрастания, мг/г а.с.м.

Fig. 2. Chlorophylls *a*, *b*, total amount of chlorophylls and carotenoids in birch leaves from different stands, mg/g a.d.m.

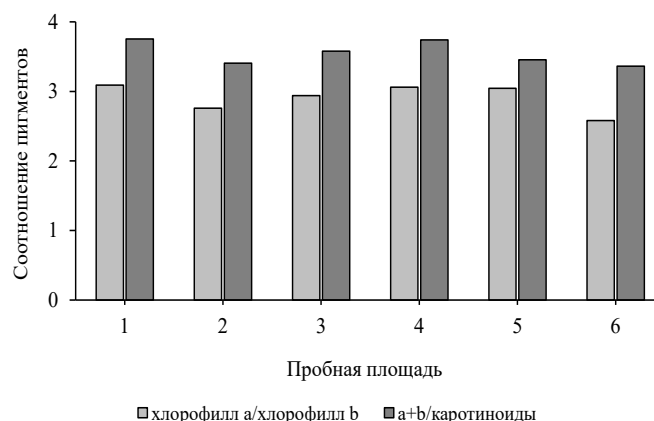


Рис. 3. Соотношение содержаний хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* и суммы хлорофиллов к сумме каротиноидов в листьях берез из разных мест произрастания

Fig. 3. Ratios of chlorophyll *a* to chlorophyll *b* and chlorophylls sum to carotenoids sum in birch leaves from different stands

Хлорофиллы и каротиноиды принимают непосредственное участие в процессе фотосинтеза. Хлорофилл *a* в основном локализован в фотосистемах I и II мембран хлоропластов, где осуществляются фотохимические реакции преобразования энергии света в энергию химических связей. Часть хлорофилла *a*,

хлорофилл *b* и каротиноиды входят в состав светособирающих комплексов, поглощающих и передающих энергию в фотосистемы. Поэтому содержание пигментов может выступать в качестве показателя взаимосвязи растения со средой и характеристикой его фотосинтетической продуктивности [1, 4]. Пигментный аппарат растений приспособливается к условиям среды, при этом изменяется как общее содержание пигментов, так и их соотношение. Небольшое повышение количества зеленых пигментов было отмечено у устойчивых листовых пород в условиях низкого и среднего уровня загрязнения, а в условиях сильного загрязнения происходили снижение содержания пигментов и подавление фотосинтетической активности [13–15, 18, 19].

Изменения в соотношении пигментов зависят от интенсивности техногенной нагрузки, химического состава поллютантов и видовой принадлежности растения [11, 19]. В городских условиях в листьях древесных пород содержание фотосинтетических пигментов увеличивалось в зонах с умеренной техногенной нагрузкой и снижалось при повышении уровня загрязнения (примагистральные посадки) [2]. В опытах с фумигацией смесью SO<sub>2</sub> и HF, характерной для выбросов алюминиевых заводов, у устойчивых лесных древесных видов отношение хлорофиллов *a/b* имело более высокое значение, чем у неустойчивых [17]. Изменение соотношения пигментов свидетельствует о преимущественном разрушении одного из них или активации синтеза других. При этом многие авторы считают более стабильным содержание хлорофилла *a* как основного пигмента, участвующего как в реакционных центрах, так и в светособирающем комплексе [8, 10, 19]. Соотношения пигментов изменяются в зависимости от сезона [26]. Так, в листьях березы максимальное содержание хлорофилла *a* отмечено в июле в зоне загрязнения атмосферы выбросами нефтехимических производств Уфимского промышленного центра, минимальное – в мае и августе. В относительно чистом районе максимум хлорофилла *a* зафиксирован в мае, минимум – в августе. Для хлорофилла *b* максимум установлен в июле–августе в условиях загрязнения и в мае – в чистом районе. Содержание каротиноидов в листьях березы в условиях загрязнения выше в июне и июле, ниже контрольных значений – в мае, в августе содержание каротиноидов в условиях загрязнения и в контроле практически одинаково [26].

Нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между содержанием фотосинтетических пигментов в листьях березы из разных мест произрастания, количеством пыли, накопившейся на листьях модельных деревьев, и уровнем некоторых элементов в листовой массе (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между содержанием фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой, пылевой нагрузкой и количеством элементов в листовой массе**  
**Correlation coefficients between photosynthetic pigments, dust deposition and chemical elements of silver birch leaves**

Нагрузка	Хлорофилл			Каротиноиды	<i>a/b</i>	<i>a+b</i> / каротиноиды
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>			
Пыль	0,734	0,660	0,732	0,654	–0,091	0,065
Zn	–0,682	–0,462	–0,634	–0,444	–0,179	–0,336
Pb	0,361	0,362	0,371	0,362	–0,095	–0,011
Al	0,989	0,890	0,986	0,895	–0,162	–0,032
F	0,533	0,104	0,419	0,142	0,702	0,715

По результатам расчета парных корреляций можно заключить, что содержание фотосинтетических пигментов связано с количеством пыли, накапливающейся на листьях, заметной положительной связью. В условиях повышенной пылевой нагрузки увеличивается содержание всех фотосинтетических пигментов, причем на их соотношение пыль влияния не оказывает. Отложение пыли на поверхности листьев уменьшает количество света, проникающего в клетки, создавая эффект некоторого затенения листьев. Можно предположить, что увеличение содержания пигментов является приспособительной реакцией на уменьшение светового потока. Теневые листья, в отличие от световых, содержат большее количество пигментов [21, 31].

В составе техногенной пыли присутствуют вещества и ионы, в том числе тяжелых металлов, которые могут проникать в листья через устьица или даже через кутикулу [3, 22]. При исследовании лиственных древесных пород было показано, что наибольшей аккумулярующей способностью в отношении тяжелых металлов обладают листья березы, наименьшей – листья липы. Для листьев березы характерно повышенное поглощение наиболее токсичных тяжелых металлов – кадмия, свинца и никеля, а также марганца [3].

Содержание цинка в листьях березы на разных ПП колеблется от 34,7 до 93 мг/кг а.с.м. Концентрация ионов цинка в растениях 100–400 мг/кг считается токсичной [7]. Таким образом, содержание цинка в листовой массе березы в пригородах Красноярска не достигает уровня, при котором проявляются его токсические свойства. Тем не менее накопление ионов цинка в клетках листа березы отрицательно коррелирует с содержанием пигментов, особенно хлорофилла *a* (табл. 2). Соотношение пигментов, как показали расчеты, не связано с содержанием цинка. Цинк необходим для растений и выполняет важные функции в метаболизме, входя в состав разнообразных ферментов, таких как дегидрогеназы, протеиназы, пептидазы и фосфогидролазы [29]. Рядом авторов показано, что основные функции цинка в растениях связаны с метаболизмом углеводов, протеинов и фосфата, а также с образованием ауксина, ДНК и рибосом [28]. Есть свидетельства того, что цинк влияет на проницаемость мембран и стабилизирует клеточные компоненты и системы у микроорганизмов. Полагают, что цинк повышает устойчивость растений к сухим и жарким погодным условиям, а также к бактериальным и грибковым заболеваниям [7]. Избыток цинка оказывает негативное действие на растения [35]. В частности, он вызывает уменьшение содержания в листьях основных фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), снижение потенциальной квантовой эффективности фотосистемы II [9].

Выявленное содержание свинца в листьях березы в фоновых условиях очень низкое – 0,11–0,28 мг/кг а.с.м. листьев – и достигает 9,1 мг/кг на ПП 2. Нормальное содержание этого элемента в растениях колеблется от 5 до 10 мг/кг сухой массы [7], т. е. в пригородных лесах Красноярска концентрация свинца находится в пределах нормы. Расчеты не показали заметной корреляции содержания свинца и фотосинтетических пигментов (табл. 2). Свинец – токсичный тяжелый металл, не относится к элементам, необходимым для растений [7, 37]. Ионы свинца подавляют рост растений, нарушают поглощение минеральных элементов и водный баланс, изменяют гормональный статус и воздействуют на структуру и проницаемость мембран. Под влиянием свинца



снижается интенсивность фотосинтеза, уменьшается содержание хлорофиллов и каротиноидов вследствие ингибирования ряда ферментов их биосинтеза [33]. К основным источникам загрязнения свинцом относятся техногенная пыль и выхлопные газы автотранспорта. Береза по сравнению с другими лиственными породами (тополь, рябина, липа) аккумулирует в листьях наибольшее количество свинца [3].

Содержание алюминия в листьях березы колеблется от 11,8 (ПП 5) до 145 мг/кг а.с.м. (ПП 3). Токсичная концентрация алюминия у растений составляет свыше 200 мг/кг [7]. Расчеты парной корреляции содержания алюминия и фотосинтетических пигментов показали, что при увеличении концентрации алюминия в листьях содержание хлорофиллов и каротиноидов достоверно возрастает, при этом не выявлено корреляции с соотношением пигментов (табл. 2). Алюминий не является тяжелым металлом и очень распространен в земной коре. Его физиологические функции в растении неясны. В обзорах, посвященных влиянию ионов  $Al^{3+}$ , указывается, что избыток этого элемента нарушает деление клеток, воздействуя на цитоскелет [38]. Наиболее токсичное действие алюминий оказывает на корни [38], но также влияет и на надземные органы, вызывая изменения в клетках листьев, уменьшение апертуры устьиц и интенсивности фотосинтеза из-за снижения содержания фотосинтетических пигментов и нарушения работы фотосистем [30]. Алюминий приводит к дефициту кальция и магния, препятствуя их поглощению растительными клетками [7, 36]. Однако алюминий может благотворно влиять на рост некоторых растений [34]. Для ряда древесных и возделываемых растений показано, что алюминий увеличивает содержание хлорофилла, каротиноидов, сахаров, аминокислот, гормонов и метаболитов шикиматного пути [27].

Анализ корреляции содержания фтора в листьях березы повислой с количеством и соотношением фотосинтезирующих пигментов не выявил достоверных значений связи данных показателей (табл. 2). Это может быть связано с тем, что содержание фтора в листьях берез, произрастающих под влиянием фторсодержащих выбросов, не достигает критических значений – от 50 до 500 мг/кг а.с.м. [5, 7]. Однако обнаружена положительная связь соотношений пигментов и содержания фтора в листьях (табл. 2), что свидетельствует об адаптивной реакции фотосинтетического аппарата березы на присутствие ионов фтора в листьях в концентрациях ниже пороговых. Фтор принадлежит к числу элементов, природная концентрация которых в растениях очень низка. Его среднее содержание в различных органах растений колеблется от 0,1 до 5 мг/кг а.с.м., однако может падать и до значительно меньшего уровня. Есть растения – аккумуляторы фтора. В различных видах чая фтора содержится 50–360 мг/кг, в листьях камелии – до 1370 мг. Листья березы накапливают в 3 раза больше этого элемента, чем другие породы в идентичных условиях [23]. Фтор, его летучие соединения и соли высокотоксичны [5]. Ионы фтора нарушают строение и проницаемость клеточных мембран, инактивируют некоторые ферменты, нарушают процесс дыхания и подавляют фотосинтез [18].

### *Заключение*

Таким образом, содержание фотосинтетических пигментов в листьях берез в древостоях, подвергающихся техногенному воздействию, несколько выше, чем в фоновых древостоях. Аккумуляция техногенной пыли на листьях

положительно коррелирует с содержанием пигментов, особенно хлорофилла *a*. Возможно, это связано с уменьшением светового потока из-за пылевого покрова на поверхности листьев. Содержание отдельных химических элементов в листовой массе не превышает уровней, считающихся критическими для нормальной продуктивной деятельности растений. Выявлены отрицательная корреляция количества пигментов, особенно хлорофилла *a*, с содержанием цинка и положительная – с содержанием алюминия. Не установлена корреляция содержания фотосинтетических пигментов с количеством свинца. Аккумуляция листьями фтора коррелирует с соотношениями пигментов – при накоплении фтора увеличивается отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b*, а также отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых.

В целом по физиолого-биохимическим характеристикам листового аппарата состояние древостоев березы повислой, произрастающих в пригородах г. Красноярск, при выявленных показателях загрязнения пылью, цинком, свинцом, алюминием и фтором можно считать удовлетворительным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барахтенова Л.А., Николаевский В.С. Влияние сернистого газа на фотосинтез растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 86 с.  
Barakhtenova L.A., Nikolayevskiy V.S. *Influence of Sulfur Dioxide on Plant Photosynthesis*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 86 p. (In Russ.).
2. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект: моногр. Ижевск: УдГУ, 2012. 206 с.  
Bukharina I.L., Zhuravleva A.N., Bolyshova O.G. *Urban Plantings: Ecological Aspect. Monograph*. Izhevsk, Izdatel'stvo of Udmurt University Publ., 2012. 206 p. (In Russ.).
3. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 3. С. 68–73.  
Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu., Titov A.F. Patterns of Heavy Metal Accumulation in Leaves of Trees in Urban Areas in the North. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Transactions of KarRC RAS, 2013, no. 3, pp. 68–73. (In Russ.).
4. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде. Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 205 с.  
Getko N.V. *Plants in Technogenic Environment. Structure and Function of Assimilation Apparatus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 205 p. (In Russ.).
5. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды / пер. с англ. Н.С. Гельман; под ред. Г.М. Илькуна. М.: Мир, 1979. 200 с.  
Guderian R. *Air Pollution*. Transl. from English N.S. Gelman, Ed. by G.M. Ilkun. Moscow, MIR Publ., 1979. 200 p. (In Russ.).
6. Детри Ж.-П. Атмосфера должна быть чистой: загрязнители атмосферы и борьба с ними. М.: Прогресс, 1973. 380 с.  
Detri Zh.-P. *The Atmosphere Must Be Clean: Atmospheric Pollutants and Counteraction Against Them*. Moscow, Progress Publ., 1973. 380 p. (In Russ.).
7. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.  
Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Trace Elements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. (In Russ.).
8. Кавеленова Л.М., Малыхина Е.В., Розно С.А., Смирнов Ю.В. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений // Поволж. экол. журн. 2008. № 3. С. 200–210.

Kavelenova L.M., Malykhina E.V., Rozno S.A., Smirnov Yu.V. The Methodology Ecophysiological Studies of the Leaves of Woody Plants. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* = Journal of Ecology of the Volga, 2008, no. 3, pp. 200–210. (In Russ.).

9. Казнина Н.М., Батова Ю.В., Лайдинен Г.Ф., Титов А.Ф. Влияние цинка на рост и фотосинтетический аппарат растений пшеницы в условиях оптимума и гипотермии // Тр. КарНЦ РАН. 2017. № 12. С. 118–124.

Kaznina N.M., Batova Yu.V., Laydinen G.F., Titov A.F. The Effect of Zinc on the Growth and Photosynthetic Apparatus of Wheat Under Optimal and Hypothermic Conditions. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Transactions of KarRC RAS, 2017, no. 12, pp. 118–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb676>

10. Коротченко И.С. Воздействие автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // Успехи современ. естествознания. 2014. № 11-2. С. 109–110.

Korotchenko I.S. Influence of Motor Vehicles on the Pigment Complex of Woody Plants Leaves. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2014, no. 11-2, pp. 109–110. (In Russ.).

11. Коршиков И.И. Устойчивость растений к техногенным загрязнителям окружающей среды // Промышленная ботаника. 2004. Вып. 4. С. 46–57.

Korshikov I.I. Plant Resistance to Technogenic Environmental Pollutants. *Promyshlennaya botanika* = Industrial Botany, 2004, no. 4, pp. 46–57. (In Russ.).

12. Мальхотра С.С., Хан А.А. Биохимическое и физиологическое действие приоритетных загрязняющих веществ // Загрязнение воздуха и жизнь растений / М. Трешоу, Д.Г. Жиллет, Э. Робинсон и др.; под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 141–190.

Malkhotra S.S., Khan A.A. Biochemical and Physiological Impact of Major Pollutants. *Air Pollution and Plant Life*. Ed. by M. Treshou. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, pp. 141–190. (In Russ.).

13. Маракеев О.А., Смирнова Н.С., Загоскина Н.В. Техногенный стресс и его влияние на листовые древесные растения (на примере парков г. Ярославля) // Экология. 2006. № 6. С. 410–414.

Marakayev O.A., Smirnova N.S., Zagoskina N.V. Technogenic Stress and Its Effect on Deciduous Trees (A Case Study of Parks in Yaroslavl). *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2006, no. 6, pp. 410–414. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1067413606060026>

14. Неверова О.А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (на примере г. Кемерово): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2004. 36 с.

Neverova O.A. *Ecological Assessment of the State of Woody Plants and Environmental Pollution of an Industrial City* (A Case Study of Kemerovo): Dr. Biol. Sci. Diss. Moscow, 2004. 36 p. (In Russ.).

15. Неверова О.А. Опыт мониторинга городских древесных насаждений (на примере г. Кемерово) // Урбоэкоисотемы: Проблемы и перспективы развития: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Ишим, 20–21 марта 2008 г. Ишим: ИГПИ им. П.П. Ершова, 2008. Вып. 3. С. 125–128.

Neverova O.A. Experience in Monitoring Urban Tree Stands (A Case Study of Kemerovo). *Urban Ecosystems: Problems and Prospects for Development. Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Ishim, March 20–21, 2008*. Ishim, Ishim State Pedagogical Institute named after P.P. Ershov Publ., 2008, no. 3, pp. 125–128. (In Russ.).

16. Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. 2009. Т. 1, № 1. С. 82–92.

Neverova O.A. Phytoindication in Assessing of Environmental Pollution. *Biosfera*, 2009, vol. 1, no.1, pp. 82–92. (In Russ.).

17. Негруцкий С.Ф., Приседский Ю.Г., Еремка Е.В. Некоторые закономерности сравнительной устойчивости лесных древесных растений к атмосферным загрязнителям //

Взаимодействие между лесными экосистемами и загрязнителями: тез. докл. 1-го совет.-амер. симп. по проекту 02.03-21, Ленинград, Таллин, Пушкино, 11–20 окт. 1982 г. Таллин: АН ЭССР, 1982. С. 58–60.

Negrutskiy S.F., Prisedskiy Yu.G. Several Patterns of Relative Tolerance of Forest Woody Plants to Atmospheric Pollutants. *Interaction Between Forest Ecosystems and Atmospheric Pollutants: Proceedings of the 1st Soviet-American Symposium on project 02.03-21. Leningrad, Tallinn, Pushchino, October 11–20, 1982.* Tallinn, Akademiya nauk E`stonskoj SSR Publ., 1982, pp. 58–60. (In Russ.).

18. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1979. 278 с.

Nikolayevskiy V.S. *Biological Principles of Gas Resistivity for Plants.* Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 278 p. (In Russ.).

19. Павлов И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2006. 359 с.

Pavlov I.N. *Woody Plants Under Conditions of Technogenic Pollution.* Ulan-Ude, BNC SB RAS Publ., 2006. 359 p. (In Russ.).

20. Скрипальщикова Л.Н., Пономарева Т.В., Бажина Е.В., Барченков А.П., Белянин А.В. Техногенные нагрузки на березняки Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 130–135.

Skripalshchikova L.N., Ponomareva T.V., Bazhina E.V., Barchenkov A.P., Belyanin A.V. Technogenic Loads on Birch Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 130–135. (In Russ.).

21. Тарчевский И.А. Основы фотосинтеза. Казань: Казан. ун-т, 1971. 294 с.

Tarchevskiy I.A. *Principles of Photosynthesis.* Kazan, Izdatel'stvo of Kazan Federal University Publ., 1971. 294 p. (In Russ.).

22. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.

Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Heavy Metals and Plants.* Petrozavodsk, Kar-RC RAS Publ., 2014. 194 p. (In Russ.).

23. Хальбваш Г. Реакция организмов высших растений на загрязнение атмосферы двуокисью серы и фторидами // Загрязнение воздуха и жизнь растений / М. Трешоу, Д.Г. Жиллет, Э. Робинсон и др.; под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 206–246.

Khalbvash G. Reaction of Higher Plants Bodies to Atmospheric Pollution by Sulfur Dioxide and Fluorides. *Air Pollution and Plant Life.* Ed. by M. Treshou. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, pp. 206–246. (In Russ.).

24. Цандекова О.Л., Неверова О.А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // Изв. СамНЦ РАН. 2010. Т. 12, № 1(3). С. 853–856.

Tsandekova O.L., Neverova O.A. Influence of Motor Transport Emissions on the Woody Plants Leaves Pigmentary Complex. *Izvestia of SamSC RAS*, 2010, vol. 12, no. 1(3), pp. 853–856. (In Russ.).

25. Шергина О.В., Михайлова Т.А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2007. 200 с.

Shergina O.V., Mikhaylova T.A. *The State of Woody Plants and Soil Cover of Public Parks and Forest Park Areas of Irkutsk.* Irkutsk, Izdatel'stvo of IG SB RAS Publ., 2007. 200 p. (In Russ.).

26. Яшин Д.А., Зайцев Г.А. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях Уфимского промышленного центра // Изв. СамНЦ РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 274–277.

Yashin D.A., Zaytsev G.A. The Maintenance of Photosynthesis Pigments in Leaves of European White Birch (*Betula pendula* Roth.) and English Oak (*Quercus robur* L.) in the Conditions of Ufa Industrial Center. *Izvestia of SamSC RAS*, 2015, vol. 17, no. 6, pp. 274–277. (In Russ.).

27. Bojórquez-Quintal E., Escalante-Magaña C., Echevarría-Machado I., Martínez-Estévez M. Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>

28. Castillo-González J., Ojeda-Barrios D., Hernández-Rodríguez A., González-Franco A.C., Robles-Hernández L., López-Ochoa G.R. Zinc Metalloenzymes in Plants. *Interciencia*, 2018, vol. 43, pp. 242–248.

29. Escudero-Almanza D.J., Ojeda-Barrios D.L., Hernández-Rodríguez O.A., Chávez E.S., Ruíz-Anchondo T., Sida-Arreola J.P. Carbonic Anhydrase and Zinc in Plant Physiology. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2012, vol. 72, no. 1, pp. 140–146. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392012000100022>

30. Golovko T.K., Gruszecki W.I., Prasad M.N.V., Strzalka K. *Photosynthetic Pigments: Chemical Structure, Biological Function and Ecology*. Syktyvkar, Komi SC UB RAS Publ., 2014. 448 p.

31. Lichtenthaler H.K., Ac A., Marek M.V., Kalina J., Urban O. Differences in Pigment Composition, Photosynthetic Rates and Chlorophyll Fluorescence Images of Sun and Shade Leaves of Four Tree Species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, vol. 45, no. 8, pp. 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.04.006>

32. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. F4.3.1.–F4.3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>

33. Ma J.F. Syndrome of Aluminum Toxicity and Diversity of Aluminum Resistance in Higher Plants. *International Review of Cytology*, 2007, vol. 264, pp. 225–252. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(07\)64005-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(07)64005-4)

34. Mossor-Pietraszewska T. Effect of Aluminium on Plant Growth and Metabolism. *Acta Biochimica Polonica*, 2001, vol. 48, no. 3, pp. 673–686. [https://doi.org/10.18388/abp.2001\\_3902](https://doi.org/10.18388/abp.2001_3902)

35. Rout G.R., Das P. Effect of Metal Toxicity on Plant Growth and Metabolism: I. Zinc. *Agronomie*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 3–11. <https://doi.org/10.1051/agro:2002073>

36. Rout G.R., Samantaray S., Das P. Aluminium Toxicity in Plants: A Review. *Agronomie*, 2001, vol. 21, no. 1, pp. 3–21. <https://doi.org/10.1051/agro:2001105>

37. Sharma P., Dubey R.S. Lead Toxicity in Plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 35–52. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>

38. Silva S. Aluminium Toxicity Targets in Plants. *Journal of Botany*, 2012, vol. 2012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2012/219462>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest