

Научная статья

УДК 574.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-103-120

## Характеристика пигментного комплекса листьев *Betula pendula* Roth. при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона

**Р.Р. Галимов, аспирант;** ResearcherID: [КИН-6235-2024](https://orcid.org/0009-0002-1472-1469),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1472-1469>

**Р.В. Уразгильдин**<sup>✉</sup>, **д-р биол. наук, доц.;** ResearcherID: [К-9714-2018](https://orcid.org/0000-0003-2071-9306),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2071-9306>

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, просп. Октября, д. 69, г. Уфа, Россия, 450054; [ramil\\_galimov\\_98@mail.ru](mailto:ramil_galimov_98@mail.ru), [urv@anrb.ru](mailto:urv@anrb.ru)<sup>✉</sup>

---

Поступила в редакцию 01.11.24 / Одобрена после рецензирования 29.01.25 / Принята к печати 31.01.25

---

**Аннотация.** Представлены результаты исследования пигментного комплекса листьев березы повислой при произрастании в условиях различных типов промышленного загрязнения Южно-Уральского региона: Стерлитамакский промышленный центр (аэротехногенное полиметаллическое загрязнение), Карабашский медеплавильный комбинат (аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом), Учалинский горно-обогатительный комбинат (полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности), Кумертауский бурогольный разрез (полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород бурогольного разреза), Уфимский промышленный центр (аэротехногенное нефтехимическое загрязнение). Показан дисбаланс пигментного комплекса листьев березы для всех исследованных типов загрязнения, который выражается в отсутствии согласованности между адаптивными реакциями пигментов и их соотношений. Четко выделить общую адаптивную реакцию для всего пигментного комплекса в каждом промышленном центре не представляется возможным. С некоторой долей условности можно отметить, что при полиметаллическом загрязнении в сочетании с сернистым ангидридом пигментный комплекс характеризуется преимущественно толерантной адаптивной реакцией, в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности – стрессовой, в условиях отвалов вскрышных пород бурогольной горнорудной промышленности – нейтральной, а при нефтехимическом и аэротехногенном полиметаллическом загрязнении преобладающая реакция отсутствует. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промышленные центры образуют ряд по возрастанию: Кумертауский бурогольный разрез – Учалинский горно-обогатительный комбинат – Карабашский медеплавильный комбинат – Стерлитамакский промышленный центр – Уфимский промышленный центр. Соотношение хлорофилла *a* и *b* определяет устойчивый баланс между хлорофиллами во всех типах загрязнения, но выделяет нефтехимическое загрязнение как более значимый стрессовый фактор. Соотношение хлорофилла *a + b* и каротиноидов показывает отсутствие стабильности во всех типах загрязнения и выделяет аэротехногенное полиметаллическое, нефтехимическое и полиметаллическое загрязнения в условиях медно-колчеданных отвалов как более значимые стрессовые факторы. Разработка рекомендаций по применению березы для защитных насаждений должна быть основана на комплексной

оценке ее адаптивных реакций на различных иерархических уровнях. Это позволит целенаправленно использовать березу в условиях, где она толерантна к загрязнению и обладает высоким адаптивным потенциалом, и исключить ее применение в посадках в стрессовых условиях, где ее приспособительные возможности ограничены.

**Ключевые слова:** береза повислая, пигментный комплекс листьев, адаптивные реакции, промышленное загрязнение, Южно-Уральский регион

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания № 075-00570-24-01 по теме № 123020700152-5 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов». Использована приборная база Центра коллективного пользования «Агидель».

**Для цитирования:** Галимов Р.Р., Уразгильдин Р.В. Характеристика пигментного комплекса листьев *Betula pendula* Roth. при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 103–120.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-103-120>

Original article

## Characteristics of the Pigment Complex of *Betula pendula* Roth. Leaves in Different Types of Pollution in the South Ural Region

**Ramil R. Galimov**, Postgraduate Student; ResearcherID: [KIH-6235-2024](https://orcid.org/0009-0002-1472-1469),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1472-1469>

**Ruslan V. Urazgildin**<sup>✉</sup>, Doctor of Biological Science, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [K-9714-2018](https://orcid.org/0000-0003-2071-9306), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2071-9306>

Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, prosp. Oktyabrya, 69, Ufa, 450054, Russian Federation;

[ramil\\_galimov\\_98@mail.ru](mailto:ramil_galimov_98@mail.ru), [urv@anrb.ru](mailto:urv@anrb.ru)<sup>✉</sup>

---

Received on November 1, 2024 / Approved after reviewing on January 29, 2025 / Accepted on January 31, 2025

---

**Abstract.** The article presents the results of a study of the pigment complex of silver birch leaves growing under conditions of various types of industrial pollution in the South Ural Region. Those are Sterlitamak Industrial Centre (aerotechnogenic polymetallic pollution), Karabash Copper Smelting Plant (aerotechnogenic polymetallic pollution in combination with sulfur dioxide), Uchaly Mining and Processing Plant (polymetallic pollution in the conditions of overburden rock dumps of the copper-pyrite mining industry), Kumertau Brown Coal Mine (polymetallic pollution in the conditions of overburden rock dumps of the brown coal mine), Ufa Industrial Centre (aerotechnogenic petrochemical pollution). An imbalance in the pigment complex of birch leaves is shown for all the types of pollution studied, which is expressed in the lack of consistency between the adaptive responses of pigments and their ratios. It is not possible to clearly identify the overall adaptive response for the entire pigment complex in each industrial centre. With a certain degree of conventionality, it can be noted that in the case of polymetallic pollution in combination with sulfur dioxide, the pigment complex is characterized by a predominantly tolerant adaptive reaction, in the conditions of overburden rock dumps of the copper-pyrite mining industry – a stressful one, in the conditions of overburden rock dumps of the brown coal mining industry – a neutral one, and in the case of petrochemical and aerotechnogenic polymetallic pollution, there is no predominant reaction. According to the degree of increasing imbalance in the pigment complex, the indus-

trial centres form a series in an ascending order: Kumertau Brown Coal Mine – Uchaly Mining and Processing Plant – Karabash Copper Smelting Plant – Sterlitamak Industrial Centre – Ufa Industrial Centre. The ratio of chlorophyll *a* and *b* determines a stable balance between chlorophylls in all types of pollution, but highlights petrochemical pollution as a more significant stress factor. The ratio of chlorophyll *a* + *b* and carotenoids shows a lack of stability in all types of pollution and highlights aerotechnogenic polymetallic, petrochemical and polymetallic pollution in the conditions of copper-pyrite dumps as more significant stress factors. The development of recommendations for the use of birch for protective plantations should be based on a comprehensive assessment of its adaptive responses at various hierarchical levels. This will make possible the targeted use of birch in conditions where it is tolerant to pollution and has a high adaptive potential, and will exclude its use in plantations in stressful conditions where its adaptive capabilities are limited.

**Keywords:** silver birch, pigment complex of leaves, adaptive reactions, industrial pollution, South Ural Region

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment no. 075-00570-24-01 on the topic no. 123020700152-5 “Sustainability of Forest-Forming Tree Species and Ecological and Biological Adaptation, Taking into Account the Anthropogenic Transformation of Landscape and Natural Complexes”. The work used the instrument base of the “Agidel” Collective Use Centre.

**For citation:** Galimov R.R., Urazgildin R.V. Characteristics of the Pigment Complex of *Betula pendula* Roth. Leaves in Different Types of Pollution in the South Ural Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 103–120. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-103-120>

### Введение

Южно-Уральский регион является районом расположения большого количества промышленных центров со значительным количеством загрязнителей в составе выбросов. Постоянный рост числа техногенных загрязнителей оказывает противоречивое влияние на растительные организмы, в т. ч. и на пигментный комплекс древесных растений – биофильтров, растущих вблизи предприятий. Роль листьев древесных растений не ограничивается осаждением промышленной пыли, они также поглощают токсиканты и включают их в собственный метаболизм. Данное обстоятельство существенно затрагивает фотосинтез как наиболее уязвимый к внешним воздействиям физиологический процесс. В связи с этим анализ адаптивных реакций пигментного комплекса представляет ценность для прогнозирования продуктивности древесных видов и оценки целесообразности их использования в качестве буферных насаждений [28].

Основным пигментом, преобразующим световую энергию в химическую, является хлорофилл, ведущая роль при этом принадлежит хлорофиллу *a*. Вспомогательный пигмент хлорофилл *b* передает энергию на хлорофилл *a*, компенсируя недостаточное освещение, а каротиноиды поглощают свет в синей спектральной области и защищают пигментную систему от фотоокисления [11, 12, 30, 32, 34]. Под воздействием промышленных загрязнителей в пигментном аппарате растений происходят нарушения: набухание хлоропластов, дезорганизация их мембранной системы, снижение синтеза и активности хлорофилла. Фотосинтез также ингибируется из-за увеличения синтеза абсцизовой кислоты [3, 4, 6, 16]. Механизм действия поллютантов зависит от многих факторов, но, несмотря на различную чувствительность видов к ним, общей реакцией являет-

ся разрушение пигментов, что позволяет использовать соотношения хлорофилла  $a$  и  $b$  и хлорофилла  $a + b$  и каротиноидов в качестве маркеров загрязнения и толерантности к нему растений [7, 8, 21].

Анализ публикаций последних 20 лет выявляет существенные пробелы в изучении пигментного комплекса древесных растений в условиях техногенеза. Исследования на отвалах горнорудной промышленности крайне малочисленны, причем в них констатируется подавление содержания пигментов [25]. В то же время влияние промышленных предприятий и автотранспорта освещено широко, при этом в научной литературе сложилось 2 противоположных направления в интерпретации данных: одни авторы указывают на негативное воздействие загрязнения [1, 2, 8, 14, 18, 26, 31, 33, 36–38], другие – на положительное [13, 19, 21, 29, 39]. В редких случаях признается отсутствие строгих закономерностей [35]. Почти в каждой работе, наряду с декларируемыми стрессовыми реакциями, описаны толерантные, и наоборот. Несмотря на то, что все авторы сходятся во мнении об адаптивной природе выявленных реакций, их качественная оценка (направленность адаптации) остается нераскрытой. Кроме того, отсутствуют сравнительные исследования для одного вида по стандартной методике в условиях разных типов загрязнения. Восполнение этих пробелов определяет актуальность и новизну нашего исследования.

Настоящая работа направлена на сравнительный анализ воздействия разных видов аэротехногенного загрязнения и отвалов горнорудной промышленности в Южно-Уральском регионе на пигментный аппарат листьев березы повислой с последующей качественной оценкой адаптивных реакций. Задачи: выбрать промышленные центры с контрастными типами загрязнения, а также древостои березы повислой со сходными таксационными характеристиками в зонах загрязнения и на контрольных участках; собрать материал, выполнить его лабораторный анализ, статистическую обработку и интерпретацию полученных данных.

#### *Объекты и методы исследования*

В Южно-Уральском регионе в качестве полигонов для исследования выбраны 5 промышленных центров, характеризующихся разными типами загрязнения [9, 17]: Стерлитамакский промышленный центр (СПЦ) – аэротехногенное полиметаллическое загрязнение; Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) – аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом; Учалинский горно-обогатительный комбинат (УГОК) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности; Кумертауский бурогольный разрез (КБР) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород бурогольного разреза; Уфимский промышленный центр (УПЦ) – аэротехногенное нефтехимическое загрязнение. В каждом промышленном центре в зависимости от розы ветров подобраны древостои в импактной зоне и в контроле (рис. 1).

В качестве объекта исследования выступила береза повислая (*Betula pendula* Roth.) – пионерный лесобразующий вид Предуралья, отличающийся быстрым ростом и высокой экологической пластичностью, что обусловило ее распространение во всех изучаемых промышленных центрах [20, 24]. Согласно

нашим данным (табл. 1), таксационные показатели древостоев в зонах загрязнения и на контрольных участках СПЦ, КМК и УПЦ являются сопоставимыми, что подтверждает правильность подбора участков. В свою очередь, различия, отмеченные для УГОК и КБР, связаны с возрастной неоднородностью: древостои на отвалах сформировались в конце XX в. после завершения отсыпки отвалов, тогда как контрольные участки представлены более старыми посадками. В связи с этим для контроля были выбраны наиболее молодые доступные насаждения. Важно отметить, что во всех промцентрах запас древостоев в условиях загрязнения примерно на  $100 \text{ м}^3/\text{га}$  ниже контрольных значений, что свидетельствует об осязаемом снижении их продуктивности в импактной зоне.

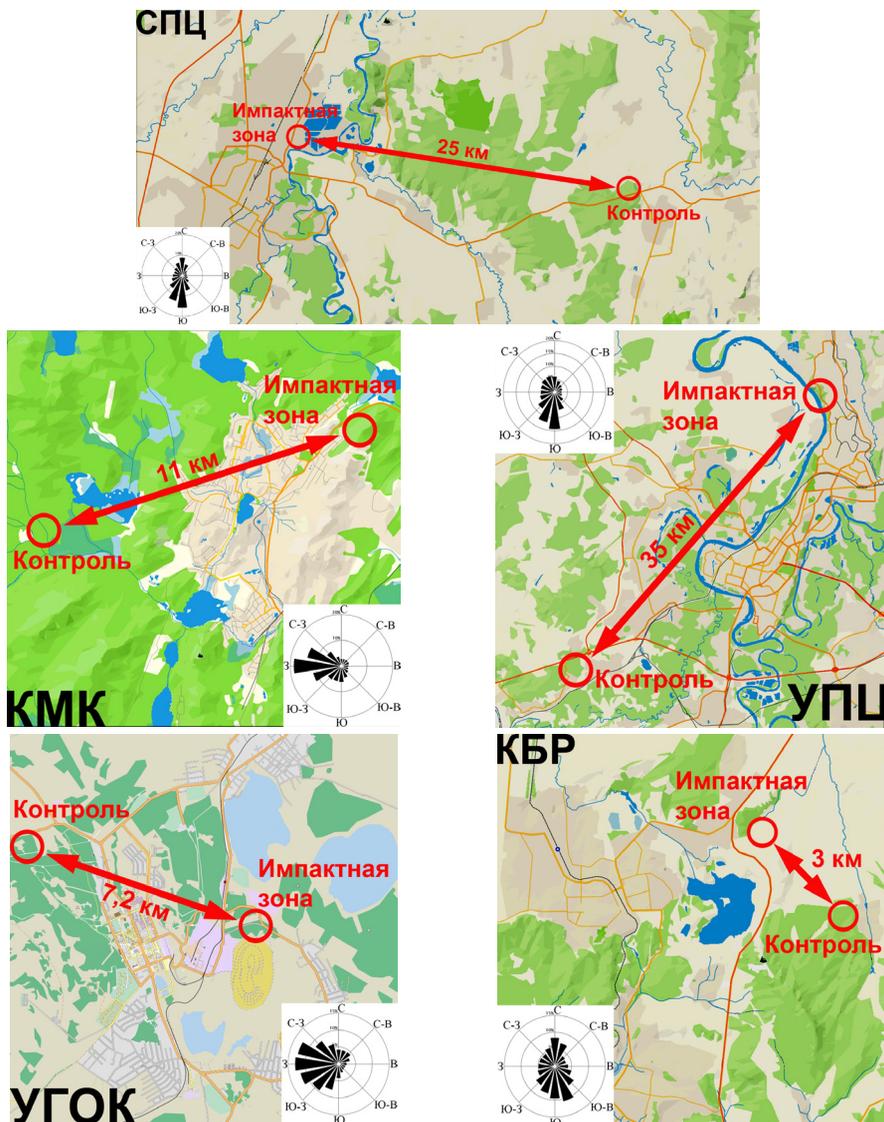


Рис. 1. Схема промышленных центров Южно-Уральского региона с выделением пробных площадей в импактной зоне и в контроле с учетом годовой розы ветров (<https://ru.meteocast.in>) [5]

Fig. 1. The map of industrial centres of the South Ural Region with the allocation of sample plots in the impact and control zone, taking into account the annual wind rose (<https://ru.meteocast.in>) [5]

Таблица 1

## Краткая таксационная характеристика древостоев [5]

## The brief inventory characteristics of the stands [5]

Промышлен- ный центр	Местопо- ложение древостоя	Состав древостоя	Среднее			Полно- та	Запас, м³/га
			возраст, лет	диаметр, см	высо- та, м		
СПЦ	Промзона	9Б1ТЧ	30	27	26	0,6	312,32
	Контроль	9Б1Д+ОС	26	27	26	0,6	408,56
КМК	Промзона	10Б	70	23	24	0,6	377,22
	Контроль		65	21	30	0,8	491,12
УГОК	Промзона	5Б5С	30	12	14	0,6	327,30
	Контроль	10Б	50	31	32	0,6	341,00
КБР	Промзона	7С3Б	20	15	18	0,8	187,04
	Контроль	10Б	40	33	30	0,7	627,48
УПЦ	Промзона		36	36	30	0,8	495,00
	Контроль	5ЛП5Б+В+Д	40	28	27	0,6	582,04

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) определяли спектрофотометрическим методом [15, 27]. Отбор листьев 1-й генерации проводили в конце июля с 11:00 до 12:00, что соответствует пиковой концентрации пигментов. Пробы отбирали в полевых условиях с нижней части кроны 10 модельных деревьев, имеющих средние таксационные показатели. С каждого дерева брали по 1 конечному листу с побега текущего года. Для приготовления объединенной пробы из центральной части всех собранных листьев делали высеки, которые затем измельчали и смешивали с последующим получением 10 навесок массой по 0,1 г каждая с использованием высокоточных электронных весов Diamond (точность – ±0,001 г). Каждую навеску заливали 10 мл 96 % этанола и экстрагировали в условиях полного затемнения в течение 12 ч для предотвращения фоторазложения пигментов. Измерения оптической плотности выполняли на спектрофотометре КФК-5М (Россия). Содержание пигментов в листьях рассчитывали в 2 этапа по формулам:

I этап – установление концентрации пигментов листьев в спиртовом растворе (мг/л):

$$C_{\text{хл}a} = 13,7D_{665} - 5,76D_{649};$$

$$C_{\text{хл}b} = 25,8D_{649} - 7,6D_{665};$$

$$C_{\text{кар}} = 4,6957D_{440,5} - 0,268(C_{\text{хл}a} + C_{\text{хл}b}),$$

где  $C_{\text{хл}a}$ ,  $C_{\text{хл}b}$ ,  $C_{\text{кар}}$  – концентрация хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов;  $D_{665}$ ,  $D_{649}$  и  $D_{440,5}$  – оптическая плотность спиртового раствора при соответствующих длинах волн (665, 649 и 440,5 нм).

II этап – нахождение количества пигментов в листьях (мг/г сырой массы):

$$A = \frac{VC}{1000P},$$

где  $V$  – объем спиртовой вытяжки (10 мл);  $C$  – концентрация пигментов в спиртовом растворе (мг/л);  $P$  – навеска растительного материала (0,1 г).

На основе полученных количественных данных были рассчитаны интегральные показатели: соотношения хлорофиллов *a* и *b* и суммы хлорофиллов

*a* и *b* к каротиноидам. Статистическая значимость различий между опытными и контрольными группами оценивалась с помощью *t*-критерия Стьюдента. Классификация адаптивных реакций пигментного комплекса проводилась согласно методике Р.В. Уразгильдина [22]. В соответствии с данным подходом, к стрессовым реакциям относят: снижение содержания хлорофиллов *a* и *b*, компенсаторный рост уровня каротиноидов, а также уменьшение соотношений хлорофилла *a* и *b* и хлорофиллов *a + b* и каротиноидов, что отражает компенсаторный рост долей вспомогательных пигментов. Статистически достоверные и выраженные реакции такого характера идентифицированы как стрессовые, противоположные им – как толерантные. Незначительные или статистически недостоверные изменения относили к умеренно-стрессовым и умеренно-толерантным реакциям соответственно, а отсутствие изменений – к нейтральным. Статистическая обработка данных выполнена стандартными для биологических исследований методами с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2010 и Statistica 6.0.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны изменения в содержании пигментов в листьях березы на импактных и контрольных участках для различных типов промышленного загрязнения Южно-Уральского региона.

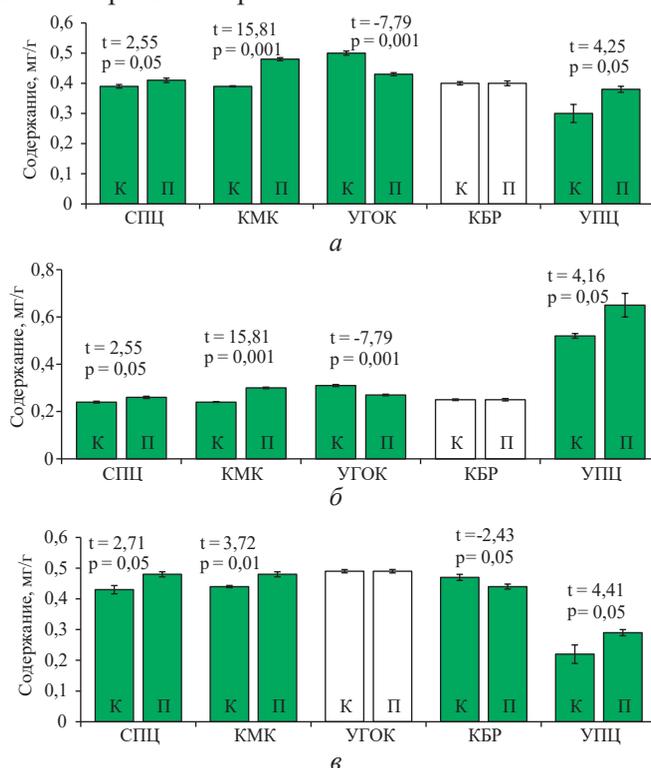


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* (а), хлорофилла *b* (б) и каротиноидов (в) в условиях контроля и промышленных центров (К – контроль; П – промышленный центр; ■■, □□ – различия по критерию Стьюдента достоверны и недостоверны соответственно; *t* – критерий Стьюдента, *p* – уровень значимости)

Fig. 2. The contents of chlorophyll *a* (а), chlorophyll *b* (б) and carotenoids (в) under control and industrial centre conditions (К – control; П – industrial centre; ■■, □□ – significant and insignificant differences according to the Student's *t*-test, respectively; *t* – Student's *t*-test; *p* – level of significance)

Анализ динамики хлорофиллов выявил синхронный характер изменений содержания хлорофиллов  $a$  и  $b$  во всех исследуемых промцентрах: статистически достоверное увеличение концентраций обоих пигментов отмечено в условиях КМК (на 0,09 и 0,06 мг/г соответственно) и УПЦ (на 0,08 и 0,13 мг/г соответственно). В СПЦ зафиксирован незначительный, но достоверный прирост (на 0,02 мг/г для каждого пигмента). Противоположная тенденция наблюдалась на участке УГОК, где содержание хлорофиллов достоверно снизилось (на 0,07 и 0,04 мг/г соответственно), тогда как для КБР различий с контролем не выявлено. Реакция каротиноидов имела иную направленность. Их содержание достоверно возросло в зоне влияния СПЦ (на 0,05 мг/г), КМК (на 0,04 мг/г) и УПЦ (на 0,07 мг/г). В КБР, напротив, зафиксировано значительное уменьшение уровня каротиноидов (на 0,03 мг/г), а на участке УГОК различия с контролем не выявлены.

Соотношение пигментов характеризуется следующими закономерностями (табл. 2).

Таблица 2

**Соотношение пигментов в листьях березы повислой  
в условиях различных типов загрязнения  
The ratio of pigments in the leaves of silver birch under conditions  
of different types of pollution**

Промышленный центр	Хлорофилл $a/b$		Хлорофилл $a + b$ / каротиноиды	
	контроль	промзона	контроль	промзона
СПЦ	1,6±0	1,6±0	1,5±0,03	1,4±0,04
КМК	1,6±0	1,6±0	<b>1,4±0,01</b>	<b>1,6±0,04</b>
УГОК	1,6±0	1,6±0	<b>1,7±0,04</b>	<b>1,4±0,02</b>
КБР	1,6±0	1,6±0	1,4±0,03	1,5±0,06
УПЦ	0,6±0	0,6±0	<b>4,7±0,02</b>	<b>4,3±0,04</b>

Примечание: Жирным шрифтом выделены достоверные различия между контролем и промзоной.

Стабильность соотношения хлорофиллов  $a$  и  $b$  во всех промышленных центрах относительно контроля указывает на устойчивость хлорофиллового комплекса и тесную функциональную связь между пигментами. Однако выявлена специфика для разных типов загрязнения: в УПЦ зафиксировано преобладание хлорофилла  $b$  над хлорофиллом  $a$ , тогда как в остальных промцентрах наблюдается обратная ситуация. Это позволяет заключить, что полиметаллическое аэротехногенное загрязнение и условия отвалов вскрышных пород не угнетают синтез хлорофилла  $a$ , в отличие от нефтехимического загрязнения, которое стимулирует компенсаторное увеличение доли хлорофилла  $b$ . Динамика соотношения хлорофилл ( $a + b$ ) / каротиноиды не имеет однозначной тенденции: показатель возрастает на участках КМК (значительно) и КБР (незначительно), но снижается для СПЦ (незначительно), УГОК и УПЦ (значительно). Падение данного индекса в условиях нефтехимического загрязнения и медно-колчеданных отвалов свидетельствует о стрессовом воздействии, выражающемся в уменьшении доли хлорофиллов на фоне компенсаторного роста каротиноидов. Напротив, в бурогольных отвалах и при полиметаллическом загрязнении с примесью сернистого ангидрида доля хлорофиллового комплекса увеличивается. Сравнение промцентров показывает, что для УПЦ доля хло-

рофиллов в 3 раза превышает показатели для других типов загрязнения, это обусловлено высоким содержанием хлорофилла  $b$  и низким – каротиноидов у деревьев на территории УПЦ.

На основании полученных данных проведена классификация адаптивных реакций пигментного комплекса березы повислой в условиях различных типов загрязнения Южного Урала (табл. 3). Степень реализации адаптивного потенциала вида проявляется в специфических сочетаниях адаптивных реакций:

СПЦ: комплекс адаптивных реакций характеризуется умеренно-толерантными (увеличение хлорофиллов  $a$  и  $b$ ) стрессовой (рост каротиноидов), умеренно-стрессовой (снижение соотношения хлорофилл  $a + b$  / каротиноиды) и нейтральной (стабильность соотношения хлорофиллов) реакциями;

КМК: наблюдается выраженная преимущественно толерантная адаптивная реакция (значительный рост хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и соотношения хлорофилл  $a + b$  / каротиноиды), притом что повышение уровня каротиноидов указывает на стрессовую, а стабильность соотношения хлорофиллов – на нейтральную реакции;

УГОК: преобладает стрессовая адаптивная реакция (снижение количества хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и их соотношения с каротиноидами) при нейтральных реакциях каротиноидов и соотношения хлорофиллов;

КБР: доминируют нейтральные адаптивные реакции (стабильность хлорофиллов и их соотношения) при наличии толерантной (снижение содержания каротиноидов) и умеренно-толерантной (увеличение соотношения хлорофилл  $a + b$  / каротиноиды) реакций;

УПЦ: отмечается смешанный ответ – толерантные адаптивные реакции хлорофиллов  $a$  и  $b$  сочетаются со стрессовыми реакциями каротиноидов и соотношения пигментов с каротиноидами при нейтральной реакции соотношения хлорофиллов.

Таблица 3

**Адаптивные реакции пигментного комплекса листьев березы повислой  
в условиях различных типов загрязнения  
The adaptive reactions of the pigment complex of silver birch leaves  
under conditions of different types of pollution**

Промышленный центр	Хлорофилл		Каротиноиды	Хлорофилл $a/b$	Хлорофилл $a + b$ / каротиноиды
	$a$	$b$			
СПЦ	↑ УТ	↑ УТ	↑↑ С	(-) Н	↓ УС
КМК	↑↑ Т	↑↑ Т	↑↑ С	(-) Н	↑↑ Т
УГОК	↓↓ С	↓↓ С	(-) Н	(-) Н	↓↓ С
КБР	(-) Н	(-) Н	↓↓ Т	(-) Н	↑ УТ
УПЦ	↑↑ Т	↑↑ Т	↑↑ С	(-) Н	↓↓ С

Примечание: Реакции пигментов и соотношений: С – стрессовая; УС – умеренно-стрессовая; Н – нейтральная; УТ – умеренно-толерантная; Т – толерантная. Изменение содержания пигментов и их соотношений в промцентрах относительно контроля: ↑↑ – значительное и достоверное увеличение; ↑ – незначительное или недостоверное увеличение; (-) – изменения отсутствуют; ↓ – незначительное или недостоверное уменьшение; ↓↓ – значительное и достоверное уменьшение.

Проведенный анализ выявил нарушение сбалансированности пигментного комплекса листьев березы во всех исследованных промышленных центрах,

что проявляется в отсутствии единой направленности адаптивных реакций отдельных пигментов и их соотношений. Вследствие этого идентифицировать доминирующий тип адаптивной реакции для пигментного комплекса не представляется возможным. Тем не менее с определенной долей условности можно констатировать, что в условиях КМК реакции носят преимущественно толерантный характер, в УГОК – стрессовый, а в КБР пигментный комплекс демонстрирует в целом нейтральную реакцию на загрязнение. В УПЦ наблюдается равное превалирование толерантных и стрессовых адаптивных реакций, тогда как в СПЦ 4 адаптивные реакции проявляются относительно независимо. То есть выделить преобладающий тип адаптивной реакции для каждого из промцентров также нельзя. Однако одновременное наличие специфических и неспецифических реакций указывает на гибкость реакции пигментного комплекса березы на стрессовые факторы. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промцентры образуют ряд по возрастанию: КБР – УГОК – КМК – СПЦ – УПЦ.

Сравнительный анализ показал, что соотношение хлорофиллов *a* и *b* сохраняет стабильность как в фоновых условиях, так и под воздействием загрязнения. При этом в УПЦ наблюдается преобладание хлорофилла *b* над хлорофиллом *a*, тогда как в остальных промцентрах доминирует хлорофилл *a*. Эта особенность позволяет рассматривать нефтехимическое загрязнение как наиболее стрессовый фактор среди остальных. В отличие от стабильного соотношения хлорофиллов, баланс между хлорофиллами и каротиноидами нарушается во всех промышленных центрах. На участках СПЦ, УГОК и УПЦ зафиксировано снижение доли хлорофиллов при одновременном росте количества каротиноидов, тогда как для КМК и КБР отмечена противоположная динамика. Такая реакция указывает на повышенную стрессовую нагрузку для растений при аэротехногенном полиметаллическом, нефтехимическом загрязнении и в условиях медно-колчеданных отвалов.

Анализ публикаций последних лет свидетельствует о том, что, несмотря на обширный материал по реакциям пигментного комплекса древесных, травянистых и кустарниковых растений на промышленное загрязнение, отсутствует качественная оценка выявленных адаптивных реакций. В связи с этим для сопоставления с собственными результатами авторами были проанализированы не только выводы, но и первичные данные (таблицы, графики) из рассматриваемых работ. Такой подход обусловил в некоторых случаях расширенную интерпретацию литературных данных по сравнению с первоисточниками. Этот анализ позволяет выделить 2 положения: существенный пробел в исследованиях пигментного комплекса растений на отвалах горнорудной промышленности; поляризацию мнений относительно влияния техногенеза на пигментный комплекс растений.

Единичные работы, такие как исследование породного отвала «Южный» Кедровского угольного разреза, демонстрируют значительное угнетение синтеза хлорофиллов у березы повислой при менее выраженном снижении уровня каротиноидов. Авторы рассматривают специфическое соотношение пигментов (3-кратное преобладание хлорофилла *a* над хлорофиллом *b* и 2-кратное – суммы хлорофиллов над каротиноидами) как признак толерантной адаптации [25]. Полученные нами результаты лишь частично согласуются с этими данными. Сходство наблюдается лишь в подавлении хлорофиллов в УГОК и каротиноид-

дов в КБР, что, вероятно, обусловлено принципиальными различиями в составе почвогрунтов (аргиллиты, алевролиты и песчаники на отвале «Южный» против геохимических условий исследованных нами промцентров). Частичную аналогию можно провести с результатами изучения загрязнения р. Митхи (Мумбаи, Индия), где виды растений классифицированы на индикаторные (снижение пигментов), толерантные (их увеличение) и без четкой тенденции [34]. Согласно этой системе, береза в УГОК может быть отнесена к индикаторам, а в КБР – к видам с неоднозначной реакцией. Однако данная классификация не учитывает разнонаправленности реакций хлорофиллов и каротиноидов, что является ключевым в нашей работе.

Значительная часть исследований фиксирует негативные последствия. Например, в условиях г. Арзамаса отмечено подавление хлорофиллов, особенно хлорофилла *a*, у липы, тополя и ивы на фоне роста доли каротиноидов [38]. Аналогично вследствие загрязнения в Иркутско-Черемховской промышленной зоне снижается содержание всех пигментов в хвое сосны, хотя соотношения пигментов и суммы пигментов к каротиноидам возрастают [33]. В Ярославле повышение концентрации поллютантов коррелирует с уменьшением количества хлорофиллов и ростом каротиноидов у березы, липы и тополя [14].

Исследования в зоне влияния УПЦ демонстрируют видоспецифичность реакций пигментного аппарата древесных растений на нефтехимическое загрязнение. У березы повислой в фазе активной вегетации отмечен рост концентрации всех фотосинтетических пигментов. У липы мелколистной зафиксировано увеличение содержания хлорофилла *a* при одновременном снижении хлорофилла *b* и каротиноидов. У дуба черешчатого наблюдалось уменьшение количества хлорофиллов на фоне возрастания долевого участия каротиноидов. Соотношение хлорофиллов *a* и *b* у березы и дуба было стабильно на протяжении всего вегетационного периода, в то время как у липы в условиях загрязнения зарегистрировано значительное увеличение уровня хлорофилла *a* относительно хлорофилла *b*. Общей закономерностью для всех 3 видов стало перераспределение пигментного фонда в сторону увеличения доли каротиноидов при относительном снижении количества хлорофиллов [23].

Исследования в промышленной зоне Паневник (Польша) позволяют отметить видоспецифичность реакции хвойных на техногенное загрязнение. Установлено, что содержание хлорофиллов в хвое текущего года снижается у сосны веймутовой и сосны черной, тогда как у псевдотсуги и сосны обыкновенной наблюдается противоположная тенденция. При этом для некоторых видов зафиксирована возрастная динамика: увеличение концентрации пигментов регистрируется в 1-летней хвое сосны веймутовой и сосны обыкновенной, а также в 2-летней хвое сосны черной [31].

Значительное количество исследований посвящено изучению воздействия автотранспортных выбросов на пигментный аппарат древесных растений. В частности, установлено, что в г. Барыш автомобильные эмиссии приводят к снижению содержания пигментов у березы, при этом наиболее существенно угнетаются хлорофилл *b* и общее содержание хлорофиллов [1]. Аналогичная тенденция наблюдается в г. Красноярске, где в хвое ели под воздействием автотранспорта концентрации хлорофиллов и каротиноидов снижаются в 3,0; 3,5 и 3,6 раза соответственно, с сохранением доминирования хлорофилла *a* над хлорофиллом *b* [10]. Исследования в г. Кемерово демонстрируют градиентный

характер воздействия загрязнения: на наиболее подверженном такому негативному влиянию участке отмечается подавление хлорофилла *b* на 20–30 % при незначительном снижении хлорофилла *a* (до 10 %) без изменения уровня каротиноидов у рябины сибирской и березы повислой, тогда как на менее загрязненной территории угнетение всех пигментов значительно усиливается [26]. В г. Курске выявлена разнонаправленная динамика: содержание хлорофилла *a* и каротиноидов снижается (в 3 и 2,5 раза соответственно) с приближением к автодороге, в то время как концентрация хлорофилла *b* демонстрирует скачкообразные изменения при том, что в импактной зоне отличия по отношению к контролю отсутствуют [2]. Данные по г. Барнаулу подтверждают избирательное воздействие автомобильных выбросов на пигменты с наибольшим подавлением хлорофилла *a* (на 58–64 %) по сравнению с хлорофиллом *b* (на 22–36 %) и каротиноидами (на 38–48 %) [18]. Исследования в индийских городах Самбалпур [37] и Варанаси [36] показывают сходную реакцию пигментного аппарата растений на автотранспортное загрязнение: в обоих случаях отмечается избирательное подавление хлорофилла *b* и каротиноидов, содержание которых снижается более чем в 2 раза по сравнению с хлорофиллом *a*, также выявлена корреляция между уровнем загрязнения и избирательным подавлением отдельных пигментных комплексов.

Лишь в работах [2, 14, 18, 38] описаны стрессовые адаптивные реакции на промышленное и автотранспортное загрязнение. В большинстве исследований, несмотря на декларируемое авторами негативное воздействие загрязнения, представлены смешанные реакции, включающие, наряду со стрессовыми, и толерантные компоненты. Полученные нами данные согласуются с этой тенденцией: в условиях УГОК доминирование стрессовых реакций сочетается с наличием нейтральных адаптивных ответов.

Другие исследования свидетельствуют о стимулирующем влиянии техногенного загрязнения на пигментный аппарат растений. В г. Калининграде отмечено увеличение содержания хлорофиллов, антоцианов и каротиноидов в листьях рябины, липы, клена и ели, при этом между хлорофиллами и каротиноидами установлена обратная зависимость [13]. В зоне воздействия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса в хвое сосны и ели повышаются уровень хлорофиллов и соотношение хлорофиллов *a* и *b*, тогда как динамика количества каротиноидов и отношения хлорофиллов к каротиноидам имеют видоспецифический характер: первое увеличивается у сосны при снижении у ели, а второе, наоборот, повышается у ели при уменьшении у сосны [21]. Исследования в г. Красноярске выявили у березы повислой возрастание концентрации всех пигментов с наибольшим приростом хлорофилла *a*, который в 3 раза превышал уровень каротиноидов и хлорофилла *b* [19]. Нефтехимическое загрязнение в г. Махшахр (Иран) стимулировало синтез всех пигментов в листьях каллистемона [39], а в промышленной зоне Южного Дурбанского бассейна (Южная Африка) обнаружена прямая корреляция между концентрацией диоксида серы и содержанием хлорофилла у брахилены [29]. Следует отметить, что лишь в источниках [19, 29] описаны толерантные реакции, тогда как в остальных указаны и стрессовые компоненты, несмотря на декларируемый авторами положительный эффект загрязнения. Полученные нами данные по КМК демонстрируют сходную тенденцию: доминирование толерантных адаптивных реакций сочетается с нейтральными и стрессовыми.

Отдельную категорию составляют единичные исследования, авторы которых не обнаруживают строгих закономерностей в ответе пигментного комплекса на техногенное воздействие. Например, при оценке комбинированного влияния твердых частиц и озона в г. Варанаси не было установлено статистически значимой динамики содержания отдельных пигментов (хлорофиллов *a*, *b*, каротиноидов) и их соотношений у 13 изученных видов деревьев [35]. В нашей работе отсутствие четкой направленности адаптивных реакций зафиксировано для древостоев КБР, УПЦ и СПЦ.

Хотя авторы проанализированных работ характеризуют выявленные реакции как адаптивные, направленность этих ответов (толерантный или стрессовый) в большинстве случаев не получает качественной интерпретации. Кроме того, методологический анализ выявляет существенные пробелы: 1) преобладают исследования, сфокусированные на единичном источнике загрязнения; 2) отсутствует сравнение, при котором один вид древесных растений изучался бы по стандартизированной методике в условиях различных типов промышленного воздействия.

Проведенный анализ литературных данных демонстрирует, что реакции пигментной системы растений в условиях техногенеза характеризуются разнонаправленностью и неодинаковой степенью выраженности независимо от типа промышленного загрязнения. Полученные нами результаты подтверждают эту закономерность: все изученные виды загрязнения вызывают дестабилизацию пигментного комплекса листьев березы, проявляющуюся в несогласованности адаптивных реакций отдельных пигментов и их соотношений. Одновременная регистрация в пределах одного органа специфических и неспецифических адаптивных реакций свидетельствует о высокой чувствительности березы к техногенным воздействиям. Выявленная относительная независимость откликов различных компонентов пигментного аппарата подтверждает его пластичность в ответ на стрессовые факторы. Сравнительная оценка позволила установить, что наиболее значительное стрессовое воздействие на пигментный комплекс березы оказывает загрязнение, источники которого – СПЦ, УГОК и УПЦ.

### *Заключение*

Установлено, что промышленное загрязнение в Южно-Уральском регионе приводит к дестабилизации пигментного комплекса березы повислой, это выражается в разнонаправленности адаптивных реакций отдельных пигментов и их соотношений. Следовательно, возможность однозначной классификации общей адаптивной реакции фотосинтетического аппарата для каждого промцентра исключена. Условно можно выделить преобладающие типы реакций: толерантная – при полиметаллическом загрязнении с примесью сернистого ангидрида; стрессовая – в условиях медно-колчеданных отвалов; нейтральная – на буроугольных отвалах. Степень реализации адаптивного потенциала березы варьирует в зависимости от типа загрязнения. В одних техногенных условиях адаптивные механизмы эффективны, что обеспечивает толерантность к стрессу и поддерживает синтез пигментов на контрольном (Кумертауский буроугольный разрез, средняя реализация адаптивного потенциала) или повышенном (Карабашский медеплавильный комбинат, высокая реализация) уровнях. В других условиях адаптация ограничена, что приводит к снижению синтеза пигмен-

тов (Учалинский горно-обогатительный комбинат, низкая реализация). В случаях нефтехимического (Уфимский промышленный центр) и полиметаллического (Стерлитамакский промцентр) загрязнений выявить доминирующую адаптивную реакцию не удастся: в первом случае наблюдается равное присутствие толерантных и стрессовых реакций, во втором – относительная независимость 4 адаптивных реакций. Тем не менее, одновременная активация специфических и неспецифических реакций в этих промцентрах свидетельствует о высокой пластичности пигментного комплекса березы. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе исследованные промышленные центры образуют ряд по возрастанию: Кумертауский бурогольный разрез – Учалинский горно-обогатительный комбинат – Карабашский медеплавильный комбинат – Стерлитамакский промцентр – Уфимский промцентр. Данный ряд демонстрирует усиление степени относительной независимости адаптивных реакций пигментов и их соотношений в зависимости от типа загрязнения. Наблюдаемая тенденция служит дополнительным свидетельством пластичности пигментного комплекса.

Соотношение хлорофиллов *a* и *b* остается неизменным относительно контроля во всех промцентрах, отражая устойчивый баланс между основными хлорофиллами. Однако в условиях нефтехимического загрязнения данный показатель существенно ниже, чем в других промцентрах, что позволяет идентифицировать это загрязнение как наиболее стрессовый фактор для березы. В отличие от соотношения хлорофиллов, соотношение хлорофиллы/каротиноиды нарушается при всех типах техногенного воздействия. Наибольшие искажения данного баланса зарегистрированы при аэротехногенном полиметаллическом, нефтехимическом загрязнениях и в условиях медно-колчеданных отвалов, что подтверждает их повышенную стрессовую значимость.

Поскольку пигментный комплекс играет важную роль в адаптациях растений, комплексный анализ его состояния совместно с биохимическими, физиологическими, анатомическими и популяционными исследованиями позволит разработать научно обоснованные рекомендации по использованию березы для защитных насаждений. Это даст возможность рекомендовать березу для условий, где она проявляет толерантность и высокий адаптивный потенциал, и отказаться от ее использования в местах с преобладанием стрессовых реакций и сниженным потенциалом вида.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баландайкин М.Э. Динамика и различия в концентрации основных фотосинтетических пигментов листьев березы, произрастающей в неоднородных условиях // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 159–164.

Balandaykin M.E. Dynamics and Distinctions in Concentration of the Basic Photosynthetic Pigments of Leaves of the Birch Growing in Impure Conditions. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2014, no. 1, pp. 159–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401159>

2. Белова Т.А., Гончарова Е.Е., Протасова М.В. Оценка пигментного состава березы повислой под влиянием антропогенной нагрузки // Auditorium. Электрон. науч. журн. Курск. гос. ун-та. 2023. № 1(37). Режим доступа: [https://api-mag.kursksu.ru/api/v1/get\\_pdf/4810/](https://api-mag.kursksu.ru/api/v1/get_pdf/4810/) (дата обращения: 10.12.25).

Belova T.A., Goncharova E.E., Protasova M.V. Assessment of Pigment Composition of *Betula pendula* under the Influence of Anthropogenic Load. *Auditorium. Elektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, no. 1(37). (In Russ.).

3. Бухарина И.Л., Поварнищина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: Ижевск. ГСХА, 2007. 216 с.

Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E. *Ecological and Biological Characteristics of Woody Plants in an Urban Environment*. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy Publ., 2007. 216 p. (In Russ.).

4. Васфилов С.П. Возможные пути негативного влияния кислых газов на растения // Журн. общ. биол. 2003. Т. 64, № 2. С. 146–159.

Vasfilov S.P. Possible Ways of Negative Influence of Acid Gases on Plants. *Zhurnal obshchej biologii* = Journal of General Biology, 2003, vol. 64, no. 2, pp. 146–159. (In Russ.).

5. Галимов Р.Р., Уразбахтин А.А., Уразгильдин Р.В. Сравнительная характеристика морфологических параметров листьев и побегов березы повислой при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона // Леса России и хоз-во в них. 2024. № 4(91). С. 94–105.

Galimov R.R., Urazbakhitin A.A., Urazgildin R.V. Comparative Characteristics of Morphological Parameters of Birch Leaves and Shoots under Different Types of Pollution in the Conditions of the South Urals Region. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2024, no. 4(91), pp. 94–105. (In Russ.).

<https://doi.org/10.51318/FRET.2024.91.4.010>

6. Гамалей Ю.В. Развитие хлоренхимы листа. Л.: Наука, 1978. 192 с.

Gamalej Yu.V. *Development of Leaf Chlorenchyma*. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 192 p. (In Russ.).

7. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 208 с.

Getko N.V. *Plants in a Man-Made Environment: Structure and Function of the Assimilation Apparatus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 208 p. (In Russ.).

8. Горышина Т.К., Заботина Т.Н., Пружина Е.Г. Пластидный аппарат травянистых растений лесостепной дубравы в разных условиях освещенности // Экология. 1975. № 15. С. 15–22.

Goryshina T.K., Zabolina T.N., Pruzhina E.G. Plastid Apparatus of Herbaceous Plants of Forest-Steppe Oak Groves under Different Lighting Conditions. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 1975, no. 15, pp. 15–22. (In Russ.).

9. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2022 году. Уфа: Самрау, 2023. 319 с.

*State Report on the State of Natural Resources and the Environment of the Republic of Bashkortostan in 2022*. Ufa, Samrau Publ., 2023. 319 p. (In Russ.).

10. Донцов А.С., Суңцова Л.Н., Инишаков Е.М. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореал. зоны. 2016. № 37(5-6). С. 246–250.

Dontsov A.S., Sutsova L.N., Inshakov E.M. Assessment of the State of the Environment of the City of Krasnoyarsk Based on the State of the Photosynthetic Apparatus of Siberian Spruce. *Khvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2016, no. 37(5-6), pp. 246–250. (In Russ.).

11. Дончева-Бонева М.Н. Воздействие токсических газов на содержание пигментов в хвое сосны обыкновенной // Влияние атмосферного загрязнения и других антропогенных и природных факторов на дестабилизацию состояния лесов Центральной и Восточной Европы. Т. 1. М.: МГУЛ, 1996. С. 56–57.

Doncheva-Boneva M.N. The Effect of Toxic Gases on the Pigment Content in Scots Pine Needles. *Vliyanie atmosfernogo zagryazneniya i drugih antropogennykh i prirodnykh faktorov na destabilizatsiyu sostoyaniya lesov Tsentral'noj i Vostochnoj Evropy*, vol. 1. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 1996, pp. 56–57. (In Russ.).

12. 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. On the Methodology of Tree Leaf Ecophysiological Studies. *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal* = Povolzhskiy Journal of Ecology, 2008, no. 3, pp. 200–210. (In Russ.).

13. Майдебуря И.С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомоморфологические особенности и биохимические показатели древесных растений: дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2006. 146 с.

Majdebura I.S. *The Impact of Air Pollution in the City of Kaliningrad on the Anatomical and Morphological Characteristics and Biochemical Parameters of Woody Plants*: Cand. Biol. Sci. Diss. Kaliningrad, 2006. 146 p. (In Russ.).

14. Маракаев 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.

Marakaev O.A., Smirnova N.S., Zagoskina N.V. Technogenic Stress and Its Effect on Deciduous Trees (an Example from Parks in Yaroslavl). *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2006, no. 6, pp. 373–377. <https://doi.org/10.1134/S1067413606060026>

15. Методы биохимического анализа растений / под ред. В.В. Полевого, Г.Б. Максимовой. Л.: ЛГУ, 1978. 192 с.

*Methods of Biochemical Analysis of Plants*. Ed. by V.V. Polevoj, G.B. Maksimova. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1978. 192 p. (In Russ.).

16. Мокронос А.Т. Фотосинтетическая функция и целостность растительного организма // 42-е Тимирязевские чтения. М.: Наука, 1983. 64 с.

Mokronosov A.T. *Photosynthetic Function and Integrity of the Plant Organism*. 42-e Timiryazevskie chteniya. Moskva, Nauka Publ., 1983. 64 p. (In Russ.).

17. Реферат по итогам оказания услуг по осуществлению регулярных наблюдений химического загрязнения атмосферного воздуха на территории города Карабаша, где нет государственной наблюдательной сети. Челябинск: Филиал ЦЛАТИ по УФО, 2021. 7 с.

*Abstract on the Results of the Provision of Services for the Implementation of Regular Observations of Chemical Air Pollution in the Territory of the City of Karabash, Where There is No State Monitoring Network*. Chelyabinsk, Branch of the Centre for Laboratory Analysis and Technical Measurements in the Ural Federal District Publ., 2021. 7 p. (In Russ.).

18. Соколова Г.Г. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19, № 1. С. 223–228.

Sokolova G.G. Impact of Technogenic Pollution on the Pigment Composition of Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) in the Urban Conditions of Barnaul. *Problemy botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii* = Problems of Botany of South Siberia and Mongolia, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 223–228. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020044>

19. 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.

Stasova V.V., Skripal'shchikova L.N., Astrakhanitseva 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>

20. Тахтаджян А.А. Высшие растения. Т. 1. М.; Л.: АН СССР, 1956. 488 с.

Takhtadzhyan A.A. *Higher Plants*: Vol. 1. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1956. 488 p. (In Russ.).

21. Тужилкина В.В. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэро-техногенное загрязнение // Экология. 2009. № 4. С. 243–248.

Tuzhilkina V.V. Reaction of the Pigment System of Conifers to Long-Term Aero-technogenic Pollution. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2009, no. 4, pp. 243–248. (In Russ.).

22. Уразгильдин Р.В. Лесообразующие виды Предуралья в условиях техногенеза: сравнительная эколого-биологическая характеристика, видоспецифичность, адаптивные реакции, адаптивные стратегии: дис. ... д-ра биол. наук. Уфа, 2021. 367 с.

Urazgildin R.V. *Forest-Forming Species of the Cis-Urals under Technogenic Conditions: Comparative Ecological and Biological Characteristics, Species Specificity, Adaptive Responses, Adaptive Strategies*: Doc. Biol. Sci. Diss. Ufa, 2021, 367 p. (In Russ.).

23. Уразгильдин Р.В., Аминова К.З., 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 // Карельск. науч. журн. 2016. Т. 5, № 1(14). С. 90–94.

Urazgildin R.V., Amineva K.Z., Zaitsev G.A., Kulagin A.U., Yashin D.A. Comparative Characteristic of Oak (*Quercus robur* L.), Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Birch (*Betula pendula* Roth.) Pigmentary Complex Formation in Industrial Pollution Conditions. *Karel'skij nauchnyj zhurnal*, 2016, vol. 5, no. 1(14), pp. 90–94. (In Russ.).

24. Флора СССР. Т. 1 / под ред. М.М. Ильина. Л.: АН СССР, 1934. 302 с.

*Flora of the USSR*: Vol. 1. Ed. by M.M. Il'in. Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1934. 302 p. (In Russ.).

25. Цандекова О.Л. Динамика накопления пигментов в листьях *Betula pendula* Roth. в условиях породного отвала угледобывающей промышленности // Вестн. Алтайск. гос. аграрн. ун-та. 2016. № 6(140). С. 60–64.

Tsandeskova O.L. The Dynamics of Pigment Accumulation in Leaves of *Betula pendula* Roth. in a Mining Rock Dump. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agrarian University, 2016, no. 6(140), pp. 60–64. (In Russ.).

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

Tsandeskova O.L., Neverova O.A. Influence of Motor Transport Emissions on the Wood Plants Leaves Pigmentary Complex. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 1(3), pp. 853–856. (In Russ.).

27. Чупахина Г.Н. Физиологические и биохимические методы анализа растений: Практикум. Калининград: Калининградск. ун-т, 2000. 59 с.

Chupakhina G.N. *Physiological and Biochemical Methods of Plant Analysis*: Tutorial. Kaliningrad: Kaliningrad University Publ., 2000. 59 p. (In Russ.).

28. Шлык А.А., Прудникова И.В., Парамонова Т.К. Биосинтез и состояние хлорофиллов в растении. Минск: Наука и техника, 1975. С. 42–57.

Shlyk A.A., Prudnikova I.V., Paramonova T.K. *Biosynthesis and State of Chlorophylls in Plants*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975, pp. 42–57. (In Russ.).

29. Areington C.A., Varghese B., Serhsen H. The Utility of Biochemical, Physiological and Morphological Biomarkers of Leaf Sulfate Levels in Establishing *Brachylaena discolor* leaves as a Bioindicator of SO<sub>2</sub> Pollution. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, vol. 118, pp. 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.06.025>

30. Goodwin T.W. *The Biochemistry of the Carotenoids. Vol. 1: Plants*. London, New York, Chapman and Hall Publ., 1980. 378 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5860-9>

31. Gowin T., Góral I. Chlorophyll and Pheophytin Content in Needles of Different Age of Trees Growing under Conditions of Chronic Industrial Pollution. *Acta Societatis Botanicae Poloniae*, 1977, vol. 46, no. 1, pp. 151–159. <https://doi.org/10.5586/asbp.1977.012>

32. Mathis P., Kleo J. The Triplet State of  $\beta$ -Carotene and of Analog Polyenes of Different Length. *Photochemistry and Photobiology*, 1973, vol. 18, iss. 4, pp. 343–346. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1973.tb06431.x>

33. Mikhailova T.A., Afanasieva L.V., Kalugina O.V., Shergina O.V., Taranenko E.N. Changes in Nutrition and Pigment Complex in Pine (*Pinus sylvestris* L.) Needles under Technogenic Pollution in Irkutsk Region, Russia. *Journal of Forest Research*, 2017, vol. 22, iss. 6, pp. 386–392. <https://doi.org/10.1080/13416979.2017.1386020>

34. More R.S., Chaubal S.S. Determination of Stress and Comparison by Estimation of Chlorophyll – a, b and Carotenoid Contents among Plants Growing along Mithi River, Mumbai. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2017, vol. 8, iss. 1, pp. 1–8.

35. Mukherjee A., Agrawal M. Use of GLM Approach to Assess the Responses of Tropical Trees to Urban Air Pollution in Relation to Leaf Functional Traits and Tree Characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 152, pp. 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.038>

36. Prajapati S.K., Tripathi B.D. Seasonal Variation of Leaf Dust Accumulation and Pigment Content in Plant Species Exposed to Urban Particulates Pollution. *Journal of Environmental Quality*, 2008, vol. 37, iss. 3, pp. 865–870. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0511>

37. Prusty B.A.K., Mishra P.C., Azeez P.A. Dust Accumulation and Leaf Pigment Content in Vegetation near the National Highway at Sambalpur, Orissa, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, vol. 60, iss. 2, pp. 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.013>

38. Rostunov A., Konchina T., Zhestkova E., Gusev D., Kharitonov S. The Dependence of Morphological and Physiological Indicators of the Leaves of Woody Plants on the Degree of Technogenic Pollution. *Technology. Resources: Proceedings of the 11th Internet Scientific and Practical Conference: Vol. 1. Latvia, Rezekne Academy of Technologies*, 2017, pp. 235–239. <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2516>

39. Seyyednejad S.M., Niknejad M., Yusefi M. Study of Air Pollution Effects on Some Physiology and Morphology Factors of *Albizia lebeck* in High Temperature Condition in Khuzestan. *Journal of Plant Sciences*, 2009, vol. 4, iss. 4, pp. 122–126. <https://doi.org/10.3923/jps.2009.122.126>

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

---

**Вклад авторов:** Галимов Рамиль Раилович: сбор полевого материала, камеральная обработка, статистическая обработка, написание статьи; Уразгильдин Руслан Вилисович: постановка эксперимента, сбор полевого материала, редактирование статьи

**Authors' Contribution:** Galimov Ramil Railovich: field data collection, office processing, statistical processing, article writing; Urazgildin Ruslan Vilisovich: experiment setting, field data collection, article editing