

# СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ *BETULA PENDULA* В УСЛОВИЯХ СТЕРЛИТАМАКСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА

Р.Х. Гиниятуллин, О.В. Тагирова, Р.С. Иванов,  
А.Ю. Кулагин\*

Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Уфа, Россия

\* Эл. почта: coolagin@list.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2023; принята к печати 26.09.2023

Представлены результаты исследований по оценке относительного жизненного состояния насаждений березы повислой *Betula pendula* в условиях загрязнения Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ). В целом березовые насаждения в условиях длительного и интенсивного промышленного загрязнения относятся к категории «здоровые». Внешние признаки угнетения проявляются в уменьшении густоты кроны, увеличении количества мертвых ветвей, поражении ассимиляционного аппарата хлорозами и некрозами. Установлены различия содержания хлорофиллов в листьях деревьев березы в условиях загрязнения СПЦ в течение вегетации. В зоне сильного загрязнения отмечается пониженное суммарное содержание хлорофиллов в листьях, при сравнении с зоной слабого загрязнения. В условиях загрязнения в период активного роста березы (июнь-июль) отмечается высокое содержание хлорофиллов и повышенный азотный баланс (NBI) в листьях в зонах как сильного загрязнения, так и слабого загрязнения. Это свидетельствует об адаптивном обеспечении устойчивого функционирования фотосинтетического аппарата в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды.

**Ключевые слова:** береза повислая, относительное жизненное состояние, листья, хлорофиллы, флавоноиды, индекс азотного баланса, адаптация.

## SEASONAL DYNAMICS OF CHANGES IN THE CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN LEAVES OF THE BIRCH *BETULA PENDULA* IN THE CONDITIONS OF THE STERLITAMAK INDUSTRIAL CENTER

R.H. Giniyatullin, O.V. Tagirova, R.S. Ivanov, A.Yu. Kulagin\*

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

\* E-mail: coolagin@list.ru

The paper presents the results of studies on the assessment of the relative vitality of the drooping birch *Betula pendula* plantations in the conditions of pollution by the Sterlitamak Industrial Center (SIC). In general, birch plantations growing under long-term and intense industrial pollution are classified as “healthy”. The external signs of suppression are manifested as a decrease in crown density, an increase in the number of dead branches, and damage to the assimilation apparatus by chlorosis and necrosis. Differences in the content of chlorophyll in the leaves of birch trees under the conditions of pollution by SIC during the growing season were found. In the severe pollution zone, the total content of chlorophylls in the leaves is reduced, compared with that in the low pollution zone. Upon pollution during the period of active growth of birch (June-July), a high content of chlorophylls and an increased nitrogen balance (NBI) in the leaves are noted both in the zone of severe pollution and the zone of low pollution. This suggests the possibility of an adaptive sustainability of the functioning of the photosynthetic apparatus under a mixed type of environmental pollution.

**Keywords:** Silver birch, relative vitality, leaves, chlorophylls, flavonoids, nitrogen balance index, adaptation.

### ВВЕДЕНИЕ

Береза повислая (*Betula pendula* Roth) получила широкое распространение при озеленении населенных

пунктов и при создании насаждений в санитарно-защитных зонах промышленных центров [1, 11]. В условиях Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ)

береза успешно произрастает в уличных насаждениях, в скверах и парках, в жилой зоне и в санитарно-защитной зоне северной части города вблизи промышленных предприятий [4]. При антропогенном загрязнении окружающей среды отмечаются изменения в пигментном комплексе растений [3], при этом действие большинства абиотических стрессовых факторов приводит к снижению содержания пигментов в листьях [8]. Изменения в пигментном комплексе ассимиляционного аппарата в ответ на стрессовые воздействия могут рассматриваться как адаптивные реакции растений [18, 19]. При этом суммарное содержание хлорофиллов  $a$  и  $b$ , а также их соотношение может использоваться в качестве индикатора стресса растений [6]. Следует отметить, что особенности физиологических изменений

растений видоспецифичны и значительно различаются в зависимости от таксономического положения, условий произрастания, типа загрязнения окружающей среды и других факторов [9, 11].

В данной работе представлена характеристика состояния деревьев березы в санитарно-защитных насаждениях СПЦ, произрастающих в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды. Получены данные о количественных изменениях содержания хлорофиллов ( $a + b$ ), флавоноидов и индекса азотного баланса растений (NBI), который представляет собой соотношение количества хлорофиллов и флавоноидов (азота/углерода), в листьях березы в течение вегетационного периода в условиях загрязнения окружающей среды СПЦ.



**Рис. 1.** Схема расположения постоянных пробных площадей в насаждениях березы повислой (*Betula pendula* Roth) в Стерлитамакском промышленном центре  
[\[https://www.google.com.hk/maps/place/Sterlitamak,+Republic+of+Bashkortostan/@53.6857819,55.9466957,4078m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x43d81034af987c9b:0x21a735497b8fc4c218m2!3d53.63042114d55.9308009!16zL20vMDZzb-R6?hl=en\]](https://www.google.com.hk/maps/place/Sterlitamak,+Republic+of+Bashkortostan/@53.6857819,55.9466957,4078m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x43d81034af987c9b:0x21a735497b8fc4c218m2!3d53.63042114d55.9308009!16zL20vMDZzb-R6?hl=en)

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Зона исследования входит в Уршакско-Бельский район Чермасанско-Ашкадарского округа Южно-лесостепной подзоны провинции Высокого Заволжья лесостепной части Русской равнины [2]. Естественная травянистая растительность представлена степными, луговыми и болотными флористическими комплексами. Климат района характеризуется континентальностью и недостаточным увлажнением. Средняя годовая температура воздуха составляет +3,2 °С, среднее годовое количество осадков – 498,9 мм. Преобладают ветры южного и юго-западного направлений. Почвообразующими породами служат делювиальные и аллювиально-делювиальные отложения. В почвенном покрове преобладают типичные и выщелоченные черноземы [2].

Данные природно-климатические условия соответствуют дендрэкологическим особенностям березы повислой, что проявляется в успешном произрастании как в естественных лесных насаждениях, так и в лесных культурах.

Исследования проводились в березовых насаждениях, расположенных на различном удалении от промышленных предприятий на сети постоянных пробных площадей (ППП) в условиях СПЦ [4]. Объектами исследований были деревья березы повислой, произрастающие вблизи промышленной зоны в условиях сильного загрязнения (ППП № 1) и в условиях слабого загрязнения (ППП № 2) (рис. 1). Возраст насаждений – 65 лет (лесные культуры 1963 года посадки).

Оценка относительного жизненного состояния (ОЖС) насаждений выполнена на основе учета состояния отдельных деревьев по методике В.А. Алексева [5] с изменениями для лиственных древесных растений [4].

На каждой ППП было выделено по 10 «здоровых» деревьев березы. На каждом дереве пронумеровали по 10 листьев, расположенных на брахибластах. Динамику изменений содержания хлорофиллов и флавоноидов в листьях березы оценивали в июне – июле – августе 2022 года.

В режиме реального времени (11–13 часов, 13–15 числа каждого месяца) измеряли содержание пигментов на верхней поверхности листьев растений и фиксировали индекс азотного баланса (NBI), который представляет собой соотношение количества хлорофиллов и флавоноидов (азота/углерода). Использовали прибор Dualex Scientific+ (Force-A, Франция)<sup>2</sup>. Измерения количественного содержания фотосинтетических пигментов хлорофиллов ( $a + b$ ) и флавоноидов проводились в диапазоне от 0,00 до 3,00 мкг/см<sup>2</sup> (в расчете

на сырую массу), при точности абсорбции 5%. Индекс азотного баланса – запатентованный фирмой Force-A показатель, называемый NBI® (Nitrogen Balance Index). NBI рассчитывается в условных единицах (у. е.) прибора Dualex. NBI дает возможность получать как можно более раннюю информацию об азотном статусе растения [13].

Произведен расчет содержания пигментов в листьях 10 деревьев березы в течение вегетационного периода для насаждений, произрастающих в условиях сильного загрязнения и в условиях слабого загрязнения окружающей среды. Фактический материал обрабатывали статистически с использованием общепринятых методов с помощью пакета программы MS Excel версии 2016.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Санитарное состояние является одним из важнейших показателей общего состояния березовых древостоев в промышленном центре. В целом на ППП березовые древостои, произрастающие в условиях промышленного загрязнения, по ОЖС находятся в удовлетворительном состоянии. Большинство деревьев березы повислой в условиях СПЦ относятся к категории «здоровые» (табл. 1).

На ОЖС древостоев негативное воздействие оказывают промышленные предприятия, расположенные в северной части г. Стерлитамак. В условиях нефтехимического и химического загрязнения не происходит массовой гибели деревьев березы в насаждениях, но наблюдается снижение ОЖС древостоев. С приближением к источнику загрязнения у деревьев березы отмечается снижение густоты кроны, увеличение количества мертвых ветвей, распространение хлорозов, межжилковых и краевых некрозов листьев. В насаждениях имеются «ослабленные», «сильно ослабленные» и «отмирающие» деревья. Однако значительная часть деревьев березы на ППП № 1 и № 2 в условиях СПЦ относится к категории «здоровые». Следует отметить, что часть деревьев в насаждении относится к категории «ослабленные», при этом со временем доля таких деревьев в условиях загрязнения окружающей среды СПЦ будет увеличиваться.

В условиях СПЦ в листьях березы, как при сильном, так и слабом загрязнении выявлены изменения в содержании фотосинтетических пигментов (рис. 2). В течение вегетации в листьях в зоне сильного загрязнения деревьев отмечается пониженное суммарное содержание хлорофиллов, при сравнении с зоной слабого загрязнения. Это соотносится с фактом снижения ОЖС деревьев березы на ППП № 1 в условиях стресса [17].

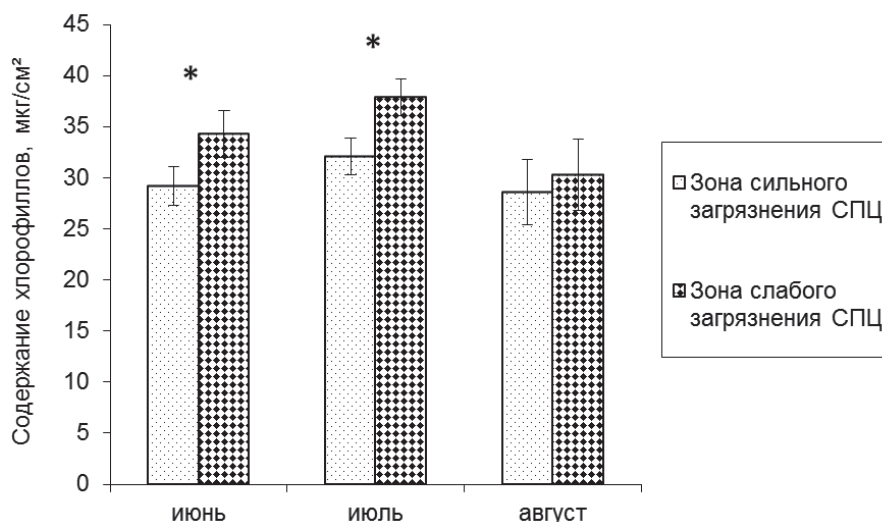
Суммарное содержание хлорофиллов  $a + b$  в листьях березы в зоне сильного загрязнения на ППП № 1 в условиях СПЦ изменяется от 28,6 до 32,1 мкг/см<sup>2</sup>. Среднее

<sup>2</sup> <http://www.dynamax.com/images/uploads/papers/Dualex.pdf>.

**Относительное жизненное состояние (ОЖС) насаждений березы повислой *B. pendula* в условиях Стерлитамакского промышленного центра**

ППП	Число деревьев на ППП по категориям, шт.						ОЖС насаждения	
	Все	Здоровые	Ослабленные	Сильно ослабленные	Отмирающие	Сухие	Ln, %*	Категория
№ 1	20	11	7	1	1	0	81,75	Здоровое
№ 2	20	13	6	1	0	0	88,25	Здоровое

\* Ln, % – вычисленное ОЖС насаждения, рассчитанное на число деревьев по категориям ОЖС.



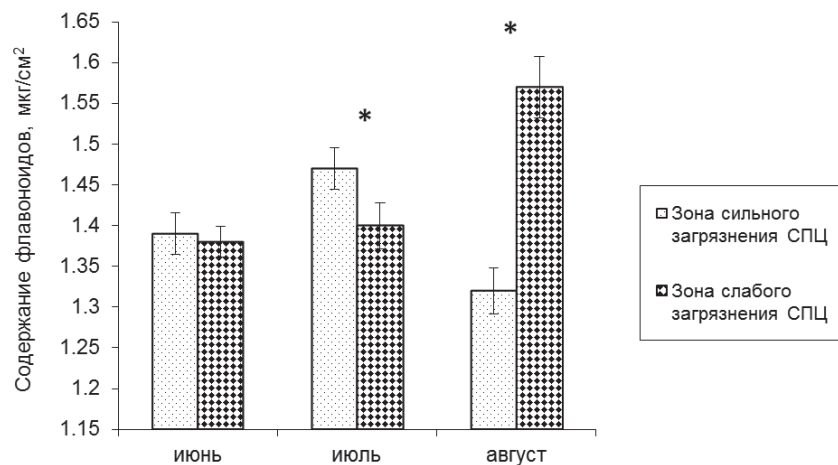
**Рис. 2.** Содержание хлорофиллов *a + b* (мкг/см<sup>2</sup>) в листьях деревьев березы повислой *B. pendula* в течение вегетационного периода в условиях загрязнения Стерлитамакского промышленного центра. Представлены средние значения и их ошибки (*n* = 10). Достоверно различающиеся средние значения помечены звездочками (*p* < 0,05, *t*-тест)

содержание хлорофиллов в листьях деревьев в зоне слабого загрязнения на ППП № 2 составляет (мкг/см<sup>2</sup>) 34,3 ± 2,09 в июне, 37,9 ± 1,8 в июле и 30,3 ± 3,5 в августе. Наибольшее суммарное содержание хлорофиллов в листьях деревьев березы в условиях СПЦ отмечается в середине вегетационного периода (июль). Именно в этот период складываются оптимальные условия для роста и развития деревьев. К концу вегетационного периода содержание хлорофиллов в листьях закономерно снижается. Однако содержание хлорофилла в листьях березы в зоне слабого загрязнения в конце вегетации (август) в среднем снижалось на 7,6 мкг/см<sup>2</sup>, а в зоне загрязнения – на 3,5 мкг/см<sup>2</sup> по сравнению с июлем. Следовательно, пониженное содержание хлорофиллов в листьях березы является индикатором загрязнения окружающей среды, что согласуется с опубликованными данными [12, 14].

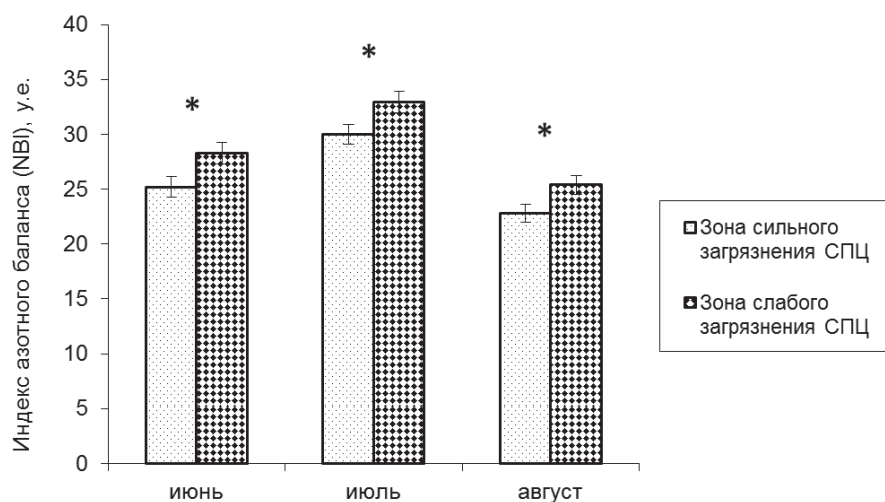
При определении количественного содержания флавоноидов в листьях березы повислой в условиях СПЦ показано, что оценки содержания флавоноидов в зоне сильного загрязнения и в зоне слабого загрязнения в июне не различаются, а в июле различаются незначи-

тельно (рис. 3). При этом в конце вегетации (август) происходит резкое увеличение содержания флавоноидов в листьях березы в зоне слабого загрязнения и снижение в условиях сильного загрязнения. Это свидетельствует о нарушениях в адаптации структурно-функционального комплекса ассимиляционного аппарата, которые возникают при длительном произрастании растений в условиях загрязнения окружающей среды и экстремальных условиях произрастания, что не противоречит ранее высказанным суждениям [7, 15, 16].

Изменения в соотношении хлорофиллов и флавоноидов, происходящие в растениях в течение вегетационного периода, характеризуются индексом азотного баланса NBI (Nitrogen Balance Index) растений, который является индикатором изменения соотношения C/N в активно фотосинтезирующих листьях березы. Установлено, что сумма хлорофиллов (*a + b*) в листьях деревьев березы в июле увеличилась на 9,0–9,4%, что повлияло на увеличение индекса азотного баланса на 13,9–16% (рис. 4). В конце вегетационного периода



**Рис. 3.** Содержание флавоноидов (мкг/см<sup>2</sup>) в листьях деревьев березы повислой *B. pendula* в течение вегетационного периода в условиях загрязнения Стерлитамакского промышленного центра. Представлены средние значения и их ошибки ( $n = 10$ ). Достоверно различающиеся средние значения помечены звездочками ( $p < 0,05$ ,  $t$ -тест)



**Рис. 4.** Изменение индекса азотного баланса (NBI) (у. е.) в листьях деревьев березы повислой *B. pendula* в течение вегетационного периода в условиях загрязнения Стерлитамакского промышленного центра. Представлены средние значения и их ошибки ( $n = 10$ ). Достоверно различающиеся средние значения помечены звездочками ( $p < 0,05$ ,  $t$ -тест)

отмечается снижение рассматриваемых показателей на 7,2–7,5 у. е. В зоне слабого загрязнения в условиях СПЦ в сформированных листьях березы наблюдается повышение NBI в июне и июле (до 28,3–32,9 у. е.), при этом в конце вегетации NBI снижается до 25,4 у. е.

Для листьев деревьев березы в зоне сильного загрязнения наибольшие значения NBI отмечались в июле (30,0 у. е.), при этом в конце вегетации значение снизилось до 22,8 у. е. В конце вегетационного периода в условиях СПЦ в листьях деревьев березы отмечалось уменьшение содержания хлорофиллов и снижение индекса азотного баланса, как в зоне сильного загрязнения, так и в зоне слабого загрязнения. Достоверных различий индекса азотного баланса в листьях у деревьев березы в зоне сильного загрязнения и в зоне

слабого загрязнения в течение вегетационного периода не обнаружено. Это свидетельствует о сбалансированности структурно-функционального комплекса пигментной системы, а также об успешной адаптации березы повислой к условиям загрязнения СПЦ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Насаждения березы повислой, произрастающие в условиях промышленного загрязнения СПЦ по относительному жизненному состоянию в целом относятся к категории «здоровые». Внешние признаки угнетения проявляются в уменьшении густоты кроны, увеличении количества мертвых ветвей, поражении ассимиляционного аппарата хлорозами и некрозами. Оценка динамики содержания хлорофиллов, флаво-

ноидов и индекса азотного баланса в листьях березы в насаждениях за вегетационный период 2022 года (характеризуется средними многолетними значениями климатических показателей) [10] в условиях загрязнения СПЦ позволяет отметить адаптивный характер реакции пигментного комплекса на воздействие промышленных выбросов. Содержание хлорофиллов и флавоноидов в листьях березы изменяется в зависимости от техногенной нагрузки: отмечено снижение содержания фотосинтетических пигментов в листьях у деревьев березы в условиях слабого загрязнения СПЦ. Установлено, что в период активного роста листьев (июнь-июль) высокое содержание хлорофиллов и повышение азотного баланса (NBI) отмечается в листьях березы как в зоне сильного загрязнения, так и в зоне слабого загрязнения. Это свидетельствует об успешной реализации адаптивного потенциала ассимиляционных органов в части обеспечения

устойчивого функционирования фотосинтетического аппарата в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды.

*Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Устойчивость лесобразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».*

*Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Соблюдение этических стандартов: настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.*

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Антипов ВГ. Устойчивость древесных растений к промышленным газам. Минск: Наука и техника; 1979.
2. Кадильникова ИП, Тайчинов СИ. Условия почвообразования на территории Башкирии и его провинциальные черты. В кн.: Почвы Башкирии. Т. 1. Уфа: БФ АН СССР; 1973. С. 15-62.
3. Кириенко НН, Терлеева ПС. Влияние техногенного загрязнения территории на содержание фотосинтетических пигментов в листьях лекарственных растений. В кн.: Проблемы современной аграрной науки. Красноярск; КрасГАУ; 2009. С. 50-4.
4. Кулагин АЮ, Гиниятуллин РХ, Уразгильдин РВ. Средостабилизирующая роль лесных насаждений в условиях Стерлитамакского промышленного центра. Уфа: Гилем; 2010.
5. Алексеев ВА, ред. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука; 1990.
6. Муратова АЮ, Любунь ЕВ, Сунгурцева ИЮ, Нуржанова АА, Турковская ОВ. Физиолого-биохимические реакции *Miscanthus × giganteus* на загрязнение почвы тяжелыми металлами. Экобиотех. 2019;2(4):482-93.
7. Тарчевский ИА, Андрианова ЮЕ. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы. Физиология растений. 1980;27(2):341-8.
8. Удовенко ГВ. Устойчивость растений к абиотическим стрессам. В кн.: Теоретические осно-

вы селекции растений. Т. 2. Физиологические основы селекции растений. СПб.: ВИР; 1995. С. 293-346.

9. Уразгильдин РВ, Кулагин АЮ. Повреждения, адаптации, стратегии древесных видов в условиях техногенеза: структурно-функциональные уровни реализации адаптивного потенциала. Успехи современной биологии. 2022;142(1):52-69. DOI: 10.31857/S0042132422010082.
10. Кадильников ИП и др., ред. Физико-географическое районирование Башкирской АССР. Уфа; 1964.
11. Тарабрин ВП, Кондратюк ЕН, Башкатов ВГ и др. Фитотоксичность органических и неорганических загрязнителей. Киев: Наукова думка; 1986.
12. Фролов АК, Горышина ТК. Особенности фотосинтетического аппарата некоторых древесных пород в городских условиях. Ботан. журн. 1982;67(5):599-9.

### Общий список литературы/References

1. Antipov VG. Ustoychivost Drevesnykh Rasteniy k Promyshennym Gazam. [Resistance of Woody Plants to Industrial Gases]. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1979. (In Russ.)
2. Kadilnikova IP, Taychinov SI. [Conditions of soil formation in the territory of Bashkiria and its provincial features]. In: Pochvy Bashkirii. T. 1. [Soils of Bashkiria. Vol. 1]. Ufa: BF AN SSSR; 1973. P. 15-62. (In Russ.)

3. Kiriyenko NN, Terleyeva PS. [Influence of technogenic pollution of the territory on the content of photosynthetic pigments in the leaves of medicinal plants]. In: Problemy Sovremennoy Agrarnoy Nauki. Krasnoyarsk: KrasGAU; 2009. P. 50-4. (In Russ.)
4. Kulagin AYu, Giniyatullin RKH, Urazgildin RV. Sredostabilizituyuschaya Rol' Lesnykh Nasazhdeniy v Usloviyakh Sterlitamakskogo Promyshlennogo Tsentra. [Environment-Stabilizing Role of Forest Plantations in the Conditions of Sterlitamak Industrial Center]. Ufa: Gilem; 2010. (In Russ.)
5. Alekseyev VA, ed. Lesnye Ekosistemy i Atmosfernoye Zagriazneneye. [Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution]. Leningrad: Nauka; 1990. (In Russ.)
6. Muratova AYu, Liubun YeV, Sungurtseva IYu, Nurzhanova AA, Turkovskaya OV. [Physiological and biochemical reactions of *Miscanthus × giganteus* to soil pollution with heavy metals]. *Ekobiotekh.* 2019;2(4):482-93. (In Russ.)
7. Tarchevsky IA, Andrianova YuE. [The content of pigments as an indicator of the power of development of the photosynthetic apparatus in wheat]. *Fiziologiya Rasteniy.* 1980;27(2):3418. (In Russ.)
8. Udovenko GV. [Plant resistance to abiotic stress]. In: Teoreticheskiye Osnovy Seleksii Rateniy. T. 2. Fiziologicheskkiye Osnovy Seleksii Rateniy. [Theoretical Foundations of plant breeding. Vol. 2. Physiological Foundations of Plant Breeding]. St. Petersburg: VIR; 1995. P. 293-346. (In Russ.)
9. Urazgildin RV, Kulagin AYu. [Damages, adaptations, and strategies of tree species in the conditions of technogenesis: structural and functional levels of adaptive potential realization]. *Uspekhi Sovremennoy Biologii.* 2022;142(1):52-69. DOI: 10.31857/S0042132422010082. (In Russ.)
10. Kadilnikov et al., eds. Fiziko-Geograficheskoye Rayonirovaniye Bashkirskoy ASSR. [Physical-Geographical Zoning of the Bashkir ASSR]. Ufa; 1964. (In Russ.)
11. Tarabrin VP, Kondratyuk EN, Bashkatov VG et al., eds. Fitotoksichnost Organicheskikh i Neorganicheskikh Zagriazniteley. [Phytotoxicity of Organic and Inorganic Pollutants]. Kyiv: Naukova Dumka; 1986. (In Russ.)
12. Frolov AK, Goryshina TK. [Features of the photosynthetic apparatus of some tree species in urban conditions]. *Botanicheskiy Zhurnal.* 1982;67(5):599-609. (In Russ.)
13. Cartelat A, Cerovic ZG, Goulasa Y et al. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res.* 2005;91(1):35-49. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.05.002.
14. Croft H, Chen J. Leaf pigment content. In: Liang S. (Ed.). *Comprehensive Remote Sensing.* Oxford, UK: Elsevier; 2018. P. 117-42. DOI: 10.1016/B9780124095489.105470.
15. Kvičala M, Lacková E, Urbancová L. Photosynthetic active pigments of *Chamaecyparis Norway Spruce (Picea abies)* under the different acclimation, irradiation and elevated CO<sub>2</sub> content. *ISRN Environ Chem.* 2014; ID 572576:4. DOI: 10.1155/2014/572576.
16. Major JE, Barsi DC, Mosseler A, Campbell M. Genetic variation and control of chloroplast pigment concentrations in *Picea rubens*, *Picea mariana* and their hybrids. I. Ambient and elevated [CO<sub>2</sub>] environments. *Tree Physiol.* 2007;27(3):353-64. DOI: 10.1093/treephys/27.3.353.
17. Młodzińska E. Survey of plant pigments: molecular and environmental determinants of plant colors. *Acta Biol Cracov Ser Bot.* 2009;51(1):7-16.
18. Tarkhanov SN, Prozherina NA, Konovalov VN. Forest Ecosystems of the Northern Dvina Basin under Atmospheric Pollution. *Diagnostics State.* Yekaterinburg: UrO RAN; 2004.
19. Tuzhilkina VV. The response of the pigment system of conifers to long-term aerotechnogenic pollution. *Rus J Ecol.* 2009;4:243-8.

