

ДИНАМИКА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ФЛАВОНОЛОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA* ROTH) В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

О.В. Тагирова, А.Ю. Кулагин, Р.С. Иванов

Уфимский Институт биологии — обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

* Эл. почта: olecyi@mail.ru, coolagin@list.ru

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; принята к печати 22.08.2025

Исследована динамика содержания флавонолов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающей в условиях промышленного загрязнения. Исследования проведены в пределах Уфимского промышленного центра (УПЦ) на постоянных пробных площадях на маркированных листьях модельных деревьев березы в течение вегетационного периода 2022 года. В течение июня-июля-августа-сентября были произведены измерения индекса эпидермальных флавонолов (ИЭФ) в листьях (1882 измерения) с использованием портативного прибора «Dualox Scientific+» (точность определения адсорбции 5%). Показано, что в промышленной зоне УПЦ с выраженным углеводородным типом загрязнения окружающей среды у березы повислой среднелистной и мелколистной формы на адаксиальной стороне листьев ИЭФ значительно более высокий при сравнении с абаксиальной стороной. В сочетании с повышенным содержанием флавонолов в основании листьев в условиях УПЦ это свидетельствует об адаптивных реакциях ассимиляционных органов на загрязнение окружающей среды.

Ключевые слова: флавонолы, сезонная динамика, береза, загрязнение.

DYNAMICS AND VARIABILITY OF FLAVONOL CONTENT IN SILVER BIRCH (*BETULA PENDULA* ROTH) LEAVES UNDER INDUSTRIAL POLLUTION

O.V. Tagirova, A.Yu. Kulagin, R.S. Ivanov

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

Email: olecyi@mail.ru; coolagin@list.ru

The article presents the results of studies on the dynamics of flavonol content in the leaves of silver birch (*Betula pendula* Roth) growing under conditions of industrial pollution. The studies were conducted within the Ufa Industrial Center (UIC) on permanent test plots on marked leaves on model birch trees during the vegetation period of 2022. During June-July-August-September, measurements of the epidermal flavonol index (EFI) in birch leaves (1882 measurements) were made using a portable Dualox Scientific+ device (adsorption detection accuracy is 5%). It is shown that in the industrial zone of the UIC with a pronounced hydrocarbon type of environmental pollution, the EFI on the adaxial side of the leaves of medium-leaved and small-leaved silver birch is significantly higher than on the abaxial side of the leaves. The increased content of flavonols at the base of leaves under UIC conditions also indicates adaptive reactions of assimilation organs to environmental pollution.

Keywords: flavonols, seasonal dynamics, silver birch, medium-leaved and small-leaved forms, industrial pollution.

Введение

В растениях фенольные соединения выполняют различные функции и принимают участие во многих физиологических процессах: фотосинтез, дыхание, рост, защитные реакции растений и др. [10, 19, 20]. Большое количество фенольных соединений в листьях и генеративных органах растений [1] связывают с участием таких соединений в обеспечении продуктивности и устойчивости растений и их адаптации к действию критических факторов [5, 21, 22]. В целом древесные растения не являются распространенными объектами исследований как источники флавоноидов для фармацевтических целей. Однако при изучении динамики накопления флавоноидов в листьях ольхи серой и результатов количественного определения флавоноидов показано, что максимальное содержание биологически активных соединений приходится на период с начала мая до начала июля. Этот период рекомендован для заготовки листьев ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench) [11]. Установлено, что наибольшее суммарное содержание флавоноидов в листьях тополя черного (*Populus nigra* L.), дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), ореха грецкого (*Juglans regia* L.) отмечается в конце мая и в начале июня [3, 9, 12].

Береза повислая (*Betula pendula* Roth) является источником различных биологически активных веществ, в том числе были проведены исследования количественного содержания флавоноидов в листьях березы [6, 17]. Показано, что уровень освещенности местообитания берез фактически не оказывает влияние на качественный состав флавоноидов в листьях, но отражается на их количественном составе [2, 20, 21]. Проведена оценка влияния антропогенных факторов на состояние растений (стационарные источники, передвижные источники загрязнения) [8], на содержание флавоноидов в листьях берез и было установлено, что в неблагоприятных экологических условиях снижается содержание флавоноидов в листьях [15, 18]. Отмечено, что в листьях березы повислой в период с мая по август максимальное содержание флавоноидов приходится на конец мая, что связывается с основной функцией флавоноидов – защита эпидермальных тканей от

ультрафиолетовой радиации [10, 21, 22]. Следует отметить, что морфологические различия листьев древесных растений определяют устойчивость к экстремальным природным и техногенным факторам: мелколистные формы адаптированы к почвенной и атмосферной засухе, в меньшей степени повреждаются атмосферными промышленными загрязнителями [7, 16].

Для анализа флавоноидов в растениях используются как правило срезанные листья, что не позволяет охарактеризовать сезонную динамику содержания флавоноидов с учетом морфологической изменчивости листьев и отдельных растений. Представляется целесообразным проведение исследований сезонной динамики содержания физиологически активных соединений на маркированных листьях модельных деревьев березы с учетом формовой принадлежности [14]. Фрагментарные исследования изменчивости содержания флавоноидов в листьях березы обуславливают целесообразность характеристики сезонной динамики содержания флавоноидов с использованием методов неразрушающего анализа в условиях промышленного загрязнения окружающей среды это позволит оценить возможный вклад этих соединений в адаптацию растений к экстремальным условиям произрастания.

Цель работы – изучить сезонную динамику и характер изменений содержания флавоноидов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях загрязнения окружающей среды на территории Уфимского промышленного центра.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – насаждения березы повислой в промышленной и селитебно-рекреационной зонах Уфимского промышленного центра (УПЦ). Исследования выполнены на постоянных пробных площадях (ПП) (рис. 1) на маркированных деревьях березы в течение вегетационного периода 2022 года. ПП1 заложена в непосредственной близости к нефтеперерабатывающим предприятиям, а ПП11 – в зоне относительного контроля на удалении 10-15 км от группы нефтеперерабатывающих предприятий в селитебно-рекреационной зоне УПЦ. В 2010 году при закладке ПП для проведения систематических исследований были выделены и пронумерованы деревья (ПП1 – №8 дерево среднелистной формы и №10 дерево мелколистной формы; ПП11 – №11 дерево среднелистной формы и №12 дерево мелколистной формы). Подробная характеристика пробных площадей и модельных деревьев представлена ранее [13].

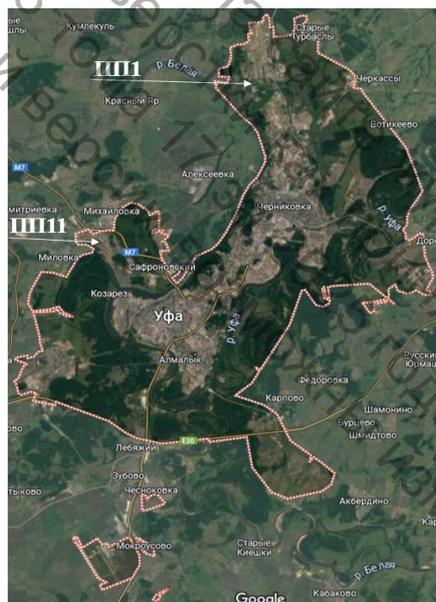


Рис. 1. Картосхема Уфимского промышленного центра с указанием местоположения постоянных пробных площадей (<https://www.google.ru/maps>)

На каждом дереве в нижней части кроны на брахибластах были выделены и пронумерованы листья (по 10 листьев на каждом дереве). На каждом листе содержание флавоноидов оценивали в 12 точках в межжилковом пространстве: на адаксиальной и абаксиальной сторонах листа, на левой и правой половине листа, в верхней, средней части и в основании листа (общее число измерений 7680). В течение с июнь по сентябрь 2022 года (ежемесячно в одни и те же сроки и на пронумерованных листьях) были произведены измерения содержания флавоноидов в листьях березы с использованием портативного прибора «Dualex Scientific+» («Force-A», Франция) [14].

Оценка содержания флавоноидов в эпидермисе основана на физическом эффекте экранирования флуоресценции, который реализован в работе прибора «Dualex Scientific+» и выражается в единицах относительной абсорбции. Численно результаты представлены как индекс эпидермальных флавоноидов (ИЭФ, у.е.). Измерения проводились в диапазоне 0,00–3,00 ИЭФ (в расчете на сырую массу), точность определения адсорбции – 5%.

По климатическим условиям в вегетационный период 2022 года не отмечены резкие перепады температур, экстремально низкие или экстремально высокие температуры, засухи, выпадения большого количества осадков. По материалам Государственного доклада «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2022 году» (Уфа, 2023) в целом 2022 год характеризовался как умеренно теплый. Минимальная температура воздуха на территории УПЦ в вегетационный период 2022 года была в мае месяце и в сентябре (-2°C и -4°C , соответственно). Максимальная температура воздуха была в период с июля по сентябрь месяцы ($+32^{\circ}\text{C}$, $+31^{\circ}\text{C}$ и $+32^{\circ}\text{C}$, соответственно). Наибольший средний показатель влажности воздуха в течении вегетационного периода в 2022 году был в июне месяце и составлял 74% (в сентябре – 72%); минимальный показатель влажности был в сентябре месяце и составил 15%.

Климатические условия вегетационного периода 2022 года позволили минимизировать их вклад в изменчивость содержания флавонолов в листьях березы и сделать акцент на влиянии промышленного загрязнения и формового разнообразия листьев (среднелистная и мелколистная формы).

Статистическая обработка результатов исследований производилась в программах Excel и Graph Pad Prism [4].

Результаты исследования и их обсуждение

По материалам Государственного доклада «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2022 году» (Уфа, 2023) в 2022 году уровень загрязнения атмосферы в соответствии с критериями СанПин 2.1.6.3492-21 в УПЦ характеризуется как высокий. В итоговое значение индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) входят парциальные доли ИЗА по формальдегиду, взвешенным веществам, диоксиду азота, бензапирену, существенный вклад в ИЗА привносит хлорид водорода.

Установлено, что для березы среднелистной формы среднее значение показателя ИЭФ в листьях (с июня по сентябрь) выше на территории промышленной зоны (ПП1) и составляет 1,20 у.е., в то время как на территории селитебно-рекреационной зоны – 1,04 у.е. Выявлены статистически значимые различия между среднелистными формами березы для промышленной зоны и селитебно-рекреационной зоны (табл. 1).

Табл. 1

Индекс эпидермальных флавонолов (ИЭФ, у.е) в листьях березы повислой среднелистной и мелколистной формы в июне–сентябре в промышленной (ПП1) и селитебно-рекреационной (ПП11) зонах Уфимского промышленного центра

Месяц	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
Среднелистная форма								
№ дерева	ПП1 д.8	ПП11 д.11						
$M \pm m$	1,18 \pm 0,03	1,04 \pm 0,01	1,19 \pm 0,03	1,06 \pm 0,01	1,23 \pm 0,03	1,06 \pm 0,01	1,19 \pm 0,03	1,006 \pm 0,009
P (T-тест)	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
Мелколистная форма								
№ дерева	ПП1 д.10	ПП11 д.12						
$M \pm m$	1,14 \pm 0,02	1,12 \pm 0,02	1,17 \pm 0,02	1,11 \pm 0,01	1,20 \pm 0,02	1,13 \pm 0,01	1,18 \pm 0,02	1,06 \pm 0,01
P (T-тест)	0,3417		0,0097		0,0014		<0,0001	

У мелколистных форм наибольший показатель среднего значения ИЭФ в листьях (с июня по сентябрь) выше на территории промышленной зоны (ПП1) и составляет 1,17 у.е., а на территории селитебно-рекреационной зоны – 1,13 у.е. Различия в значениях ИЭФ достигают статистической значимости в сентябре (табл. 1).

ИЭФ в листьях березы повислой в июне-сентябре месяцах в промышленной и селитебно-рекреационной зонах (ПП1 и ПП11) выше в основании листьев как у среднелистных, так и у мелколистных форм деревьев (табл. 2). С июня по сентябрь ИЭФ в листьях березы на территории промышленной зоны (ПП1) у дерева среднелистной формы был выше в основании листьев (табл. 2). С июня по август ИЭФ увеличивается, а в сентябре незначительно снижается. С июня по сентябрь ИЭФ в листьях березы повислой на территории промышленной зоны (ПП1) у дерева мелколистной формы был выше в основании листьев (табл. 2). С июня по август содержание флавонолов увеличивается, а в сентябре снижается. С июня по июль месяц ИЭФ в листьях березы на территории селитебно-рекреационной зоны (ПП11) у дерева среднелистной формы был выше в основании листьев (табл. 2), в августе и сентябре месяцах - в середине листа. Следует отметить, что в условиях промышленной зоны изменчивость ИЭФ в сезонной динамике выражена для листьев березы среднелистной формы (коэффициент изменчивости CV 23,36–27,14%) и мелколистной формы (CV 17,85–21,71%). При этом в селитебно-рекреационной зоне изменчивость ИЭФ в листьях значительно ниже – CV не превышает 13,35% и 19,62%, соответственно (табл. 2). Повышенная изменчивость ИЭФ в листьях березы может рассматриваться как проявление адаптивных реакций на промышленное загрязнение.

Табл. 2

Описательная статистика сезонной динамики индекса эпидермальных флавонолов (ИЭФ, у.е.) в листьях (вершина, середина и основание листа) березы повислой (*Betula pendula* Roth) среднелистной и мелколистной формы в июне-сентябре в промышленной (ПП1) и селитебно-рекреационной (ПП11) зонах Уфимского промышленного центра

Показатель	Месяц											
	Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
<i>ПП1 дерево 8 среднелистная форма (июнь-сентябрь)</i>												
	В	С	О	В	С	О	В	С	О	В	С	О
M ± m	1,18± 0,05	1,18± 0,05	1,17± 0,05	1,19± 0,05	1,18± 0,05	1,21± 0,05	1,21± 0,05	1,21± 0,05	1,24± 0,05	1,18± 0,05	1,19± 0,05	1,20± 0,04
CV, %	27,14	26,67	24,87	25,71	27,88	24,56	25,00	24,54	24,58	25,33	25,64	23,36
<i>ПП1 дерево 10 мелколистная форма (июнь-сентябрь)</i>												
M ± m	1,13± 0,03	1,15± 0,04	1,16± 0,04	1,16± 0,03	1,17± 0,03	1,20± 0,04	1,19± 0,04	1,20± 0,04	1,22± 0,04	1,17± 0,04	1,18± 0,04	1,19± 0,04
CV, %	19,20	19,84	20,26	17,85	18,17	21,71	18,37	18,59	18,66	19,55	20,82	20,35
<i>ПП11 дерево 11 среднелистная форма (июнь-сентябрь)</i>												
M ± m	1,04± 0,02	1,04± 0,02	1,05± 0,02	1,05± 0,02	1,06± 0,02	1,07± 0,02	1,05± 0,02	1,06± 0,02	1,06± 0,02	1,00± 0,01	1,01± 0,02	1,01± 0,02
CV, %	12,72	12,91	13,35	10,63	11,79	11,64	10,01	10,90	12,01	8,751	9,782	10,86
<i>ПП11 дерево 12 мелколистная форма (июнь-сентябрь)</i>												
M ± m	1,10± 0,02	1,11± 0,02	1,15± 0,04	1,11± 0,02	1,11± 0,02	1,12± 0,02	1,13± 0,02	1,12± 0,02	1,12± 0,02	1,08± 0,03	1,06± 0,02	1,05± 0,03
CV, %	13,70	12,29	19,62	13,39	13,03	12,17	12,29	13,16	12,30	13,95	13,65	14,62

Примечание: ПП1 – промышленная зона, ПП11 – селитебно-рекреационная зона; В – вершина, С – середина и О – основание листа.

ИЭФ на территории УПЦ в листьях березы повислой выше на адаксиальной стороне (табл. 3).

Табл. 3

Индекс эпидермальных флавонолов (ИЭФ, у.е.) на адаксиальной и абаксиальной сторонах листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) среднелистной формы и мелколистной в июне-сентябре в промышленной зоне (ПП1) и селитебно-рекреационной зоне (ПП11) Уфимского промышленного центра

Показатель	Адаксиальная сторона листа				Абаксиальная сторона листа			
	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
<i>ПП1 дерево 8 среднелистная форма</i>								
M ± m	1,48±0,01	1,48±0,02	1,50±0,01	1,47±0,01	0,89±0,01	0,91±0,01	0,94±0,01	0,91±0,01
Июнь-сентябрь								
M ± m	1,48±0,01				0,91±0,01			
P (Т-тест)	<0,0001							
<i>ПП11 дерево 10 мелколистная форма</i>								
M ± m	1,35±0,02	1,36±0,01	1,40±0,01	1,40±0,01	0,94±0,01	0,99±0,02	1,00±0,01	0,96±0,01
Июнь-сентябрь								
M ± m	1,38±0,01				0,97±0,01			
P (Т-тест)	<0,0001							
<i>ПП11, дерево 11 среднелистная форма</i>								
M ± m	1,15±0,01	1,15±0,01	1,14±0,01	1,08±0,01	0,94±0,01	0,97±0,01	0,97±0,01	0,94±0,01
Июнь-сентябрь								
M ± m	1,13±0,01				0,95±0,01			
P (Т-тест)	<0,0001							
<i>ПП11 дерево 12 мелколистная форма</i>								
M ± m	1,23±0,02	1,20±0,02	1,21±0,02	1,14±0,02	1,01±0,01	1,02±0,01	1,04±0,01	1,00±0,01
Июнь-сентябрь								
M ± m	1,20±0,01				1,02±0,01			
P (Т-тест)	<0,0001							

Значимость различий ИЭФ выявлена при сравнении результатов, полученных за период июнь-сентябрь для листьев среднелистных и мелколистных форм деревьев березы по промышленной зоне (ПП1 – д.8, д.10) и по селитебно-рекреационной зоне (ПП11 – д.11, д.12). Наиболее высокая статистическая значимость различий выявлена при проведении анализа для каждого отдельного месяца (июнь-сентябрь).

Заключение

Впервые применен методический подход, основанный на учете сезонных изменений на модельных листьях модельных деревьев. Выявлен адаптивный характер изменений содержания флавонолов в листьях березы повислой в условиях промышленного загрязнения.

Установлено, что в условиях промышленной зоны УПЦ с выраженным углеводородным типом загрязнения окружающей среды значения ИЭФ в листьях (с июня по сентябрь) выше у дерева среднелистной формы. Показано, что ИЭФ в листьях деревьев среднелистной и мелколистной форм выше в основании листьев. Среднее значение ИЭФ в листьях (с июня по сентябрь месяц) деревьев среднелистной и мелколистной форм выше на адаксиальной стороне.

На территории рекреационной зоны показатель среднего значения ИЭФ в листьях (с июня по сентябрь) выше у дерева мелколистной формы. ИЭФ в листьях дерева среднелистной формы был незначительно выше в основании листьев. С июня по июль ИЭФ в листьях березы дерева мелколистной формы был выше в основании листьев.

Известно, что повреждения ассимиляционных органов растений промышленными загрязнителями характеризуются апикальными и краевыми некрозами. Верхняя поверхность листьев подвергается негативному воздействию природного и техногенного характера, а основание листа сохраняет функциональное состояние в течение вегетационного периода. Повышенное содержание флавонолов в основании листа и на адаксиальной стороне листа свидетельствует об адаптивных реакциях ассимиляционных органов березы повислой на загрязнение окружающей среды.

Благодарности. В работе использована приборная база Центра коллективного пользования «Агидель» УФИЦ РАН.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00570-24-01 по теме № 123020700152-5 «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.

Литература

1. Вольнец АП. Фенольные соединения в жизнедеятельности растений. Минск: Беларуская Навука; 2013.
2. Демина ГВ, Хазиев РШ, Егорова РВ. Особенности накопления и качественный состав флавоноидов в листьях и почках *Betula L.* Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. 2013;155(3):155-61.
3. Зименкина НИ. Оценка количественного содержания и динамики накопления биологически активных соединений в листьях ореха грецкого. В кн.: От биохимии растений к биохимии человека: Международная научная конференция, Москва, 16–17 июня 2022 г. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений; 2022. С. 167-74. DOI 10.52101/9785870191041_167.
4. Ивантер ЭВ, Коросов АВ. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ; 2014.
5. Колтунов ЕВ. Влияние стволовой гнили на состав и содержание фенольных соединений в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth). Химия растительного сырья. 2019;3:169-76. DOI 10.14258/jcrpm.2019034527.
6. Кудрявцев ГП, Мусатова ОВ. Флавоноиды листьев березы бородавчатой и дуба черешчатого разного физиологического состояния. Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 2000; 2(16):76-79.
7. Кулагин АЮ, Ишбирдин АР, Тагирова ОВ. Адаптационная изменчивость ивы белой (*Salix alba* L.) в условиях техногенного загрязнения окружающей среды (регион Южного Урала). Известия Саратовского университета. 2020;(1):90-101.
8. Кулагин Ю.З. Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование. М.: Наука; 1980.
9. Куприянова ЕА, Куркин ВА. Динамика накопления суммы флавоноидов в листьях тополя черного (*Populus nigra* L.). В кн.: Современные тенденции развития технологий здоровьесбережения: Сборник трудов Седьмой научной конференции с международным участием, Москва, 19 декабря 2019 года. Том 12. Москва: ФГБНУ ВИЛАР; 2019. С. 208-11.
10. Мазец ЖЭ, Бузук ГН, Спиридович ЕВ, Шаститко ЛВ. Динамика накопления соединений фенольной природы в листьях *Betula pendula*. Весці БДПУ. Серыя 3. Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. 2010;3(65):3-7.
11. Мушкина ОВ, Гурина НС. Количественное определение флавоноидов и динамика их накопления в листьях ольхи серой. Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 2008;4(50):138-43.
12. Рябов НА. Изучение динамики накопления флавоноидов в листьях дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). В кн.: От биохимии растений к биохимии человека: Международная научная конференция, Москва, 16–17 июня 2022 года. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений; 2022. С. 232-6. DOI 10.52101/9785870191041_232.

13. Тагирова ОВ. Относительное жизненное состояние насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Уфимского промышленного центра: изменения за период 2010–2022 гг. Леса России и хозяйство в них. 2024;1(88):83-92. DOI 10.51318/FRET.2023.88.1.008.
14. Тагирова ОВ, Иванов Р С, Кулагин АЮ. Сезонная динамика содержания хлорофиллов в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024;3(63): 55-70. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.55>
15. Ханина МА, Гусельникова ЕН, Родин АП, Лигостаева ЮВ. Загрязнение окружающей среды и биологически активные вещества листьев березы. Медицина и образование в Сибири. 2015;6:9.
16. Цельникер ЮЛ. Баланс органического вещества в онтогенезе листа у лиственных деревьев. Физиология растений. 1986;33(5):40-51.
17. Цибизова АА, Сергалиева МУ. Количественное определение флавоноидов в листьях березы. В кн: Наука. Исследования. Практика. Сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции. СПб; 2020. С. 136-38.
18. Шавнин СА, Колтунов ЕВ, Яковлева МИ. Влияние техногенного загрязнения на содержание фенольных соединений в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях урбанизации. Современные проблемы науки и образования. 2014;2. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=12871>
19. Cheynier V, Comte G, Davies KM, Lattanzio V, Martens S. Plant phenolics: recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. *Plant Physiol Biochem*. 2013;72:1-20.
20. Mattila H, Sotoudehnia P, Kuuslampi T. et al. Singlet oxygen, flavonols and photoinhibition in green and senescing silver birch leaves. *Trees*. 2021;35:1267-82.
21. Morales LO, Tegelberg R, Brosche M, Kemanen M, Lindfors A, Aphalo PJ. Effects of solar UV-A and UV-B radiation on gene expression and phenolic accumulation in *Betula pendula* leaves. *Tree Physiol*. 2010;30:923-34.
22. Ferreyra MLF, Serra P, Casati P. Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. *Physiologia Plantarum*. 2021;173(3): 736-749.

Редакция журнала "Биосфера" и верстка как принята к печати
 17 за 2025 год.
 Возможны изменения