

Научная статья

УДК 630*164.5: 630*181: 582.09

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.55>

EDN: PRXZRD

Сезонная динамика содержания хлорофиллов в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения

О. В. Тагирова[✉], Р. С. Иванов, А. Ю. Кулагин

Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Уфимский институт биологии,

Российская Федерация, 450054, Уфа, пр. Октября, 69

olecyi@mail.ru[✉]

Аннотация. *Введение.* Древесные растения, произрастающие на территориях промышленных центров, вносят вклад в оптимизацию состояния окружающей среды, выполняют средостабилизирующие и защитные функции, улучшают условия жизни людей. Остаётся открытым вопрос о сезонной динамике содержания фотосинтетических пигментов в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) – вида устойчивого к действию экстремальных природных и техногенных факторов. *Материалы и методы.* Уфимский промышленный центр (УПЦ) – город с населением более 1 млн. человек, где расположено свыше 700 предприятий. Климат города Уфы и его окрестностей относится к умеренной климатической зоне с континентальным климатом. Природно-климатические условия 2022 года характеризуются средними многолетними показателями. В 2022 году по критериям СанПин 2.1.6.3492-21 уровень загрязнения атмосферы в г. Уфе характеризовался как «высокий». *Цель работы* – определить содержание хлорофиллов в листьях берёзы в период с июня по сентябрь на территории УПЦ. *Задачи:* 1) определить содержание хлорофиллов в листьях берёзы в течение вегетационного периода в промышленной и селитебной зонах; 2) определить содержание хлорофиллов у среднелистных деревьев берёзы; 3) определить содержание хлорофиллов у мелколистных деревьев берёзы. *Объект исследования* – насаждения берёзы в промышленной и селитебной зонах УПЦ. На модельных деревьях в нижней части кроны были выделены и пронумерованы листья (по 10 листьев на каждом дереве). Для обеспечения репрезентативности фактических данных на каждом листе содержание хлорофиллов определяли в 12 точках в межжилковом пространстве – 6 на адаксиальной стороне листа, на левой и правой половине листа, в верхней, средней части и в основании листа; 6 на абаксиальной стороне листа, на левой и правой половине листа, в верхней, средней части и в основании листа. В течение июня-июля-августа-сентября 2022 года (ежемесячно в одни и те же сроки на пронумерованных листьях) были произведены измерения содержания хлорофиллов ($a+b$) в листьях берёзы с использованием прибора Dualox Scientific+ (Force-A, Франция). *Результаты и обсуждение.* Показатель среднего значения содержания хлорофиллов в листьях берёзы (с июня по сентябрь) на территориях промышленной и селитебно-рекреационной зоны выше в сентябре 2022 года. При сравнении содержания хлорофиллов у среднелистных деревьев берёзы установлено, что среднее содержание хлорофиллов в листьях (в период с июня по сентябрь) выше на территории селитебно-рекреационной зоны. При сравнении содержания хлорофиллов у мелколистных деревьев берёзы показатель среднего значения содержания хлорофиллов в листьях (с июня по сентябрь) выше на территории промышленной зоны. *Выводы и заключение.* На основании полученных сведений о сезонной динамике изменений содержания хлорофиллов в листьях можно заключить, что в условиях загрязнения окружающей среды отмечается успешная адаптивная настройка хлорофилл-белкового комплекса ассимиляционного аппарата деревьев берёзы. При этом мелколистная форма берёзы выделяется более высокой изменчивостью содержания хлорофиллов в листьях в течение вегетационного периода как в селитебной, так и в промышленной зонах, что является проявлением адаптивных реакций на условия произрастания.

Ключевые слова: берёза повислая; городские и санитарно-защитные насаждения; изменчивость содержания фотосинтетических пигментов; вегетационный период; адаптация

Финансирование: работы выполнены на оборудовании центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учётом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».

Для цитирования: Тагирова О. В., Иванов Р. С., Кулагин А. Ю. 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). С. 55–70. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.55>; EDN: PRXZRD

Введение

Древесные растения, произрастающие на территориях промышленных центров, вносят вклад в оптимизацию состояния окружающей среды, выполняют средообразующие и защитные функции, улучшают условия жизни людей [1]. Характеристика особенностей адаптации древесных растений к изменениям природно-климатических показателей на фоне действия промышленных загрязнителей представляет интерес при прогнозировании устойчивости и длительности произрастания насаждений в условиях современного промышленного города [2]. Для древесных растений характерно изменение продуктивности на различных этапах онтогенеза и в зависимости от лесорастительных условий [3]. Показано, что у листопадных деревьев в течение вегетационного периода изменяется устойчивость к промышленным загрязнителям [4]. При оценке изменчивости берёзы повислой показано, что распространены среднелистные и мелколистные формы [5].

Известно, что продукционный процесс связан с содержанием хлорофиллов в ассимиляционных органах. Содержание хлорофилла в листьях и эффективность фотосинтеза растений зависит от факторов окружающей среды (свет, температура, вода, состав атмосферного воздуха, минеральное питание). Отмечено, что на содержание хлорофилла в листьях влияют антропогенные факторы (расположение деревьев в непосредственной близости к промышленным предприятиям, вдоль автомагистралей, повышенная рекреационная нагрузка, уплотнение почвенного покрова) [6–8]. Показано, что сочетание действия антропогенных факторов и экстремальных климатических факторов приводит к снижению продуктивности растений [9, 10]. Исследования, выполненные в регионах с отличающимися природно-

климатическими условиями, свидетельствуют, что в промышленных зонах городов происходит снижение содержания хлорофиллов в листьях берёзы повислой [11, 12]. Осаждение газопылевых веществ на поверхности листового аппарата древесных растений приводит к разнонаправленному изменению функционирования пигментной системы [13]. При увеличении продолжительности светового периода (искусственное увеличение светового дня) происходит увеличение содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях, что связано с адаптивными особенностями пигментного аппарата и трансформации светособирающего комплекса [14]. Высказано суждение о защитной роли пигментного комплекса (хлорофиллов и каротиноидов) в увеличении резистентности растений [15]. Фрагментарно исследовались особенности сезонной динамики содержания фотосинтетических пигментов [16, 17]. Изучены и сопоставлены наземные данные и данные дистанционного зондирования о содержании хлорофилла в листьях берёзы повислой в зоне воздействия промышленных предприятий. Получены сведения о пигментном составе листьев отдельных видов, разновидностей и сортов рода Берёза и на основе кластерного анализа показаны различия между отдельными представителями и даны предложения для практического использования в озеленении [18].

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что остаётся открытым вопрос о сезонной динамике содержания фотосинтетических пигментов в листьях берёзы повислой – вида устойчивого к действию экстремальных природных и техногенных факторов.

Материалы и методы

Уфимский промышленный центр – город с населением более 1 млн. человек, где расположено свыше 700 предприятий. В 2022 году в соответствии с критериями

СанПин 2.1.6.3492-21 уровень загрязнения атмосферы в г. Уфе характеризовался как «высокий» – объём выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на территории УПЦ от стационарных источников составил 132,3 тыс. т. Поступление загрязняющих веществ в атмосферу в расчёте на одного жителя города составило 0,116 тонны. Индекс загрязнения атмосферы равен 8 и определяется концентрациями хлорида водорода, формальдегида, диоксида азота, взвешенных веществ и бензапирена¹.

Климат города Уфы и его окрестностей относится к умеренной климатической зоне с континентальным климатом – континентальность составляет 55 %. В целом 2022 год характеризовался как умеренно тёплый. Средняя за год температура воздуха составила +4,0 °С, что выше средних многолетних значений на 0,4 °С. Аномально тёплым, на 6,4 °С выше нормы,

был февраль. Самым холодным, на 3,1 °С ниже нормы, был май^{1,2}. Минимальная температура воздуха на территории УПЦ в вегетационный период 2022 года была в мае и в сентябре (-2 °С и -4 °С соответственно). Максимальная температура воздуха была в период с июля по сентябрь (+32; +31 и +32 °С соответственно) (рис. 1).

Наибольший средний показатель влажности воздуха в течение вегетационного периода в 2022 году был в июне и составлял 74 % (в сентябре – 72 %). Минимальный показатель влажности – в сентябре и составил 15 % (рис. 2). Количество осадков за год превысило норму и составило 109 % от нормы. Самым влажным месяцем в году был ноябрь. В этот период выпала почти двухмесячная норма осадков (193 %), в мае количество осадков составило 185 % от нормы. В августе отмечается дефицит осадков – 11 % от нормы¹.

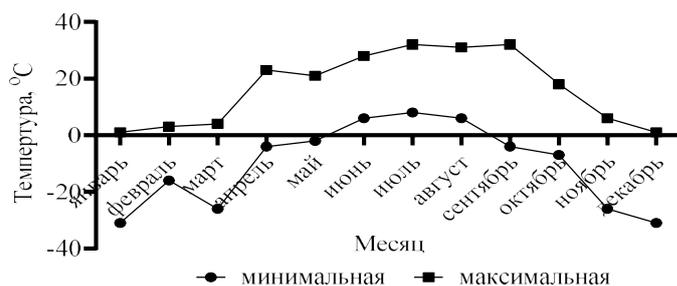


Рис. 1. Температурный режим 2022 года (составлено по URL: <https://rp5.ru/>)
Fig. 1. Temperature regime of 2022 (compiled on the basis of URL: <https://rp5.ru/>)

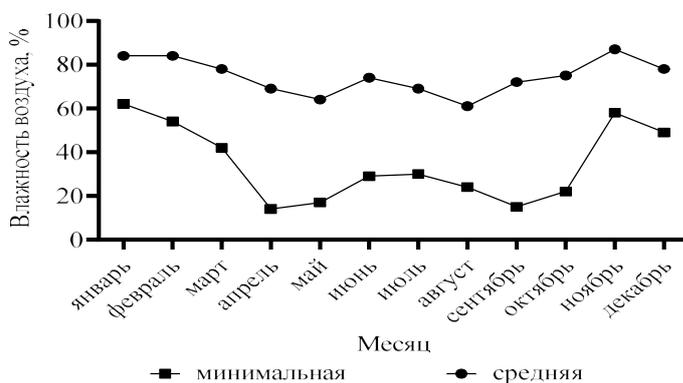


Рис. 2. Влажность воздуха в 2022 году (составлено по URL: <https://rp5.ru/>)
Fig. 2. Air humidity in 2022 (compiled on the basis of URL: <https://rp5.ru/>)

¹ Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2022 году». Уфа, 2023. 318 с.

² Официальный сайт расписания погоды. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 03.02.2024 г.)

Исследования проведены в пределах УПЦ на постоянных пробных площадях (ПП) на маркированных деревьях берёзы в течение вегетационного периода 2022 года [19].

В работе представлены результаты исследований, выполненных на территории двух ПП (ПП1 и ПП11) (рис. 3), расположенных в контрастных лесорастительных условиях.

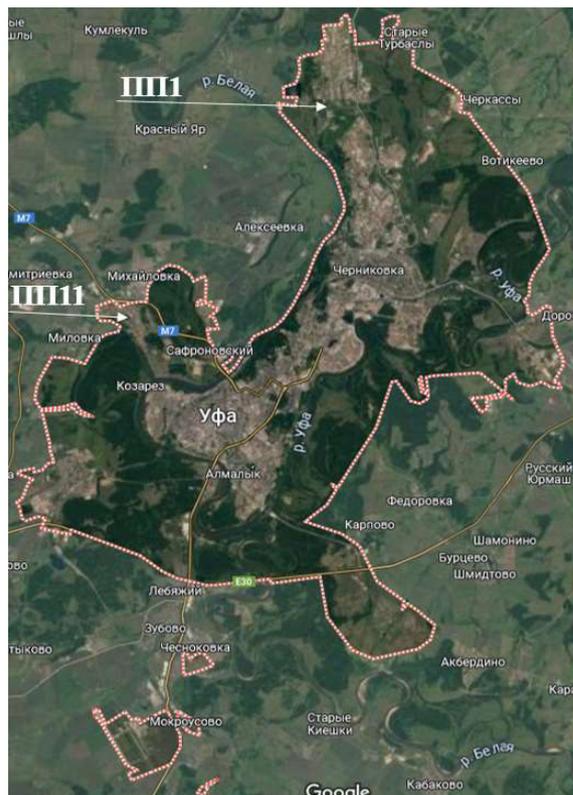


Рис. 3. Картограмма Уфимского промышленного центра с указанием местоположения пробных площадей (составлено по данным Картографического сервиса и технологий, предоставляемых компанией Google – Электронные данные.

URL: <https://www.google.ru/maps/>)

Fig. 3. Map of the Ufa Industrial Center indicating the location of test areas (TAs) (compiled using data of the Mapping service and technologies provided by Google – Electronic data.

URL: <https://www.google.ru/maps/>)

ПП1 заложена в промышленной зоне (ПЗ) в близости к нефтеперерабатывающим предприятиям, а ПП11 – в зоне относительного контроля на удалении 10–15 км от группы нефтеперерабатывающих предприятий в селитебно-рекреационной зоне

(СРЗ) УПЦ. В 2010 году при заложении ПП для проведения систематических исследований были выделены и пронумерованы деревья (ПП1 – среднелиственное дерево № 8 и мелколистное дерево № 10; ПП11 – среднелиственное дерево № 11 и мелколистное дерево № 12). На ПП1 дерево № 8 среднелиственное: высота 14,5 м, диаметр 44 см, возраст 55 лет; на ПП1 дерево № 10 мелколистное: высота 14 м, диаметр 22 см, возраст 55 лет; на ПП11 дерево № 11 среднелиственное: высота 15 м, диаметр 54 см, возраст 58 лет; на ПП11 дерево № 12 мелколистное: высота 13 м, диаметр 42 см, возраст 58 лет.

На каждом дереве в нижней части кроны были выделены и пронумерованы листья на брахибластах (по 10 листьев на каждом дереве). Для обеспечения репрезентативности фактических данных на каждом листе содержание хлорофиллов определяли в 12 точках в межжилковом пространстве: 6 на адаксиальной стороне листа, на левой и правой половине листа, в верхней, средней и основании листа; 6 на абаксиальной стороне листа, на левой и правой половине листа, в верхней, средней и основании листа. В течение июня-июля-августа-сентября 2022 года (ежемесячно в одни и те же сроки и на пронумерованных листьях) были произведены измерения содержания хлорофиллов ($a + b$) в листьях берёзы с использованием портативного прибора Dualex Scientific+ (Force-A, Франция). Данный прибор позволяет в режиме реального времени измерять содержание суммы хлорофиллов в листьях растений. Измерения проводились в диапазоне от 0,00 до 3,00 мкг/см² (в расчёте на сырую массу), точность абсорбции – 5 %.

Статистическая обработка результатов исследований производилась в программах Excel и GraphPad Prism.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях берёзы в течение вегетационного периода в ПЗ и СРЗ изменялось.

Показатель среднего значения содержания хлорофиллов в листьях берёзы (с июня по сентябрь) на территориях ПЗ и СРЗ выше в сентябре 2022 года. Отметим, что этот показатель в сентябре также выше и на территории СРЗ (рис. 4) (достоверность не подтверждена).

Показатель среднего значения содержания хлорофиллов в листьях

берёзы (в период с июня по сентябрь) на территории ПЗ (ПП1) имеет тенденцию к повышению у мелколистного дерева (рис. 5).

Среднее значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (в период с июня по сентябрь) на территории СРЗ (ПП11) выше у среднелистного дерева (рис. 6).

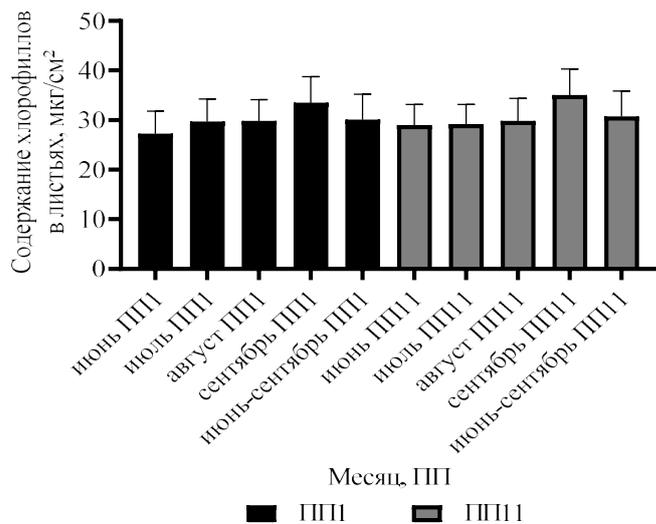


Рис. 4. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в течение вегетационного периода в промышленной (ПП1) и селитебно-рекреационной зонах (ПП11)

Fig. 4. Chlorophyll content (mcg/cm²) in the leaves of silver birch (*Betula pendula* Roth) during the growing season in industrial zone (TA1) and residential-recreational zone (TA11)

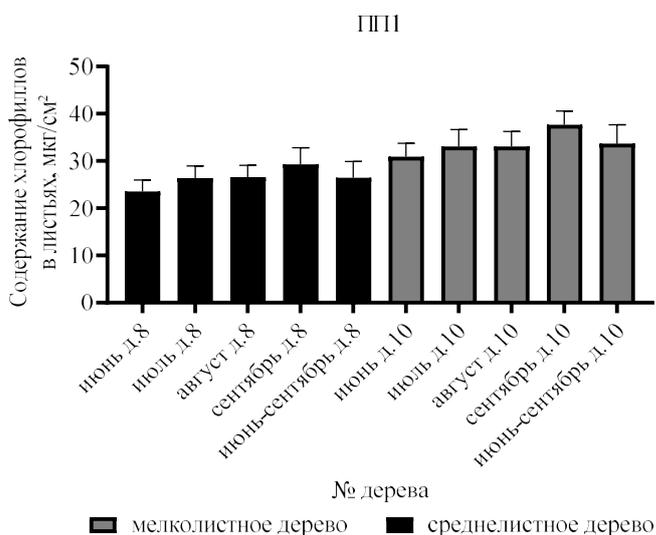


Рис. 5. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в течение вегетационного периода в промышленной зоне (ПП1 – дерево № 8 и дерево № 10) (№ 8 – среднелистное дерево и № 10 – мелколистное дерево)

Fig. 5. Chlorophyll content (mcg/cm²) in the leaves of silver birch (*Betula pendula* Roth) during the growing season in the industrial zone (TA1 – tree No. 8 and tree No. 10) (No. 8 is a medium-leaved tree, No. 10 is a small-leaved tree)

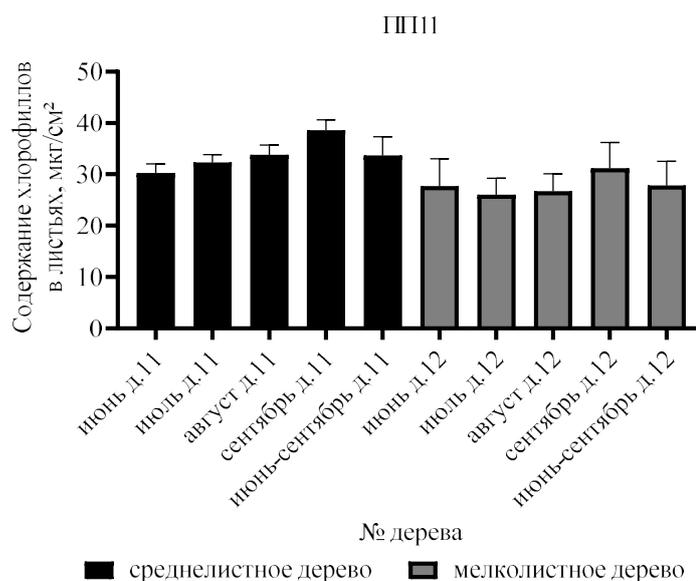


Рис. 6. Содержание хлорофиллов (mcg/cm^2) в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в течение вегетационного периода в селитебно-рекреационной зоне (ПП11 – дерево № 11 и дерево № 12) (№ 11 – среднелиственное дерево и № 12 – мелколистное дерево)

Fig. 6. Chlorophyll content (mcg/cm^2) in the leaves of silver birch (*Betula pendula* Roth) during the growing season in the residential-recreational zone (TA11 – tree No. 11 and tree No. 12) (No. 11 is a medium-leaved tree, No. 12 is a small-leaved tree)

При сравнении содержания хлорофиллов у среднелистных деревьев берёзы (ПП1 и ПП11) установлено, что среднее содержание хлорофиллов в листьях (в период с июня по сентябрь) выше на территории СРЗ (ПП11).

При сравнении содержания хлорофиллов у мелколистных деревьев берёзы показатель среднего значения содержания хлорофиллов в листьях (с июня по сентябрь) выше на территории ПЗ (ПП1).

Максимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (в период с июня по сентябрь) на территории ПЗ (ПП1) у дерева № 8 (среднелистного) варьируется в диапазоне 28,5 – 36 mcg/cm^2 . С июня по июль содержание хлорофиллов увеличивалось с 28,5 до 36 mcg/cm^2 , к августу уменьшалось и составляло 31,5 mcg/cm^2 , а к сентябрю снова увеличивалось и составляло 35,8 mcg/cm^2 . Минимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (с июня по сентябрь) на территории ПЗ (ПП1) у дерева № 8 (среднелистного) варьируется в диапазоне 15,7 – 19,6 mcg/cm^2 . С июня по август со-

держание хлорофиллов увеличивалось с 18,2 до 19,6 mcg/cm^2 , к сентябрю уменьшалось и составляло 15,7 mcg/cm^2 . Коэффициент вариации количественного содержания хлорофиллов с июня по август снижался с 10,33 до 9,506 %, а к сентябрю увеличился до 12,05 %.

Максимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (в период с июня по сентябрь) на территории ПЗ (ПП1) у дерева № 10 (мелколистного) варьируется в диапазоне 36,7 – 55,4 mcg/cm^2 . С июня по июль содержание хлорофиллов увеличивалось с 36,7 до 55,4 mcg/cm^2 , к августу уменьшалось и составляло 38,3 mcg/cm^2 , а к сентябрю снова увеличивалось и составляло 42,4 mcg/cm^2 . Минимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (с июня по сентябрь) на территории ПЗ (ПП1) у дерева № 10 (мелколистного) варьируется в диапазоне 18 – 28,7 mcg/cm^2 . С июня по июль содержание хлорофиллов увеличивалось с 18 до 22,7 mcg/cm^2 , к августу уменьшалось и составляло 18,3 mcg/cm^2 , к сентябрю снова увеличивалось и составляло

28,7 мкг/см². Коэффициент вариации количественного содержания хлорофиллов с июня по июль увеличивался с 9,271 до 10,84 %, а к августу и сентябрю снижался и составил 9,748 и 7,889 %, соответственно.

Максимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (в период с июня по сентябрь) на территории СРЗ (ПП11) у дерева № 11 (среднелистного) варьируется в диапазоне 33,9 – 42,5 мкг/см². С июня по сентябрь содержание хлорофиллов увеличивалось и составляло 33,9; 35,6; 37,2; 42,5 мкг/см², соответственно. Минимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (с июня по сентябрь) на территории СРЗ (ПП11) у дерева № 11 (среднелистного) варьируется в диапазоне 25,1–33,5 мкг/см². С июня по сентябрь содержание хлорофиллов увеличивалось и составляло 25,1; 28; 28,1; 33,5 мкг/см², соответственно. Коэффициент вариации с июня по июль уменьшался с 5,876 до 4,769 %, к августу увеличивался до 5,827 %, а к сентябрю уменьшался до 5,460 %.

Максимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (в период с июня по сентябрь) на территории СРЗ

(ПП11) у дерева № 12 (мелколистного) варьируется в диапазоне 31,8 – 40,2 мкг/см². С июня по июль содержание хлорофиллов уменьшалось с 37,4 до 31,8 мкг/см², к августу и сентябрю увеличивалось и составляло 33,1 и 40,2 мкг/см², соответственно. Минимальное значение содержания хлорофиллов в листьях берёзы (с июня по сентябрь) на территории СРЗ (ПП11) у дерева № 12 (мелколистного) варьируется в диапазоне 14,9 – 20 мкг/см². С июня по июль содержание хлорофиллов увеличивалось с 19 до 20 мкг/см², к августу и сентябрю уменьшалось и составляло 17,8 и 14,9 мкг/см², соответственно. Коэффициент вариации с июня по июль уменьшался с 19,27 до 12,35 %, а к августу–сентябрю увеличивался и составлял 12,82 и 16,22 %, соответственно.

Содержание хлорофиллов в листьях берёзы с июня по сентябрь в ПЗ (ПП1) у среднелистного дерева и у мелколистного дерева несколько выше в основании листа; в СРЗ (ПП11) у среднелистного дерева и у мелколистного дерева содержание хлорофиллов в листьях незначительно выше у вершины листа (рис. 7, 8).

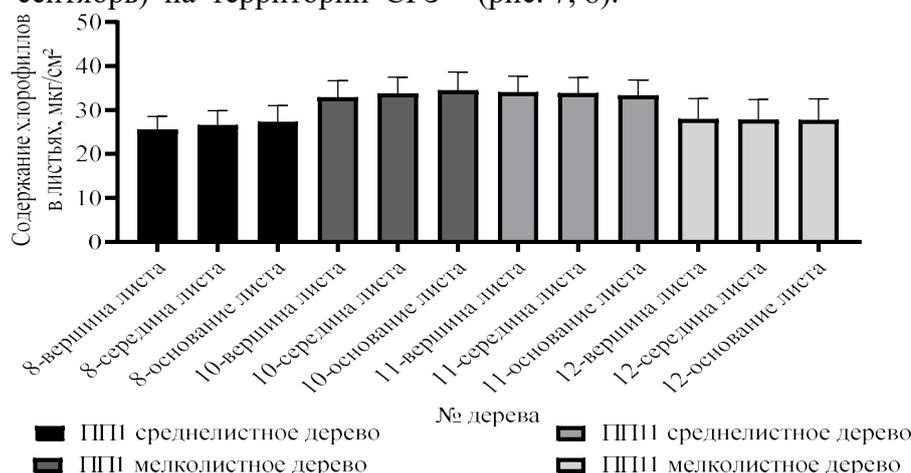


Рис. 7. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в промышленной и селитебно-рекреационной зонах (ПП1 – дерево № 8 и дерево № 10; ПП11 – дерево № 11 и дерево № 12) (№ 8 и № 11 – среднелистные деревья; № 10 и № 12 – мелколистные деревья)

Fig. 7. Chlorophyll content (mcg/cm²) in leaves (the tip, middle and base of the leaf) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in industrial and residential-recreational zones (TA1 – tree No. 8 and tree No. 10; TA11 – tree No. 11 and tree No. 12) (No. 8 and No. 11 are medium-leaved trees, No. 10 and No. 12 are small-leaved trees)

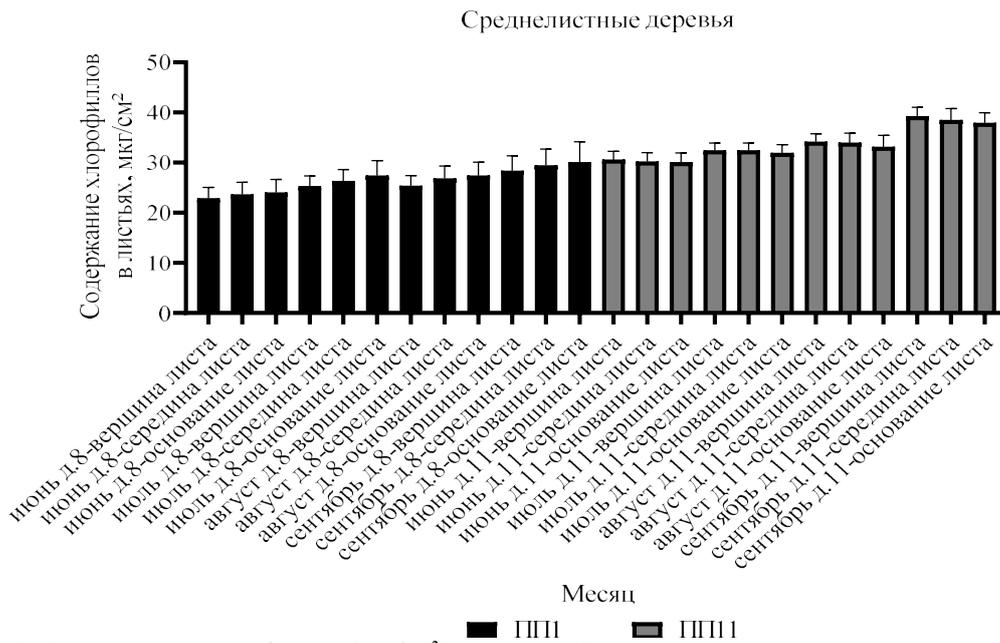


Рис. 8. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в промышленной и селитебно-рекреационной зонах (ППИ – дерево № 8; ППИ1 – дерево № 11) (№ 8 и № 11 – среднелиственные деревья)
 Fig. 8. Chlorophyll content (mcg/cm²) in leaves (the tip, middle and base of the leaf) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in industrial and residential-recreational zones (TAI – tree No. 8; TA11 – tree No. 11) (No. 8 and No. 11 are medium-leaved trees)

С июня по сентябрь содержание хлорофиллов в листьях берёзы на территории ПЗ (ППИ) у среднелистного дерева было выше в основании листьев (рис. 9). В период с июня по сентябрь содержание хлорофиллов незначительно увеличилось.

В июне, июле, августе, сентябре содержание хлорофиллов в листьях берёзы на территории СРЗ (ППИ1) у среднелистного дерева было незначительно выше у вершины листьев (рис. 10). В июле содержание хлорофиллов у вершины и середины листа фактически не различалось.

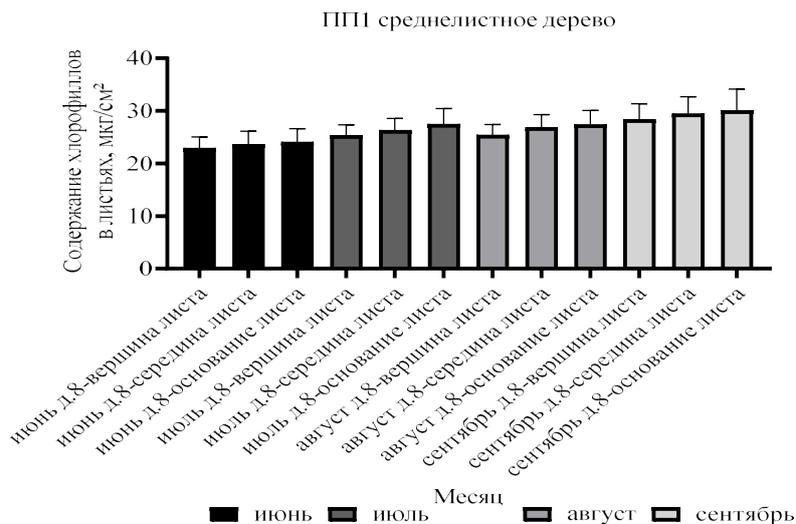


Рис. 9. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в промышленной зоне (ППИ – дерево № 8 среднелиственное)
 Fig. 9. Chlorophyll content (mcg/cm²) in leaves (the tip, middle and base of the leaf) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in the industrial zone (TAI – medium-leaved tree No.8)

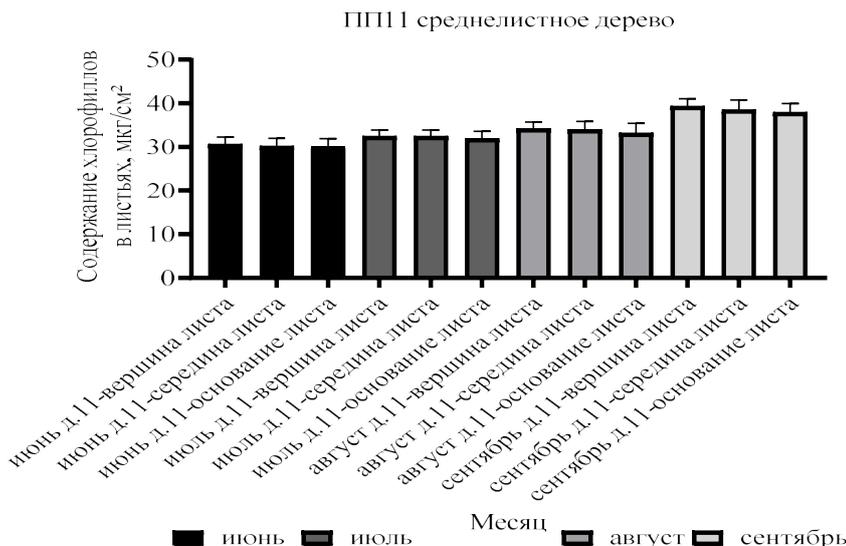


Рис. 10. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в жилой зоне (ТП11 – дерево № 11 среднелистное)
 Fig. 10. Chlorophyll content (mcg/cm²) in the leaves (the tip, middle and base of the leaf) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in the residential zone (TA11 – medium-leaved tree No. 11)

С июня по сентябрь содержание хлорофиллов в листьях берёзы на территории ПЗ (ТП1) у мелколистного дерева было незначительно выше в основании листьев (рис. 11). С июня по июль содержание хлорофиллов незначительно увеличивалось, в августе несколько снижалось в середине и в основании листа, а в сентябре снова увеличивалось.

В июне содержание хлорофиллов в листьях берёзы на территории СРЗ (ТП11) у мелколистного дерева было незначительно выше в основании листьев (рис. 12, 13); в июле, августе и в сентябре содержание хлорофиллов выше у вершины листа. С июня по июль содержание хлорофиллов в листьях незначительно снижалось, а в августе и сентябре увеличивалось.

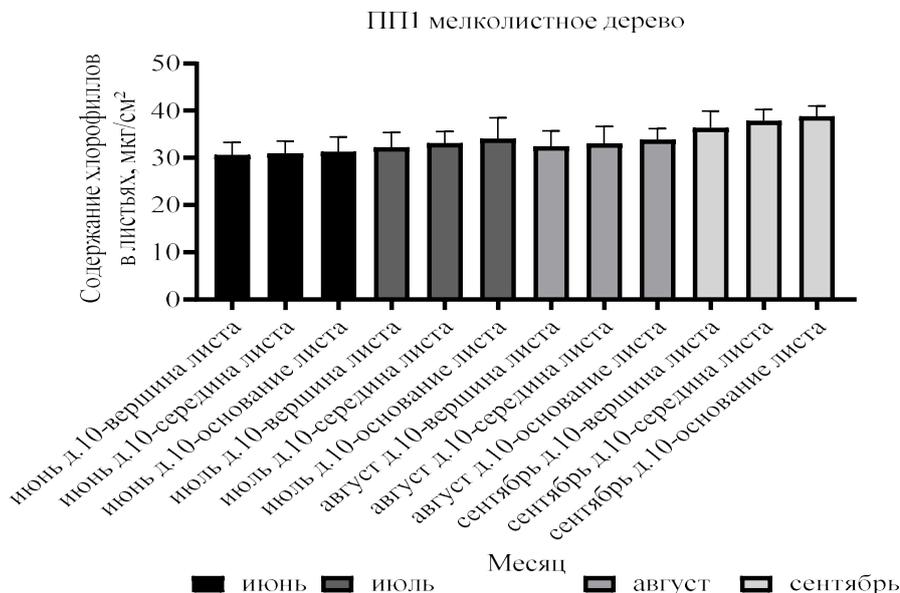


Рис. 11. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в промышленной зоне (ТП1 – дерево № 10 мелколистное)
 Fig. 11. Chlorophyll content (mcg/cm²) in leaves (leaf tip, middle of the leaf, leaf base) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in the industrial zone (TA1 – small-leaved tree No. 10)

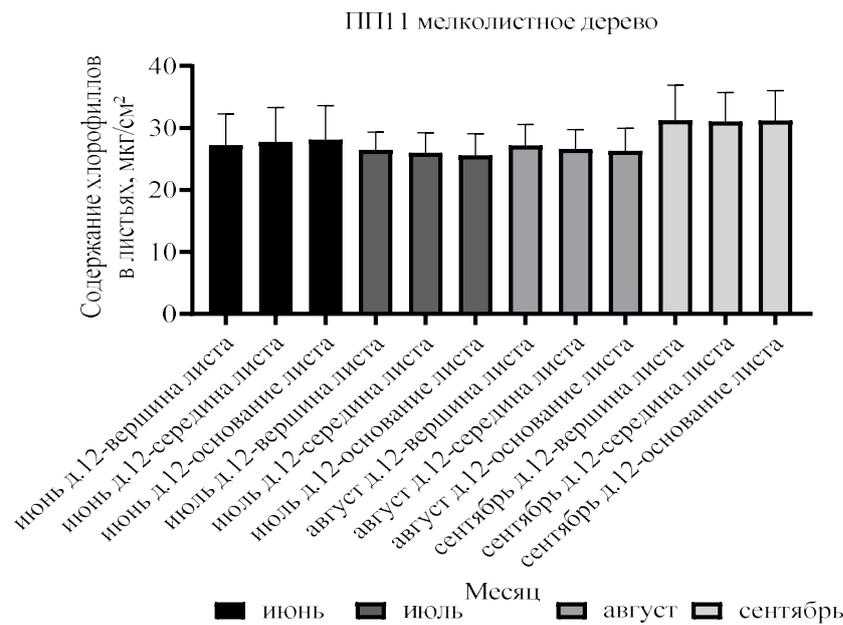


Рис. 12. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в селитебной зоне (ППП1 – дерево № 12 мелколистное)

Fig. 12. Chlorophyll content (mcg/cm²) in leaves (the tip, middle and base of the leaf) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in the residential zone (TA11 – small-leaved tree No. 12)

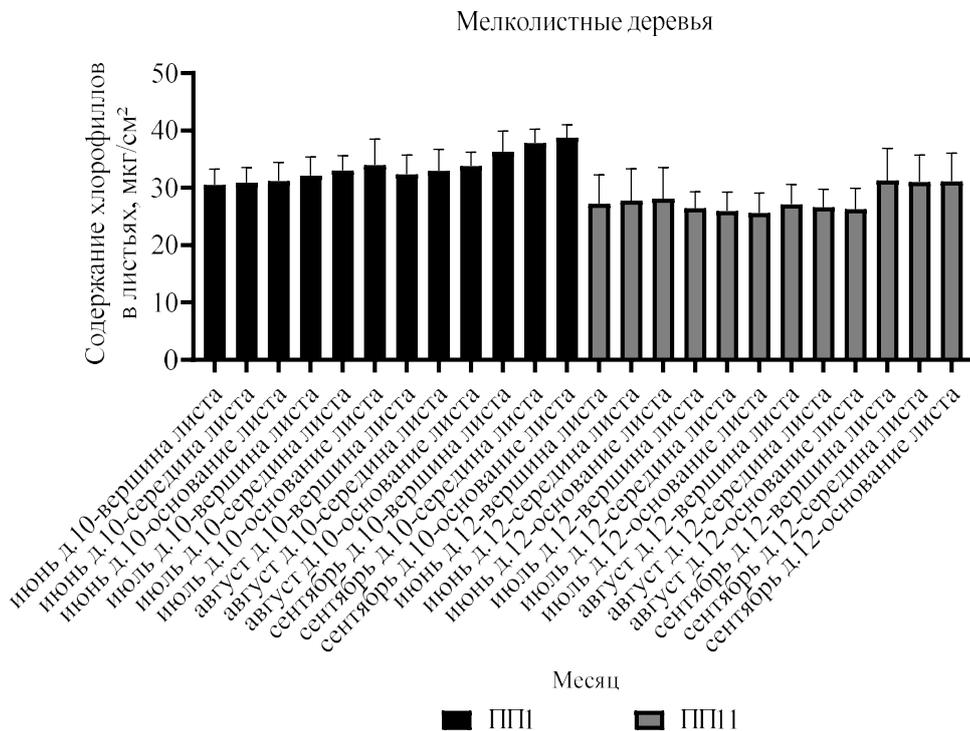


Рис. 13. Содержание хлорофиллов (мкг/см²) в листьях (вершина листа, середина листа, основание листа) берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в июне–сентябре в промышленной и селитебно-рекреационной зонах (ПП1 – дерево № 10; ПП11 – дерево № 12) (№ 10 и № 12 – мелколистное деревья)

Fig. 13. Chlorophyll content (mcg/cm²) in leaves (the tip, middle and base of the leaf) of silver birch (*Betula pendula* Roth) in June–September in industrial and residential- recreational zones (TA1 – tree No. 10; TA11 – tree No. 12) (No. 10 and No.12 are small-leaved trees)

Заключение

На территории ПЗ (ПП1) для среднелистной формы берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) выявлено неравномерное содержание хлорофиллов в листьях в период с июня по сентябрь, и это касается как максимальных, так и минимальных значений. При этом коэффициент вариации содержания хлорофиллов в течение вегетационного периода изменяется незначительно (9,506 – 12,05 %). Для мелколистной формы в период с июня по сентябрь также выявлено неравномерное содержание хлорофиллов (как максимальных, так и минимальных значений) в листьях. При этом коэффициент вариации содержания хлорофиллов в течение вегетационного периода изменялся в пределах 7,889 – 10,84 %.

На территории СРЗ (ПП11) для среднелистной формы берёзы выявлено увеличение содержания хлорофиллов в листьях в течение вегетационного периода – это касается как максимальных, так и минимальных значений. При этом коэффициент вариации содержания хлорофиллов в течение вегетационного периода изменялся незначительно в пределах 4,769 – 5,876 %. Для мелколистной формы берёзы выявлена иная картина динамики содержания хлорофиллов в листьях деревьев берёзы повислой – коэффициент вариации содержания хлорофиллов в течение вегетационного периода изменялся в значительных пределах (12,35 – 19,27 %).

Выявлена неравномерность в содержании хлорофиллов в пределах листовой пластинки. В ПЗ у среднелиственного дерева и у мелколиственного дерева содержание хлорофиллов несколько выше в основании листа, а в условиях селитебной зоны повышенное содержание хлорофиллов отмечалось в верхней части листа. Это согласуется с феноменом повреждения листовых пластинок растений промышленными загрязнителями, который описан как апикальный и краевой некрозы [20, 21].

На основании полученных сведений о сезонной динамике изменений содержания хлорофиллов в листьях можно заключить, что в условиях загрязнения окружающей среды отмечается успешная адаптивная настройка хлорофилл-белкового комплекса ассимиляционного аппарата деревьев берёзы. При этом мелколистная форма берёзы выделялась более высокой изменчивостью содержания и распределения хлорофиллов в листьях в течение вегетационного периода как в СРЗ, так и в ПЗ, что является проявлением адаптивных реакций на условия произрастания. С учётом достаточно высокой устойчивости берёзы к действию экстремальных факторов показано, что реакция ассимиляционных органов растений в зоне воздействия нефтехимического загрязнения и в селитебно-рекреационной зоне обеспечивает длительное успешное произрастание берёзы в условиях современного промышленного центра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тагирова О. В., Кулагин А. Ю. Характеристика состояния древесных насаждений как ландшафтного компонента социально-экологического комплекса города Кумертау (Республика Башкортостан) // Медицина труда и экология человека. 2024. № 1. С. 211–229. DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10113; EDN: NMYDON
2. Кулагин Ю. З. Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование: монография. М.: Наука, 1980. 116 с. EDN: VZNMCV
3. Демаков Ю. П. Влияние факторов среды на рост деревьев в сосняках Республики Марий Эл: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. 480 с. EDN: QIZGAG
4. Кулагин Ю. З. Древесные растения и промышленная среда: монография. М.: Наука, 1974. 124 с. EDN: VZNMBR
5. Махнев А. К., Мамаев С. А. Внутривидовая изменчивость берёз на Урале в связи с проблемами систематики рода // Закономерности внутривидовой изменчивости листовых пород. Свердловск: Уральский научный центр АН СССР, 1975. 142 с. С. 67–77. EDN: WIPDTR
6. Яшин Д. А., Зайцев Г. А. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях берёзы повислой

в условиях промышленного загрязнения // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 4-1. С. 193–196. EDN: UXPIYJ

7. Фотосинтетические пигменты в листьях берёзы повислой при техногенном воздействии / В. В. Стасова, Л. Н. Скрипальщикова, Н. В. Астраханцева и др. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 3 (393). С. 35–47. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47; EDN: JEZUIF

8. Влияние автотранспортного загрязнения воздуха на физиолого-биохимические показатели листа *Tilia cordata* Mill. и *Betula pendula* Roth / Е. А. Ерофеева, Д. Б. Гелашвили, М. Д. Кузнецов и др. // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 2. С. 55–60. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-2-55-60; EDN: XEQAPC

9. *Заворуева Е. Н., Заворуев В. В.* Динамика флуоресценции и концентрации хлорофиллов листьев берёз, растущих вблизи автомобильных дорог // Вестник КрасГАУ. 2010. № 9 (48). С. 129–133. EDN: MUPWIR

10. Исследование содержания фотосинтетических пигментов в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях антропогенного стресса / А. Р. Гилязова, Л. В. Садикова, А. С. Фахрутдинова и др. // Advanced Science: сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Пенза, 12 апреля 2019. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. 232 с. С. 21–24.

11. *Неверова О. А., Быков А. А.* Оценка адаптивного потенциала *Betula pendula* Roth в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. Ст. 551. EDN: УНХЕУР

12. Сезонная динамика изменений содержания фотосинтетических пигментов в листьях берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Стерлитамакского промышленного центра / Р. Х. Гиниятуллин, О. В. Тагирова, Р. С. Иванов и др. // Биосфера. 2023. Т. 15, № 3. С. 285–291. DOI: 10.24855/biosfera.v15i3.831; EDN: MBUNEW

13. *Самусик Е. А., Головатый С. Е.* Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023. № 2.

С. 78–86. DOI: 10.46646/2521-683X/2023-2-78-86; EDN: OUAVZP

14. *Белова Т. А., Краснопивцева А. Н.* Физиологические основы адаптации пигментной системы древесных растений к условиям светового климата городской среды // Auditorium. 2016. № 4 (12). С. 10–13. EDN: XESTDH

15. *Peguero-Pina J. J., Morales F., Gil-Pelegrin E.* Frost Damage in *Pinus sylvestris* L. Stems Assessed by Chlorophyll Fluorescence in Cortical Bark Chlorenchyma // Annals of Forest Science. 2008. Vol. 65, iss 8. Art. 813. DOI: 10.1051/forest:2008068

16. Влияние ультрафиолетовой радиации и параметров микроклимата на содержание пигментов в листьях берёзы повислой, произрастающей в условиях города / О. Л. Воскресенская, В. С. Воскресенский, Е. В. Сарбаева и др. // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2014. № 3. С. 39–45. EDN: THPQZR

17. *Чукуриди С. С., Савенко А. В., Грекова И. В.* Декоративность листьев красивоцветущих кустарников рода *Weigela* Thunb. и рода *Philadelphus* L. в связи с динамикой фотосинтетических пигментов в условиях города Краснодара // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2022. Т. 18, № 1. С. 67–72. EDN: VOIDMQ

18. *Бабаев Р. Н., Бессчётнова Н. Н., Бессчётнов В. П.* Многопараметрический анализ пигментного состава листового аппарата представителей рода *Betula* L. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 3 (59). С. 42–54. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.3.42; EDN: KYAFPT

19. *Кулагин А. Ю., Тагирова О. В.* Лесные насаждения Уфимского промышленного центра: современное состояние в условиях антропогенных воздействий: монография. Уфа: Гилем, 2015. 196 с. EDN: VNAУОН

20. *Гудериан Р.* Загрязнение воздушной среды / пер. с англ. Н. С. Гельман; под ред. Г. М. Илькуна. М.: Мир, 1979. 200 с.

21. *Рунова Е. М., Костромина О. А.* Оценка степени повреждения листьев берёзы и осины в зонах с различной техногенной нагрузкой // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 13. С. 230–232. EDN: TZSMAF

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2024; принята к публикации 20.09.2024

Информация об авторах

ТАГИРОВА Олеся Васильевна – старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, лаборатория лесоведения, Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН). Область научных интересов – лесоведение, лесовосстановление, защитное лесоразведение, озеленение населённых пунктов, экологическая экспертиза. Автор 194 научных публикаций, в том числе одной монографии. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1615-7005>; SPIN-код: 2439-1378

ИВАНОВ Руслан Сергеевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория лесоведения, Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН). Область научных интересов – физиология растений, продуктивность, устойчивость растений, гормоны растений. Автор 118 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1251-8336>; SPIN-код: 4215-7491

КУЛАГИН Алексей Юрьевич – доктор биологических наук, заведующий лабораторией лесоведения, Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН). Область научных интересов – лесоведение, лесовосстановление, защитное лесоразведение, озеленение населённых пунктов, экологическая экспертиза. Автор 519 научных публикаций, в том числе 12 монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7574-4547>; SPIN-код: 2468-8394

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*164.5: 630*181: 582.09

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.55>

EDN: PRXZRD

Seasonal Dynamics of the Chlorophyll Content in the Leaves of Silver Birch (*Betula Pendula* Roth) under Conditions of Industrial Pollution

O. V. Tagirova[✉], R. S. Ivanov, A. Y. Kulagin

Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Ufa Institute of Biology,
69, Prospekt Oktyabrya, Ufa, 450054, Russian Federation
olecyi@mail.ru [✉]

Abstract. *Introduction.* Woody plants growing on the territories of industrial centers contribute to optimizing the state of the environment, perform environmental stabilizing and protective functions, and improve people's living conditions. The question that remains open concerns the seasonal dynamics of the content of photosynthetic pigments in the leaves of the silver birch (*Betula pendula* Roth), a species resistant to extreme natural anthropogenic factors. *Materials and methods.* The Ufa Industrial Center (UIC) is a city with a population of more than 1 million people, where over 700 enterprises are located. The climate of the city of Ufa and its environs belongs to the temperate climate zone with a continental climate. The natural and climatic conditions of 2022 were characterized by multi-year averages. In 2022, according to the criteria of the Sanitary Rules and Norms 2.1.6.3492-21, the level of air pollution in the city of Ufa was categorized as "high". *The purpose of the work* is to determine the content of chlorophylls in birch leaves in the period from June to September on the UIC territory. The objectives of the study are as follows: (1) to determine the content of chlorophylls in the birch leaves during the growing season in the industrial and residential zones; (2) to determine the chlorophyll content in medium-leaved birch trees; (3) to determine the chlorophyll content in small-leaved birch trees. *The object of the study* is the birch plantings in the UIC industrial and residential zones. In the lower part of the crowns of model trees, leaves were identified and numbered (10 leaves per tree). In order to ensure the representativeness of the experimental data, the chlorophyll content was determined in the interveinal space of each leaf at 12 points: six points on the adaxial side of the leaf (on the left and right halves of the leaf, on the tip, middle and at the base of the leaf) and six on the abaxial side (on the left and right halves of the leaf, on the tip, middle and at the base of the leaf). In June, July, August and September 2022 (every month at the same time, using the numbered leaves) the content of chlorophylls (a+b) in the birch leaves was measured using a Dualex Scientific+ device ('Force-A', France). *Results and discussion.* In the period from June to September, the average value of chlorophyll content in the birch leaves in the industrial and residential-recreational zones was higher in September 2022. A comparison of chlorophyll contents in medium-leaved birch trees found that in the period from June to September the average leaf chlorophyll content is higher in the residential-recreational zone. When comparing chlorophyll contents of small-leaved birch trees, the average value of the leaf chlorophyll content during the period from June to September is higher in the industrial zone. *Conclusion.* According to the obtained data on the seasonal dynamics of changes in the leaf chlorophylls content, it can be concluded that in conditions of environmental pollution, successful adaptive adjustment of the chlorophyll-protein complex of the assimilation apparatus of birch trees is observed. At the same time, the small-leaved form of birch is distinguished by higher variability of leaf chlorophyll content during the vegetation season in both residential and industrial zones, which is a manifestation of adaptive reactions to the growing conditions.

Keywords: Silver birch (*Betula pendula* Roth), urban and sanitary protective plantings, variability in the content of photosynthetic pigments, growing season, adaptation

Funding: the work was carried out using the equipment of the Agidel Collective Use Center within the framework of planned research on the budget topic No. 123020700152-5 FMRS-2023-0008 "Sustainability of forest-forming tree species and ecological and biological adaptations taking into account anthropogenic transformation of landscape and natural complexes".

For citation: Tagirova O. V., Ivanov R. S., Kulagin A. Y. Seasonal Dynamics of the Chlorophyll Content in the Leaves of Silver Birch (*Betula Pendula* Roth) under Conditions of Industrial Pollution. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(3):55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.55>; EDN: PRXZRD

REFERENCES

1. Tagirova O. V., Kulagin A. Yu. Characteristics of the state of tree plantations as a landscape component of the socio-ecological complex of the town of Kumertau (Republic of Bashkortostan). *Occupational Medicine and Human Ecology*. 2024;(1):211–229. DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10113; EDN: NMYDOH (In Russ.).
2. Kulagin Yu. Z. Forest-forming species, technogenesis, forecasting. *Monograph*. Moscow: Nauka Publ.; 1980. 116 p. EDN: VZNMCV (In Russ.).
3. Demakov Yu. P. The influence of environmental factors on the growth of trees in the pine forests of the Republic of Mari El. *Monograph*. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology; 2023. 480 p. EDN: QIZGAG (In Russ.).
4. Kulagin Yu. Z. Woody plants and industrial environment. *Monograph*. Moscow: Nauka Publ., 1974. 124 p. EDN: VZNMBR (In Russ.).
5. Makhnev A. K., Mamaev S. A. Intraspecific variation of birche in the Urals in relation to problems of the systematics of the genus. In: *Patterns of intraspecific variability of deciduous tree species*. Collection of articles. Sverdlovsk: Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences; 1975. 142 p. Pp. 67–77. EDN: WIPDTR (In Russ.).
6. Yashin D. A., Zaitsev G. A. The maintenance of photosynthesis pigments in leaves of European white birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of industrial pollution. *Izvestia Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN (Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre)*. 2015;(4-1):193–196. EDN: UXPIYJ (In Russ.).
7. Stasova V. V., Skripal'shchikova L. N., Astrakhan'tseva N. V. et al. Photosynthetic pigments in silver birch leaves with technogenic load. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2023;(3(393)): 35–47. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47; EDN: JEZUIF (In Russ.).
8. Erofeeva E. A., Gelashvili D. B., Kuznetsov M. D. et al. The effect of traffic-related air pollution on the physiological and biochemical parameters of *Tilia cordata* Mill. and *Betula pendula* Roth. leaf. *Ecology of Urban Areas*. 2023;(2):55–60. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-2-55-60; EDN: XEQAPC (In Russ.).
9. Zavoruyeva E. N., Zavoruyev V. V. Dynamics of fluorescence and chlorophyll concentrations in the birch leaves growing near the roads. *The Bulletin of KrasGAU*. 2010;(9(48)):129–133. EDN: MUPWIR (In Russ.).
10. Gilyazova A. R., Sadikova L. V., Fakhruddinova A. S. et al. Study of the content of photosynthetic pigments in the leaves of the birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of anthropogenic stress. In: *Advanced Science: paper collection of the 7th International scientific and practical conference* (Penza, April 12, 2019). Penza: Science and Education (IP Gulyaev G. Yu.), 2019. 232 p. Pp. 21–24. (In Russ.).
11. Neverova O. A., Bykov A. A. The assessment of adaptive potential of *Betula pendula* Roth. in the conditions of prevailing influence by emissions of the industrial zone of Kemerovo City. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(2-1): Art. 551. EDN: UHXEUP (In Russ.).
12. Giniyatullin R. H., Tagirova O. V., Ivanov R. S. et al. Seasonal dynamics of changes in the content of photosynthetic pigments in leaves of the birch *Betula pendula* Roth. in the conditions of the Sterlitamak Industrial Center. *Biosfera*. 2023;15(3):285–291. DOI: 10.24855/biosfera.v15i3.831; EDN: MBUNEW (In Russ.).
13. Samusik E. A., Golovatyi S. E. Reaction of the pigment system woody plants for gas and dust pollution. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;(2):78–86. DOI: 10.46646/2521-683X/2023-2-78-86; EDN: OUAVZP (In Russ.).
14. Belova T. A., Krasnopitvseva A. N. Physiological bases of adaptation of the pigment system of woody plants to the conditions of the light climate of the urban environment. *Auditorium*. 2016;(4(12)):10–13. EDN: XESTDH (In Russ.).
15. Peguero-Pina J. J., Morales F., Gil-Pelegriñ E. Frost damage in *Pinus sylvestris* L. stems assessed by chlorophyll fluorescence in cortical bark chlorenchyma. *Annals of Forest Science*. 2008;65(8): Art. 813. DOI: 10.1051/forest:2008068
16. Voskresenskaya O. L., Voskresenskii V. S., Sarbaeva E. V. et al. Influence of ultraviolet radiation and microclimate parameters on the pigment count in leaves *Betula pendula* growing in urban conditions. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2014;(3):39–45. EDN: THPQZR (In Russ.).
17. Chukuridi S. S., Savenko A. V., Grekova I. V. Decorative leaves of flowering shrubs of the genus *Weigela Thunb.* and the genus *Philadelphus L.* due to the dynamics of photosynthetic pigments in the conditions of Krasnodar. *The North Caucasus Ecological Herald*. 2022;18(1):67–72. EDN: BOIDMQ (In Russ.).
18. Babaev R. N., Besschetnova N. N., Besschetnov V. P. Multiparameter analysis of the pigment composition of the leaf apparatus of representatives of the genus Birch (*Betula L.*). *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2023;(3(59)):42–54. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.3.42; EDN: KYAFPT (In Russ.).
19. Kulagin A. Yu., Tagirova O. V. Forest stands of the Ufa industrial center: current state in the conditions of anthropogenic influences. *Monograph*. Ufa: Gilem Publ.; 2015. 196 p. EDN: VNAYOH (In Russ.).
20. Guderian R. Air Pollution. Transl. from English by N. S. Gelman; G. M. Ilkun (Ed.). Moscow: Mir; 1979. 200 p. (In Russ.).

21. Runova E. M., Kostromina O. A. Estimation of a damage rate of leaves of a birch and aspen in zones with various technogenic loading. *Actual problems of the forest complex*. 2006;(13):230–232. EDN: TZSMAF (In Russ.).

The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 20.09.2024

Information about the authors

Olesya V. Tagirova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UIB UFRC RAS), Laboratory of Forestry. Research interests – forestry, reforestation, protective afforestation, landscaping of settlements, environmental expertise. Author of 194 scientific publications including one monograph. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1615-7005>; SPIN: 2439-1378

Ruslan S. Ivanov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UIB UFRC RAS), Laboratory of Plant Physiology. Research interests – plant physiology, productivity, plant resistance, plant hormones. Author of 118 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1251-8336>; SPIN: 4215-7491

Alexey Yu. Kulagin – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Forestry, Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UIB UFRC RAS). Research interests – forestry, reforestation, protective afforestation, landscaping of settlements, environmental assessment. Author of 519 scientific publications including 12 monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7574-4547>; SPIN: 2468-8394

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the paper preparation.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.
All authors read and approved the final manuscript.