

© П. А. Кузьмин

ЭКОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ СОДЕРЖАНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ *TILIA CORDATA* MILL. В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ

ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и
защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН)
Россия, 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 97

Кузьмин П. А. Экофизиологический аспект содержания фотосинтетических пигментов в листьях *Tilia cordata* Mill. в урбанизированной среде. – В работе представлены многолетние результаты по экофизиологическому аспекту содержания хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов в листьях *Tilia cordata* Mill. Объект исследования расположен на участках с разной степенью воздействия аэрополлютантов. В насаждениях санитарных зон и магистральных посадках содержание хлорофилла *a* в листьях липы мелколистной в июне больше, а в июле и августе меньше, чем в контроле. При этом в данных насаждениях у растений наблюдается большее содержание хлорофилла *b* и каротиноидов, что указывает на формирование специфической адаптивной реакции, которая проявляется в перестройке пигментного комплекса.

Ключевые слова: *Tilia cordata* Mill., фотосинтетические пигменты, урбанизированная среда, адаптация.

Введение

В настоящее время актуальными являются вопросы, направленные на решение проблем поддержания экологического баланса в урбанизированной среде. Урбанизированная среда выступает искусственной системой, которая нуждается в продуктивном и функциональном растительном компоненте. Растительные организмы должны быть адаптированными к экстремальным условиям произрастания и благоприятно влиять на формирование урбанизированной среды. Уровень адаптивности растений оценивается по функционированию различных систем, в том числе фотосинтетической системы [12].

Фотосинтетическая система древесных растений чувствительна к загрязнениям антропогенной среды. Количественное содержание хлорофиллов, каротиноидов их соотношения могут меняться в зависимости от степени воздействия техногенного стресса. В одних исследованиях отмечается увеличение количества пигментов в условиях техногенного стресса [2], в других работах отмечается уменьшения содержания фотосинтетических пигментов, нарушение нормального соотношения пигментов в листе и разрушение пигментов при воздействии высокими концентрациями загрязняющих веществ, в частности тяжелыми металлами [3].

Для создания благоприятной урбанизированной среды необходимо формировать полифункциональные устойчивые насаждения на основе анализа эколого-физиологического состояния древесных растений, в том числе *Tilia cordata* Mill., которая широко представлена в искусственных насаждениях различного экологического назначения [4].

Липа мелколистная реагирует на высокую степень загрязнения атмосферного воздуха уменьшением количества фотосинтетического пигмента в листьях. Максимальное снижение пигментов наблюдается к концу периода активной вегетации. Окислительный стресс растений ярко проявляется в неблагоприятных условиях урбано среды [5].

Таким образом, в научной литературе приведены разрозненные и не однозначные сведения по морфологическим, физиологическим, экологическим особенностям *T. cordata*, произрастающей в городской среде. Отсутствуют сведения по особенностям накопления и динамике фотосинтетических пигментов в ответ на воздействие приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха. Отсутствует информация по комплексной оценки

экофизиологических особенностей растений, испытывающих различное стрессовое воздействие.

Целью работы стало определение влияния урбанизированной среды на синтез хлорофиллов и каротиноидов в листьях *T. cordata*.

Материал и методы исследования

Объект исследования – липа мелколистная (сердцевидная) *T. cordata*.

Город Набережные Челны расположен в восточной части Республики Татарстан, с общей численностью населения 545 750 чел. (данные на 2023 г.). Годовое количество осадков в городе 652 мм, средняя годовая температура 4,5 °С. Основными загрязнителями атмосферного воздуха являются бенз(а)пирен, формальдегид, фенол, оксид углерода и азота, а также взвешенные частицы.

Объект исследования произрастал в составе различных экологических категорий насаждений: магистральные посадки (МП) (пр. Мира, ул. Машиностроителей), насаждения санитарно-защитных зон промышленных предприятий (СЗЗ) (Камский литейный и кузнечный заводы ПАО «КамАЗ»). В качестве зоны условного контроля (ЗУК) выбрана территория Национального парка «Нижняя Кама» (Челнинское лесничество, в 15 км севернее границы г. Набережные Челны). На исследуемой территории были заложены стационарные участки по 5 штук площадью не менее 0,25 га. На каждом участке были обследованы по 20 особей липы мелколистной в возрасте от 35–40 лет [6].

Приоритетными загрязнителями атмосферного воздуха на данной территории являются взвешенные частицы (среднегодовая концентрация превышает ПДК в 2–3 раза), формальдегид (1,5–1,8 раза), фенол (1,1–1,3 раза), бенз(а)пирен (1,4–1,8 раза).

Магистральные насаждения расположены вдоль крупных магистралей пр. Мира и ул. Машиностроителей с расчетной интенсивностью движения 14 250 ед./сут. и 15 500 ед./сут. На выделенных участках отмечается очень высокие значения ИЗА. Среди приоритетных загрязняющих веществ выделяются бенз(а)пирен (превышения ПДК в 1,5–1,8 раза), формальдегид (1,5–1,9 раза), фенол (1,4–1,8 раза), CO₂ (в 1,7–1,9 раза).

Таким образом, выделенные для обследования участки отличаются степенью техногенной нагрузки. Максимальные уровень загрязнения зафиксирован в магистральных насаждениях.

Особенности метеорологических условий за период исследования представлены на рис. 1. Максимальные температуры воздуха отмечены: в июне и августе в 2021 г., в июле в 2018 г., что на 20–24 % выше средней многолетней температуры. В эти же периоды отмечается минимальное количество выпавших осадков. Данные годы характеризуются засушливым периодом вегетации.

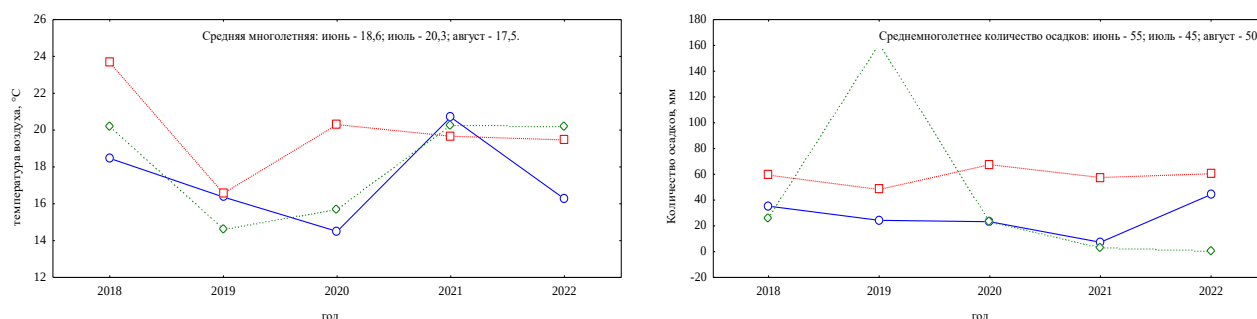


Рис. 1. Анализ метеорологических условий в период исследования

Примечание: -○- - июнь; -□- - июль; -◇- - август

Сбор растительного материала, пробоподготовка, определение пигментов в листьях спектрофотометрическим методом осуществлялся по общепринятым методикам. Для

проведения физиологических исследований листьев пробы срединных (ассимилирующих) листьев на годичных побегах брали со средней и нижней части (исключая нижние ветви) кроны древесных растений южной экспозиции. Для проведения лабораторных анализов содержания фотосинтетических пигментов брали смешанные пробы листьев в дневное время, в период наибольшей фотосинтетической активности (с 10:00 до 11:00 часов дня) [7].

В листьях древесных растений трижды в течение вегетации (июнь, июль, август) определяли содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов, используя спектрофотометрический метод. Измерения проводили на спектрофотометре Spectrostar (Labtec) в 100 %-ной ацетоновой вытяжке при максимумах поглощения – 662 и 644 нм для хлорофилла *a* и *b* соответственно, и 440,5 нм – для каротиноидов. Для определения концентрации хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в суммарной вытяжке пигментов использовали формулы Веттштейна.

С целью пересчёта содержания пигментов на массу сухого вещества определяли влажность листьев липы мелколистной [1].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием методов дисперсионного многофакторного анализа ANOVA (при последующей оценке различий методом TuKey HSD test и Scheffe test). В процессе сравнения и анализа полученных результатов использовали уровень значимости при $P < 0,05$. Для этой цели использовали программу «Statistica 12».

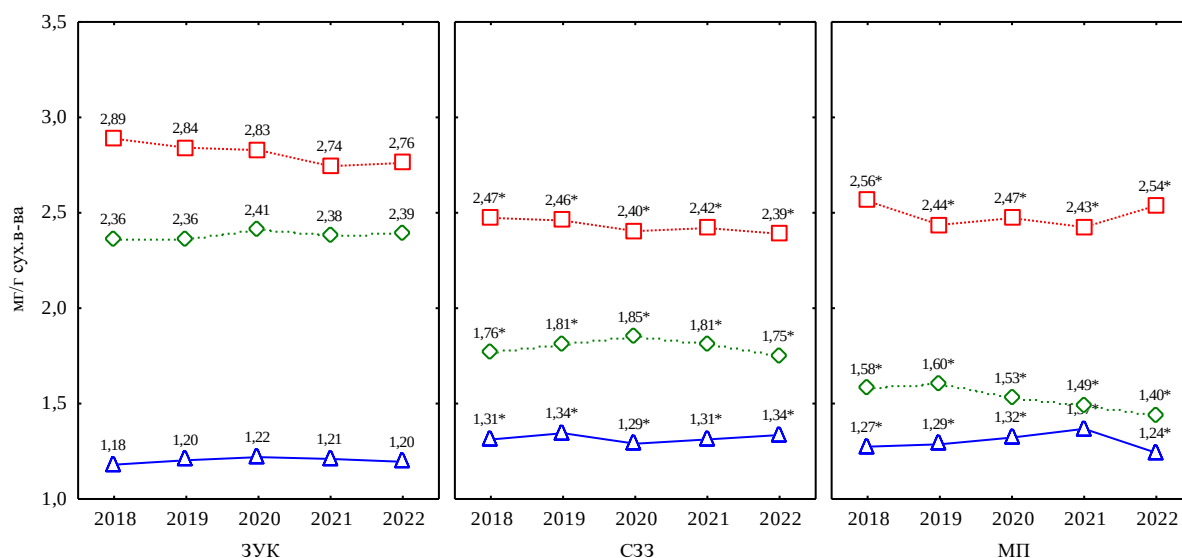
Результаты и обсуждение

Фотосинтетические пигменты в листовой пластинке древесных растений, в том числе и *T. cordata*, весьма чувствительны к воздействию техногенной среды [8]. В связи с этим оценка жизненного состояния и устойчивости к разнообразным стрессовым факторам древесных растений может быть определена по содержанию фотосинтетических пигментов [9]. Условия техногенного стресса негативно сказываются на содержании хлорофиллов, приводя к снижению продуктивности растений.

T. cordata в контроле синтезировала больше хлорофилла *a* в июле и августе за весь период проведения исследований ($P < 10^{-5}$). Следует отметить, что особи в насаждениях магистральных посадок и санитарных насаждений в начальный период активной вегетации (июнь) синтезировали больше хлорофилла *a*, чем растения в контроле. Данный факт, возможно, связан с запуском активных метаболических процессов в клетках растений, которые способствуют повышению скорости синтеза основного пигмента, что может выступать компенсацией последующего негативного воздействия загрязнителей на организм (рис. 2).

Динамика содержания хлорофилла *a* в листьях в летние месяцы имела схожую картину: повышение от июня к июлю, а затем его снижение к августу.

По результатам многолетних данных в магистральных посадках наблюдалось наибольшее загрязнение атмосферного воздуха. В августе на данной территории содержание хлорофилла *a* в листьях было минимальным: в 2018 – 1,58 мг/г сухого вещества, в 2019 – 1,60, в 2020 – 1,53, в 2021 – 1,49, в 2022 – 1,40, что ниже контрольных значений на 33, 32, 58, 37 и 41 % соответственно. Данный факт указывает на сильное разрушение основного пигмента фотосинтеза в условиях очень высокого техногенного стресса. В условиях СЗЗ, где отмечается менее интенсивное воздействие техногенного стресса, хлорофилл *a* также разрушается, но с меньшей силой, чем в условиях МП. В итоге *T. cordata* в условиях техногенного стресса различной интенсивности испытывает угнетение, снижает продуктивность и устойчивость к негативным внешним факторам.

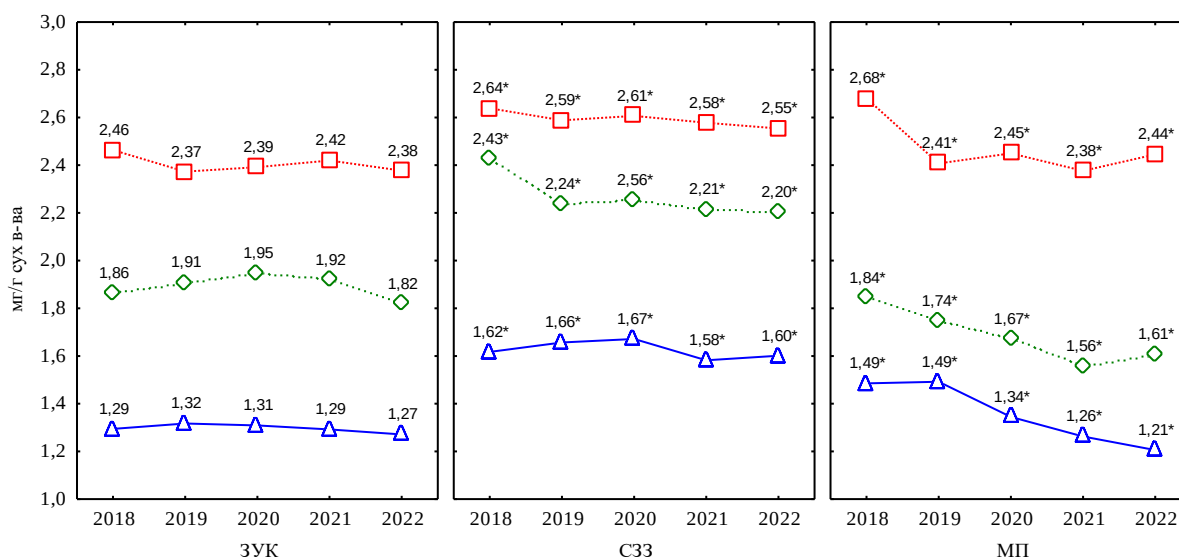
Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* в листьях *T. cordata*

Примечание: ▲ – июнь; ■ – июль; ◆ – август, * – статистически значимые различия по сравнению с контролем

Высокое содержание хлорофилла *b* указывает на повышенную устойчивость вида, защищает от разрушения хлорофилла *a* [10, 11].

В насаждениях санитарных зон исследуемых заводских территорий содержание хлорофилла *b* в листьях было меньше: в июне на 0,29–0,36; июле на 0,32–0,43 и августе на 0,28–0,57 мг/г сухого вещества (при $P < 10^{-5}$), по сравнению с контрольными насаждениями (рис. 3).

В 2018–2020 гг. была сходной динамика содержания хлорофилла *b*: в июне и июле количество пигмента больше, а в августе меньше показателей контроля. В 2021 г. в течение всего сезона фиксировались меньшие значения содержания хлорофилла *b* в листьях, по сравнению с показателями в контрольных насаждениях.

Рис. 3. Содержание хлорофилла *b* в листьях *T. cordata*

Примечание: обозначения аналогичны Рис. 2.

T. cordata, произрастающая в санитарных насаждениях заводов литейный и кузнечный, на протяжении летних месяцев имела больше хлорофилла *b*, чем в контроле, сохраняя тенденцию за все время исследования.

Динамика содержания каротиноидов в листьях *T. cordata* в контрольных насаждениях имела одинаковую картину: вначале отмечался рост содержания каротиноидов к июлю, а затем его снижение в августе (рис. 4).

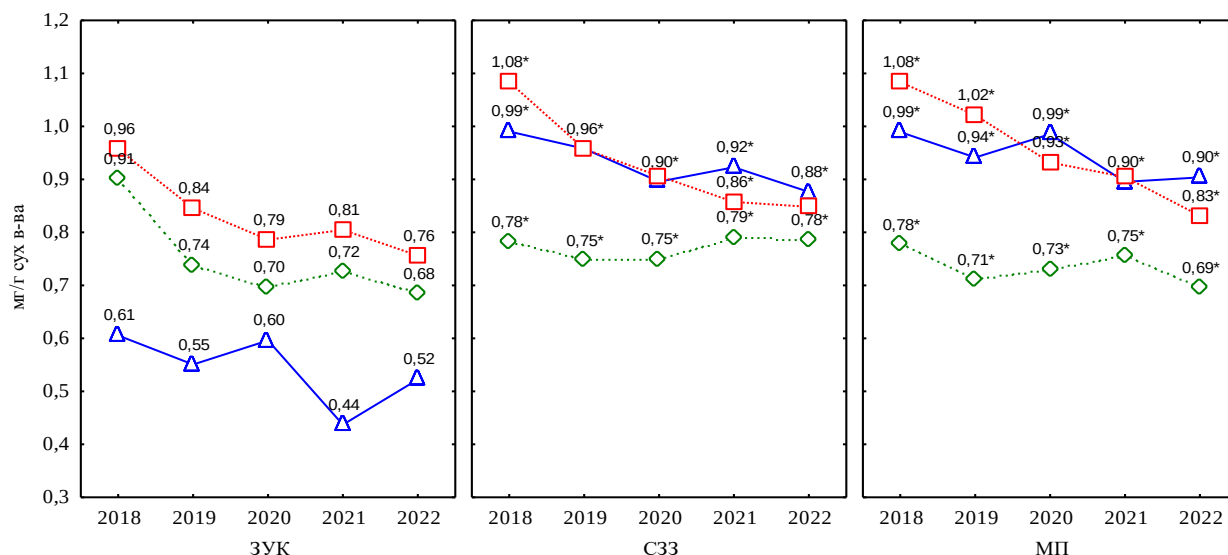


Рис. 4. Содержание каротиноидов в листьях *T. cordata*

Примечание: обозначения аналогичны Рис. 2.

В насаждениях, испытывающих повышенное и высокое воздействие аэротехногенных поллютантов, наблюдается закономерность в существенном повышении содержания каротиноидов в июне и июле, по сравнению с контролем, что способствует стабилизации протекания физиолого-биохимических процессов в условиях техногенного стресса. Данный факт указывает на формирование специфической адаптационной реакции *T. cordata* к условиям урбанизированной среды.

С целью выявления взаимосвязи содержания фотосинтетических пигментов и данных по аэротехногенным поллютантам был проведен корреляционный анализ. В ходе данного анализа выявлено, что содержание фотосинтетических пигментов в листьях у особей, произрастающих в санитарно-защитной зоне заводов отрицательно коррелируют с содержанием формальдегида в атмосферном воздухе (хлорофилла *a*: $r = -0,65$, при $p < 0,03$; хлорофилл *b*: $r = -0,92$, при $p < 0,0001$; каротиноиды: $r = -0,90$, при $p < 0,03$). Показатели содержания фотосинтетических пигментов в листьях исследуемых растений, произрастающих в магистральных посадках, отрицательно коррелируют с содержанием бенз(а)пирена и фенола в атмосферном воздухе (хлорофилла *a*: $r = -0,63$ и $r = -0,60$, при $p < 0,005$ и $p < 0,008$; хлорофилл *b*: $r = -0,63$ и $r = -0,66$, при $p < 0,005$ и $p < 0,003$; каротиноиды: $r = -0,54$ и $r = -0,55$, при $p < 0,021$ и $p < 0,019$).

Выводы

Многолетние исследования показали, что *T. cordata* имеет специфическую ответную реакцию фотосинтетического аппарата на разную интенсивность антропогенной нагрузки в различных категориях экологических насаждений урбанизированной среды.

В условиях высокого и очень высокого техногенного стресса (СЗЗ заводов кузнечный и литейный ПАО «Камаз», магистральных посадках пр. Мира и ул. Машиностроителей) у *T. cordata* проявляется специфическая адаптивная реакция, которая связана с реорганизацией

пигментного комплекса: повышение содержания каротиноидов и хлорофилла *b* в начале и середине активной вегетации.

Таким образом, в многолетних исследованиях показана специфическая реакция *T. cordata*, произрастающей на территориях с разным уровнем загрязненности атмосферного воздуха.

Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FNFE-2022-0009 «Поиск селекционно-ценного генетического материала для создания новых генотипов древесно-кустарниковых пород методами молекулярной селекции».

Список литературы

1. ГОСТ 24027.2–80. Сырьё лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. Взамен ГОСТ 6076–74; введ. 1981–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1980. 12 с
2. Кунина В. А., Белоус О. Г. Состояние фотосинтетических пигментов листьев древесных растений в условиях городской среды // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. Т. 6 (72), № 2. С. 108–118. doi: 10.37279/2413-1725-2020-6-2-108-118.
3. Мамиева Е. Б., Ширнина Л. В., Попова В. Т. Оценка устойчивости фотосинтетического аппарата липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. в градиенте техногенного загрязнения г. Владикавказ // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12. № 2 (46). С. 30–42. doi:10.34220/issn.2222-7962/2022.2/3.
4. Методы полевых экологических исследований: учеб. пособие / О. Н. Артаев (и др.); под ред. А. Б. Ручина (и др.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. 412 с.
5. Методы биохимического анализа растений: учеб. пособие / под ред. В. В. Полевого, Г. Б. Максимовой. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 192.
6. Николайчук А. М., Вашкевич М. Н. Влияние выбросов предприятий цементной промышленности на содержание пигментов и каротиноидов в листьях и хвое древесных растений // Вестник Мозырского государственного педагогического университета им. И. П. Шамякина. 2019. № 2 (54). С. 49–55.
7. Параскевопуло М. Ф., Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М. Изучение пигментного состава некоторых видов древесных растений в условиях техногенного загрязнения города Красноярск // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35, № 1–2. С. 54–59.
8. Павлова Л. М., Котельникова И. М., Куимова Н. Г. и др. Состояние фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных растений в городской среде // Экология урбанизированных территорий. 2010. № 2. С. 98–104.
9. Сарсацкая А. С. Содержание фотосинтетических пигментов у древесных пород городских насаждений // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 4. С. 9–14. doi: 10.21603/2542-2448-2017-4-9-14.
10. Тюлькова Е. Г. Функциональные особенности фотосинтетической системы древесных растений в техногенных условиях // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2019. № 1. С. 32–39.
11. Уразильдин Р. В., Аминев К. З., Зайцев Г. А. и др. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения // Карельский научный журнал. 2016. Т. 5, № 1 (14). С. 90–94.
12. Уромова И. П., Штырлина О. В., Дедюра И. С. Влияние антропогенных факторов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в городских условиях // Journal of Agriculture and Environment. 2023. № 12 (40). doi: 10.23649/JAE.2023.40.15.

Поступила в редакцию 09.10.2024 г.

Kuzmin P. A. Ecophysiological aspect of the content of photosynthetic pigments in the leaves of *Tilia cordata* Mill. in technogenic environment. – The paper presents long-term results on the ecophysiological aspect of the content of chlorophyll *a* and *b*, carotenoids in the leaves of *Tilia cordata* Mill. The object of study is located in areas with varying degrees of air pollutant intensity. In the plantations of sanitary and main plantings, the content of chlorophyll *a* in the leaves of the studied plants in June is higher, and in July and August it is lower than in the control. At the same time, in these plantings, plants have a higher content of chlorophyll *b* and carotenoids, which indicates the formation of a specific adaptive response, which is manifested in the restructuring of the pigment complex.

Key words: *Tilia cordata* Mill., photosynthetic pigments, urbanized environment, adaptation.

Кузьмин Петр Анатольевич

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
ведущий научный сотрудник, заведующий
лабораторией молекулярной селекции
ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии,
комплексных мелиораций и защитного
лесоразведения Российской академии наук»
(ФНЦ агроэкологии РАН), г. Волгоград, РФ.
E-mail : kuzmin-p@vfanc.ru
ORCID : 0000-0002-1303-765X
AuthorID : 56192995500

Kuzmin Petr Anatolyevich

PhD in Agricultural Sciences, Leading researcher,
Acting head of the molecular breeding laboratory of the
Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated
Land Reclamation and Protective Afforestation of the
Russian Academy of Sciences.