

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ *POPULUS BALSAMIFERA* L. В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО СТРЕССА

В статье приведены данные по особенностям содержания фотосинтетических пигментов и биохимических параметров листьев кроны тополя бальзамического в условиях антропогенного стресса. Выявлены особенности в динамике содержания фотосинтетических пигментов в листьях южной и северной экспозиции. Максимальное количество хлорофилла *a* выявлено в контроле, в условиях антропогенной нагрузки его количество снижается, при этом в южной экспозиции кроны дерева его содержание меньше, чем в листьях северной экспозиции. Содержание хлорофилла *b* у растений, испытывающих антропогенную нагрузку, возрастало в июне и августе, а каротиноидов в июне, июле и августе. Максимальное количество каротиноидов наблюдалось в листьях южной экспозиции в магистральных посадках. Установлена более высокая активность аскорбинатоксидазы в листьях тополя бальзамического, произрастающего в насаждениях санитарно-защитной зоны и магистральных посадках, чем у контрольных. Достоверное возрастание активности фермента отмечалось с июня по август, независимо от экспозиции расположения листьев в кроне деревьев. В листьях тополя, произрастающего в условиях антропогенной среды, выявлено относительное накопление аскорбиновой кислоты, причем наибольшее ее количество накапливалось в листьях северной экспозиции кроны. Максимальные значения активности полифенолоксидазы наблюдали в листьях южной экспозиции кроны у тополя бальзамического, произрастающего в магистральных посадках, в июне, июле и августе. Динамика активности полифенолоксидазы и танинов в листьях северной и южной экспозиции кроны характеризовалась ростом с июня по август у растений во всех исследуемых зонах.

Ключевые слова: *Populus balsamifera* L.; антропогенный стресс; фотосинтетические пигменты; антиоксиданты; экспозиция кроны.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.30.38>

Введение

Тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) в урбанизированной среде представлен в насаждениях санитарно-защитных зон промышленных предприятий, жилых кварталов, в магистральных посадках. Данный вид выполняет санитарно-гигиеническую, эстетическую, защитную и средорегулирующую функции и занимает важное место в ассортиментном составе городских насаждений. Он поглощает большое количество углекислоты, образует значительные объемы кислорода (Арсентьева, 2016; Бессчетнов, 2018; Куркин, Куприянова, 2020; Ведерников, 2021; Колтунов, 2021; Гиниятуллин и др., 2022; He et al., 2021; Li et al., 2022).

Антропогенный стресс негативно сказывается на приросте диаметра ствола, способствует возникновению водного дефицита, нарушает процесс дыхания и фотосинтеза, снижает продуктивность и защитные свойства. В исследованиях проведенных Э.И. Трещевской (Трещевская и др.,

2020) показана недолговечность, низкая продуктивности тополя бальзамического в условиях техногенного стресса.

Продуктивность растений зависит от особенностей организации и функционирования фотосинтетического аппарата, в том числе от количественного содержания фотосинтетических пигментов в листе. Разнообразные стрессы абиотической и биотической природы негативно сказываются на росте и развитии растения, снижают эффективность работы фотосинтетического аппарата. Техногенные поллютанты оказывают негативное влияние на пигментный комплекс растений. Количественное содержание хлорофиллов и каротиноидов является индикатором стресса у растений (Кладько, 2018; Коротченко и др., 2020; Гиниятуллин, Кулагин, 2021; Garcia et al., 2016; Cao et al., 2020; Cisse et al., 2022).

Важную работу по защите растений от окислительного стресса выполняют вещества низкомолекулярной и высокомолекулярной природы,

относящиеся к антиоксидантам. Различные антиоксиданты растений обычно изучаются без учета особенностей их взаимодействия между собой. Таковыми являются особенности взаимодействия ферментов и вторичных метаболитов, принимающих участие в формировании адаптивных реакций растительного организма. На содержание и активность защитных метаболитов влияет комплекс факторов среды обитания, в том числе расположение листьев на южной и северной экспозиции кроны. В научной литературе отсутствуют данные по динамике содержания защитных метаболитов в листьях древесных растений южной и северной экспозиции, а также их взаимодействия по принципу фермент-вторичный метаболит. Изучение данного вопроса является актуальным и поможет расширить представления об особенностях формирования защитных реакций древесных растений на биохимическом уровне (Фуксман и др., 2005; Чупахина и др., 2012; Шубина и др., 2017; Maiti et al., 2016; Hyder et al., 2020; Huang et al., 2022; Nikerova et al., 2022).

В связи с этим целью исследований было определить особенности динамики содержания фотосинтетических пигментов и показателей биохимического состава тополя бальзамического для расширения представлений о формировании адаптивных механизмов защиты в условиях техногенной среды с учетом экспозиции кроны дерева.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в г. Набережные Челны (Республика Татарстан), который расположен на востоке Восточно-Европейской равнины. Климат в районе исследования умеренно-континентальный. Зимний период продолжительный и календарно отмечается со второй половины ноября по конец марта. Среднегодовая температура января, который является самым холодным месяцем, составляет -11.2°C . Период с температурой ниже 0°C – 152 дня. Весна продолжительная, с повторяющимися морозными периодами. Летний период четко выраженный, но короткий. Наблюдаются часто повторяющиеся периоды засухи. Средняя температура июля $+25.0^{\circ}\text{C}$. Почвенный покров территории представлен сочетанием урбаноземов и естественных почв (дерново-подзолистых и серых лесных) различного гранулометрического состава.

Набережные Челны – крупный промышленный, автомобильный центр Республики Татарстан. В атмосферном воздухе города систематически фиксируются высокие уровни загрязнения, индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) равен 11.6

(Государственный ..., 2021).

Объектом исследований были деревья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) возраста 40–45 лет, произрастающие в магистральных посадках (Казанский проспект и проспект Мира) и санитарно-защитной зоне (СЗЗ) ПАО «КАМАЗ». В качестве зоны условного контроля выбрано Челнинское участковое лесничество.

Отбор проб и определение количественного содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях растений хорошего среднегенеративного онтогенетического состояния проводили в 2020–2021 гг. в середине каждого летнего месяца (июнь, июль, август). Листья располагались в срединной формации на годичном вегетативном побеге. При отборе листьев учитывалась экспозиция, которая определялась по компасу. Листья собраны с северной и южной экспозиции кроны каждого дерева, которые имели равноценное удаление от источника загрязнения. В каждой исследуемой зоне регулярным способом было заложено по 5 пробных площадей различной конфигурации размером не менее 0.25 га. В пределах каждой площади выделяли по 10 экземпляров деревьев тополя бальзамического. Отбор листьев по всем исследуемым зонам осуществлялся в течение одного дня.

Содержание танинов в растворе определяли при помощи спектрофотометра ПЭ-5400УФ при длине волны 277 нм.

Количественное содержание аскорбиновой кислоты определяли в соответствии с ГОСТ 24556–89. Активность аскорбинатаоксидазы определяли по методу, предложенному Д.К. Асамовым и С.Т. Рахимовой, который основан на свойстве аскорбиновой кислоты поглощать свет с максимумом при длине волны 265 нм. Об активности фермента судили по уменьшению величины оптической плотности, учитывая, что степень окисления аскорбиновой кислоты пропорциональна количеству фермента. Активность полифенолоксидазы определяли спектрофотометрическим методом, основанном на измерении оптической плотности продуктов реакции, которые образуются при окислении пирокатехина за определенный промежуток времени (Ермаков и др., 1987).

Концентрацию определяемых веществ выражали в мг/г сухого вещества.

Математическую обработку результатов измерений проводили с применением статистического пакета «Statistica 10.0». Для интерпретации полученных данных использовали метод дисперсионного многофакторного анализа (при последующей оценке различий методом множественного сравнения LSD-test). В процессе сравнения

и анализа полученных результатов использовали достоверные различия между признаками (при $p < 0.05$).

Результаты и их обсуждение

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях тополя бальзамического, отобранных с северной и южной экспозиции кроны дерева представлены в таблице 1.

Дисперсионный многофакторный анализ показал, что на содержание хлорофилла *a* и *b* и каротиноидов в листьях тополя достоверное влияние оказали комплекс условий произрастания, период вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

Наибольшее содержание хлорофилла *a* и *b* отмечено в июле в листьях южной экспозиции у растений, произрастающих в зоне контроля.

В условиях санитарно-защитной зоны и магистральных посадок содержание хлорофилла *a* относительно контроля достоверно снижалось, при этом минимальное его количество отмечено в листьях южной экспозиции. Так, в июне содержание хлорофилла *a* было меньше на 0.19–0.28 и 0.17–0.24 мг/г при $LSD_{05} = 0.03$ мг/г; в июле – на 0.24–0.35 и 0.36–0.51 мг/г; в августе – на 0.59–0.69 и 0.61–0.78 мг/г, соответственно, у растений в листьях северной и южной экспозиции.

По содержанию хлорофилла *b* также были выявлены специфические отличия, которые проявлялись в следующем. В июне и августе в листьях северной и южной экспозиции содержание пигмента было выше по сравнению с контролем. Листья южной экспозиции при этом содержали на 0.03–0.04 (июль) и 0.04–0.06 (август) мг/г больше хлорофилла *b* по сравнению с листьями северной экспозиции. В июле в листьях как северной, так и южной экспозиции отмечена противоположная тенденция: содержание в них хлорофилла *b* было ниже, чем в контроле.

В насаждениях СЗЗ завода и магистральных посадках количественное содержание каротиноидов было больше в июне на 0.15–0.25 и 0.17–0.19 мг/кг при $LSD_{05} = 0.03$ мг/г; в июле – на 0.05–0.09 и 0.1–0.14 мг/г; в августе – на 0.21–0.19 и 0.24–0.31 мг/г, соответственно, в северной и южной экспозиции.

Следует отметить факт большего содержания хлорофилла *b* в листьях южной экспозиции в августе по сравнению с северной экспозицией, превышение составляло: в зоне условного контроля 0.07 мг/г, в СЗЗ – 0.04 мг/г, в магистральных насаждениях – 0.06 мг/г. В листьях южной экспозиции магистральных насаждений содержание каротиноидов было выше, чем в листьях северной

экспозиции.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях тополя бальзамического зависит от периода вегетации, жизненного состояния особей, при этом адаксиальная и абаксиальная стороны листьев на содержание пигментов не влияют (Гиниятуллин и др., 2022).

Анализируя динамику содержания исследуемых фотосинтетических пигментов в листьях тополя бальзамического разной экспозиции в каждой зоне произрастания следует отметить общую тенденцию к возрастанию содержания хлорофилла *a* и *b* в июле и снижения в августе.

Результаты исследований содержания фотосинтетических пигментов в листьях свидетельствуют об адаптивных возможностях конкретного вида растения к условиям антропогенного стресса. Так, например, у ели европейской в городских условиях содержание хлорофилла *a* ниже, чем у ели колючей, что является важным показателем стабильности вида (Бухарина, Пашкова, 2015).

Многие исследования указывают на взаимосвязь адаптивных возможностей растительного организма и функционирования ферментативной системы, в том числе медьсодержащих ферментов полифенолоксидазы и аскорбинатоксидазы. Эти ферменты в сочетании с фенольными субстратами участвуют в процессе дыхания. В поврежденных тканях растений, при воздействии низких температур активность полифенолоксидазы возрастает. Техногенное загрязнение окружающей среды приводит к возрастанию активности данного фермента. Кроме того, полифенолоксидаза принимает участие в регуляции метаболизма в ходе онтогенеза и приспособительных реакциях к негативным факторам окружающей среды (Skrypnik et al., 2021).

В работе были определены низкомолекулярные и высокомолекулярные биохимические показатели, участвующие в функционировании антиоксидантной системы защиты.

В результате проведенного дисперсионного многофакторного анализа результатов исследования была отмечена достоверность влияния комплекса условий места произрастания, сроков вегетации, экспозиции расположения листьев и взаимодействия этих факторов на активность аскорбинатоксидазы в листьях тополя бальзамического ($p < 0.001$).

В ходе исследования была установлена более высокая активность аскорбинатоксидазы за весь анализируемый период в листьях южной и северной экспозиции тополя бальзамического, произрастающего в насаждениях СЗЗ и магистральных посадках, чем у контрольных деревьев (табл. 2).

Таблица 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Populus balsamifera* в различных типах насаждений с учетом экспозиции кроны дерева

Table 1. The content of photosynthetic pigments in the leaves of *Populus balsamifera* in various types of plantations, taking into account the exposure of the tree crown

Месяц (Фактор В) Month (Factor B)	Экспозиция (Фактор С) Exposition (Factor C)	Показатели Indicators		
		Хлорофилл <i>a</i> , мг/г Chlorophyll <i>a</i> , mg/g LS- D _{05ABC} =0.03	Хлорофилл <i>b</i> , мг/г Chlorophyll <i>b</i> , mg/g LSD _{05ABC} =0.03	Каротиноиды, мг/г Carotenoids, mg/g LSD _{05ABC} =0.02
Зона условного контроля (Фактор А) Zone of conditional control (Factor A)				
Июнь June	северная northern	1.43	1.22	0.68
	южная southern	1.45	1.11	0.69
Июль July	северная northern	2.15	2.32	0.93
	южная southern	2.19	2.29	0.97
Август August	северная northern	1.83	1.85	1.01
	южная southern	1.85	1.92	1.02
Санитарно-защитная зона промышленного предприятия (Фактор А) Sanitary protection zone of the industrial enterprises (Factor A)				
Июнь June	северная northern	1.24	1.32	0.83
	южная southern	1.18	1.35	0.94
Июль July	северная northern	1.91	2.26	0.98
	южная southern	1.84	2.21	1.06
Август August	северная northern	1.24	2.05	1.22
	южная southern	1.16	2.09	1.21
Магистральные посадки (Фактор А) Street plants (Factor A)				
Июнь June	северная northern	1.26	1.34	0.85
	южная southern	1.21	1.38	0.88
Июль July	северная northern	1.79	2.28	1.03
	южная southern	1.68	2.22	1.11
Август August	северная northern	1.18	2.06	1.25
	южная southern	1.07	2.12	1.33

При этом в листьях южной экспозиции активность фермента была ниже, чем в листьях северной экспозиции. Динамика активности аскорбинатоксидазы была схожей у растений в разных зонах произрастания. Отмечалось достоверное существенное возрастание активности фермента с июня по август, независимо от экспозиции расположения листьев в кроне деревьев.

Аскорбинатоксидаза принимает участие в ме-

таболизме аскорбиновой кислоты. Была определена корреляционная взаимосвязь между уровнем активности аскорбинатоксидазы и количественным содержанием аскорбиновой кислоты в листьях тополя бальзамического, которая составила -0.87 при $p < 0.014$.

Дисперсионный многофакторный анализ показал, что на содержание аскорбиновой кислоты в листьях тополя достоверное влияние оказали

Таблица 2. Биохимические показатели листьев *Populus balsamifera* в различных типах насаждений с учетом экспозиции кроны дерева
Table 2. Biochemical parameters of the *Populus balsamifera* leaf in various types of plantations, taking into account the exposure of the tree crown

Месяц (Фактор В) Month (Factor B)	Экспозиция (Фактор С) Exposition (Factor C)	Показатели Indicators			
		АО, ед. акт. АО, un. act. LSD _{05ABC} =0.04	АК, мг/% АА, mg/% LSD _{05ABC} =8.6	ПФО, ед. акт. РРО, un. act. LSD _{05ABC} =0.04	Танины, мг/г Tannins, mg/g LSD _{05ABC} =0.05
Зона условного контроля (Фактор А) Zone of conditional control (Factor A)					
Июнь June	северная northern	2.56	356.2	1.92	3.81
	южная southern	2.45	346.2	1.91	3.85
Июль July	северная northern	3.83	223.1	4.18	5.06
	южная southern	3.75	216.7	4.16	5.13
Август August	северная northern	4.11	138.2	5.14	6.74
	южная southern	4.13	135.4	5.16	6.91
Санитарно-защитная зона промышленного предприятия (Фактор А) Sanitary protection zone of the industrial enterprises (Factor A)					
Июнь June	северная northern	2.85	397.2	1.92	3.88
	южная southern	2.72	383.2	2.03	3.96
Июль July	северная northern	4.23	243.1	4.29	5.65
	южная southern	4.04	228.3	4.69	5.73
Август August	северная northern	4.42	205.3	5.36	7.04
	южная southern	4.25	183.1	5.54	7.12
Магистральные посадки (Фактор А) Street plants (Factor A)					
Июнь June	северная northern	2.95	423.1	2.72	3.89
	южная southern	2.82	418.2	2.83	3.96
Июль July	северная northern	3.99	415.4	5.54	5.92
	южная southern	3.82	392.1	5.61	6.01
Август August	северная northern	4.23	178.6	7.21	7.26
	южная southern	4.12	164.2	7.39	7.34

Примечание: АО – аскорбинатоксидаза; АК – аскорбиновая кислота; ПФО – полифенолоксидаза.
Note: АО – ascorbate oxidase; AA – ascorbic acid; PPO – polyphenol oxidase.

комплекс условий места произрастания, фазы вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

Независимо от зоны произрастания, периода вегетации и экспозиции расположения листьев в кроне дерева в насаждениях санитарно-защитных зон промышленных предприятий и в магистральных посадках синтезировалось большее количество аскорбиновой кислоты в листьях, чем у растений в контроле. За весь период вегетации и во всех зонах больше аскорбиновой кислоты накапливалось в листьях северной экспозиции кроны.

Рассматривая динамику накопления аскорбиновой кислоты, можно сказать, что ее количество уменьшается с июня по август во всех исследуемых зонах как в северной, так и в южной экспозиции кроны.

Полифенолоксидаза является медьсодержащим ферментом, который катализирует окисление гидроксильной группы фенольных соединений с образованием хинонов. Активность полифенолоксидазы отражает устойчивость растений к действию абиотических, биотических и антропогенных факторов.

Проведенный дисперсионный многофакторный анализ выявил, что на активность полифенолоксидазы в листьях тополя бальзамического достоверное влияние оказали комплекс условий места произрастания, фазы вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

В насаждениях СЗЗ в июле и августе активность полифенолоксидазы в листьях тополя была выше, чем в контроле: в июле на 0.11 и 0.53 ед. акт.; в августе – на 0.22 и 0.38, при $LSD_{05} = 0.04$ ед. акт., соответственно, в северной и южной экспозиции. При этом в листьях северной экспозиции кроны дерева активность была ниже, чем в листьях южной экспозиции кроны. Максимальные значения активности полифенолоксидазы наблюдали в листьях южной экспозиции кроны у тополя, произрастающего в магистральных посадках, в июне, июле и августе. Динамика активности полифенолоксидазы в листьях северной и южной экспозиции кроны характеризовалась ростом с июня по август у растений во всех исследуемых зонах (табл. 2).

В адаптивных реакциях древесных растений принимают участие разнообразные метаболиты, в том числе фенольные соединения, представителями которых являются танины. Они влияют на процессы роста и развития, а также принимают участие в адаптации растения к стрессовым факторам. Механизм их действия на рост растений не ясен, часто его связывают с воздействием на ауксиновый обмен, посредством регуляции количества ауксинов. Фенольные вещества участвуют в транспорте электронов при дыхании и фотосинтезе, в биосинтезе лигнина, обеспечивают неферментативное окисление ряда соединений (аминокислот, аскорбиновой кислоты, цитохромов и т.д.). Цитологические исследования хвои ели и сосны, произрастающих в промышленных зонах, выявили накопление фенольных соединений в тканях хвои. В хвое деревьев, пораженных грибными болезнями, содержание фенолов увеличивается, изменяется и их качественный состав. Обсуждается возможная роль фенольных соединений, в том числе танинов, в качестве защиты для жизнеспособных тканей, а также их участие в процессе старения (Kernaghan et al., 2022).

Полифенолоксидаза принимает участие в метаболизме танинов. Коэффициент корреляции между уровнем активности полифенолоксидазы и количественным содержанием танинов в листьях тополя был равен 0.96 ($p < 0.0001$).

Дисперсионный многофакторный анализ показал, что на содержание танинов в листьях достоверное влияние оказали комплекс условий ме-

ста произрастания, фазы вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

В насаждениях СЗЗ и магистральных посадках содержание танинов в листьях северной и южной экспозиции кроны было выше, чем в контроле, за весь период вегетации. В зонах с техногенной нагрузкой в листьях южной экспозиции кроны наблюдалось большее количество танинов, чем в листьях северной экспозиции. Максимальное их количество отмечено в августе у растений, произрастающих в магистральных посадках. Во всех обследуемых зонах динамика накопления танинов была сходной: наблюдалось их увеличение с июня по август.

Заключение

В листьях тополя бальзамического, произрастающего в условиях техногенной нагрузки (техногенного стресса), отмечается достоверное снижение содержания хлорофилла *a*, особенно в листьях южной экспозиции. Содержание хлорофилла *b* в июне и августе, а каротиноидов в течение всего летнего периода, было выше, чем в контроле. Данная картина отражает специфическую реакцию тополя бальзамического на комплекс негативных условий среды. Кроме того, были выявлены отличия между экспозициями кроны дерева: при северной экспозиции кроны наблюдали большее содержание хлорофилла *a*, тогда как содержание хлорофилла *b* и каротиноидов было меньше.

Показана взаимосвязь между вторичным метаболитом и ферментом, участвующем в его синтезе. Ближе к концу сезонной вегетации (август) отмечается увеличение активности аскорбинатоксидазы, при этом содержание аскорбиновой кислоты в листьях снижается. Активность полифенолоксидазы и содержание танинов в листьях тополя бальзамического возрастает к августу.

Работа выполнена по теме государственного задания №FNFE-2021-0001 «Научные основы и технологии обогащения дендрофлоры лесомелиоративных комплексов хозяйственно ценными древесными и кустарниковыми растениями в целях предотвращения деградации и опустынивания территорий» (Рег. номер 121041200197-8), финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Арсентьева А.А. Рост тополя бальзамического в условиях автотранспортного загрязнения (на примере г. Красноярска) // Уральский научный вестник. 2016. №4(2). С. 37–45.
2. Бессчетнов П.В. Морфометрические характеристики листьев тополей в условиях городских посадок Нижнего

Новгорода // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. №4. С. 17–27.

3. Бухарина И.Л., Пашкова А.С. Особенности динамики фотосинтетических пигментов у хвойных растений в насаждениях города // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. №1. С. 27–33.

4. Ведерников К.Е. Изменение химического состава древесины *Picea obovata* Ledeb. под воздействием *Ips typographus* L. // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 251–258. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048466>.

5. Гиниятуллин Р.Х., Кулагин А.Ю. Состояние и водный дефицит листьев тополя бальзамического в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра // Известия Уфимского научного центра РАН. 2021. №3. С. 5–10. doi: 10.31040/2222-8349-2021-03-5-10.

6. Гиниятуллин Р.Х., Иванов Р.С., Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), произрастающих в условиях промышленного загрязнения (Республика Башкортостан, Стерлитамакский промышленный центр) // Самарский научный вестник. 2022. №11. С. 43–48. doi: 10.55355/snvn2022111104.

7. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году». Казань, 2021. 412 с.

8. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.

9. Кладько Ю.В. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки Г. Красноярск // Сибирский лесной журнал. 2018. №4. С. 49–57. doi: 10.15372/SJFS20180406.

10. Колтунов Е.В. Влияние стволовой гнили на фенольные соединения в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях урбанизации // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 155–161. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028246>.

11. Коротченко И.С., Лебедев Н.А., Первышина Г.Г., Кондратюк Т.А., Медведева Т.А. Влияние выбросов тепловых электростанций Красноярского края на стабильность развития тополя бальзамического // Успехи современного естествознания. 2020. №10. С. 85–90. doi: 10.17513/use.37495.

12. Куркин В. А., Куприянова Е. А. Сравнительное исследование флавоноидного состава листьев фармакопейных видов рода *Populus* // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 117–124. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015818>.

13. Трещевская Э.И., Голядкина И.В., Трещевская С.В., Князев В.И., Кушнир Е.А. Перспективы лесной рекультивации техногенных ландшафтов с помощью культур тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, №2. С. 81–92. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/8.

14. Фуксман И.Л., Новицкая Л.Л., Исидоров В.А., Рошин В.И. Фенольные соединения хвойных деревьев в условиях стресса // Лесоведение. 2005. №3. С. 4–10.

15. Чупахина Г. Н., Масленикова П. В., Скрыпник Л. Н., Бессережнова М. И. Реакция пигментной и антиоксидантной системы растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. №2. С. 171–185.

16. Шубина А.Г., Синюткина С.Е., Попова (Бирюкова) Е.Д. Активность полифенолоксидазы в хвое ели голубой (*Picea pungens*) и картофеля (*Solanum tuberosum*) как флюидикационный маркер состояния окружающей среды // Вестник ТГУ. 2017. Т. 17, вып. 1. С. 347–348.

17. Garcia D.E., Glasser W.G., Pizzi A., Paczkowski S.P., Laborie M.P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering // New journal of chemistry. 2016. №1. P. 234–242. doi: 10.1039/C5NJ02131F.

18. Maiti R., Rodriguez H.G., Sarkar N.C., Kumari A. Biodiversity in leaf chemistry (pigments, epicuticular wax and leaf nutrients) in woody plant species in North-eastern Mexico, a Synthesis // Forest Research. 2016. №5. P. 170–176. doi: 10.4172/2168-9776.1000170.

19. Hyder P.W., Fredrickson E.L., Estell R.E., Tellez M., Gibbens R.P. Distribution and concentration of total phenolics, condensed tannins, and nordihydroguaiaretic acid (NDGA) in creosotebush (*Larrea tridentata*) // Biochemical systematics and ecology. 2020. №30. P. 905–912. doi:10.1016/S0305-1978(02)00050-9.

20. Kernaghan G., Griffin A., Gailey J., Hussain A. Tannin tolerance and resistance in dark septate endophytes // Rhizosphere. 2022. №23. 100574. doi: 10.1016/j.rhisph.2022.100574.

21. Nikerova K.M., Galibina N.A., Moshchenskaya Y.L., Tarelkina T.V., Borodina M.N., Sofronova I.N., Semenova L.I., Ivanova D.S., Novitskaya L.L. Upregulation of antioxidant enzymes is a biochemical indicator of abnormal xylogenesis in Karelian birch // Trees. Structure and function. 2022. №36 (2). P. 517–529. doi: 10.1007/s00468-021-02225-5.

22. He F., Shi Y.-J., Zhao Q., Zhao K.-J., Cui X.-L., Chen L.-H., Yang H.-B., Zhang F., Mi J.-X., Huang J.-L., Wan X.-Q. Genome-wide investigation and expression profiling of polyphenol oxidase (PPO) family genes uncover likely functions in organ development and stress responses in *Populus trichocarpa* // BMC Genomics. 2021. №22. 731. doi: 10.1186/s12864-021-08028-9.

23. Cao Y., Ma C., Chen H., Chen G., White J. C., Xing B. Copper stress in flooded soil: Impact on enzyme activities, microbial community composition and diversity in the rhizosphere of *Salix integra* // Science of the total environment. 2020. 704. 135350. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135350.

24. Cisse E.-H.M., Zhang L.-J., Pu Y.-J., Miao L.-F., Li D.-D., Zhang J., Yang F. Exogenous Ca²⁺ Associated with melatonin alleviates drought-induced damage in the woody tree *Dalbergia odorifera* // Journal of plant growth regulation. 2022. №41 (6). P. 2359–2374. doi: 10.1007/s00344-021-10449-5.

25. Huang R., Li C., Guo M., Xu H., Zhang S., Wang M., Ge Y. Caffeic acid regulated respiration, ethylene and reactive oxygen species metabolism to suppress senescence of *Malus domestica* // Postharvest biology and technology. 2022. №194. 112074. doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112074.

26. Li C., Li J., Du X., Zhang J., Zou Y., Liu Y., Li Y., Lin H., Li H., Liu D., Lu H. Chloroplast thylakoidal ascorbate peroxidase, PtotAPX, has enhanced resistance to oxidative stress in *Populus tomentosa* // International journal of molecular sciences. 2022. №23 (6). 3340. doi:10.3390/ijms23063340.

27. Skrypnik L., Maslennikov P., Feduraev P., Pungin A., Belov N. Changes in antioxidative compounds and enzymes in small-leaved linden (*Tilia cordata* mill.) in response to mistletoe (*Viscum album* L.) infestation // Plants. 2021. №10 (9). 1871. doi: 10.3390/plants10091871.

References

1. Arsent'yeva A. Rost topolya bal'zamicheskogo v usloviyakh avtotransportnogo zagryazneniya (na primere g. Krasnoyarska) [Growth of balsamic poplar under conditions of road pollution (on the example of Krasnoyarsk)] // Ural'skiy nauchnyy vestnik [Ural scientific bulletin]. 2016. No 4 (2). P. 37–45.

2. Besschetnov P.V. Morfometricheskiye kharakteristiki list'ev topoley v usloviyakh gorodskikh posadok Nizhnego Novgoroda [Morphometric characteristics of poplar leaves in the conditions of urban plantings in Nizhny Novgorod] // Vestnik

Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Nizhny Novgorod state agricultural academy]. 2018. No 4(20). P. 17–27.

3. Bukharina I.L., Pashkova A.S. Osobennosti dinamiki fotosinteticheskikh pigmentov u khvoynykh rasteniy v nasazhdeniyakh goroda [Features of the dynamics of photosynthetic pigments in coniferous plants in city plantings] // Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Izhevsk state agricultural academy]. 2015. No 1. P. 27–33.

4. Vedernikov K.Ye. Izmeneniye khimicheskogo sostava drevesiny Pecea obovata Ledeb. pod vozdeystviyem Ips typographus L. [Changes in the chemical composition of Pecea obovata Ledeb wood. under the influence of Ips typographus L.] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials]. 2021. No 4. P. 251–258. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048466>.

5. Giniyatullin R.Kh., Kulagin A.Yu. Sostoyaniye i vodnyy defitsit list'yev topolya bal'zamicheskogo v usloviyakh polimetallicheskogo zagryazneniya Sterlitamakskogo promyshlennogo tsentra [Status and water deficiency of balsam poplar leaves under conditions of polymetallic pollution of the Sterlitamak industrial center] // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN [News of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021. No 3. P. 5–10. doi: 10.31040/2222-8349-2021-0-3-5-10.

6. Giniyatullin R.Kh., Ivanov R.S., Tagirova O.V., Kulagin A.YU. Soderzhaniye fotosinteticheskikh pigmentov v list'yakh «zdorovykh» i «oslablennykh» derev'yev topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.), proizrastayushchikh v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya (Respublika Bashkortostan, Sterlitamakskiy promyshlennyy tsentr) [The content of photosynthetic pigments in the leaves of «healthy» and «weakened» balsam poplar trees (*Populus balsamifera* L.) growing in conditions of industrial pollution (Republic of Bashkortostan, Sterlitamak industrial center)] // Samarskiy nauchnyy vestnik [Samara Scientific Bulletin]. 2022. No 11 (1). P. 43–48. doi: 10.55355/snv2022111104.

7. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii prirodnikh resursov i ob okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Tatarstan v 2020 godu». [On the state of natural resources and environmental protection of the Republic of Tatarstan in 2020]. Kazan, 2021. 412 p.

8. Yermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P. et al. Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad: Agropromizdat, 1987. 429 p.

9. Klad'ko Yu. V. Radial'nyy rost drevesnykh vidov v usloviyakh vysokoy antropogennoy nagruzki G. Krasnoyarska [Radial growth of tree species under conditions of high anthropogenic load in Krasnoyarsk] // Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian forest journal]. 2018. No 4. P. 49–57. doi: 10.15372/SJFS20180406.

10. Koltunov Ye.V. Vliyaniye stvolovoy gnili na fenol'nyye soyedineniya v list'yakh topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) v usloviyakh urbanizatsii [Effect of stem rot on phenolic compounds in the leaves of balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) under urbanization] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials]. 2021. No 2. P. 155–161. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028246>.

11. Korotchenko I.S., Lebedev N.A., Pervyshina G.G., Kondratyuk T.A., Medvedeva T.A. Vliyaniye vybrosov teplovykh elektrostantsiy Krasnoyarskogo kraya na stabil'nost' razvitiya topolya bal'zamicheskogo [The impact of emissions from thermal power plants of the Krasnoyarsk Territory on the stability of the development of balsam poplar] // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Advances of modern natural science]. 2020. No 10. P. 85–90. doi: 10.17513/use.37495.

12. Kurkin V.A., Kupriyanova Ye.A. Sravnitel'noye issledovaniye flavonoidnogo sostava list'yev farmakopeynykh vidov

roda Populus. [Comparative study of the flavonoid composition of leaves of pharmacopoeial species of the genus Populus] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials]. 2020. No 1. P. 117–124. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015818>.

13. Treshchevskaya E.I., Golyadkina I.V., Treshchevskaya S.V., Knyazev V.I., Kushnir E.A. Perspektivy lesnoy rekul'tivatsii tekhnogennykh landshaftov s pomoshch'yu kul'tur topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) [Prospects for forest reclamation of technogenic landscapes using balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) crops] // Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry journal]. 2020. Vol. 10, No 2. P. 81–92. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/8.

14. Fuksman I.L., Novitskaya L.L., Isidorov V.A., Roshchin V.I. Fenol'nyye soyedineniya khvoynykh derev'yev v usloviyakh stressa [Phenolic compounds of coniferous trees under stress conditions] // Lesovedeniye [Forestry]. 2005. No 3. P. 4–10.

15. Chupakhina G.N., Maslennikova P.V., Skrypnik L.N., Besserezhnova M.I. Reaktsiya pigmentnoy i antioksidantnoy sistemy rasteniy na zagryazneniye okruzhayushchey sredy g. Kaliningrada vybrosami avtotransporta [The reaction of the pigment and antioxidant system of plants to environmental pollution in Kaliningrad by vehicle emissions] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2012. No 2. P. 171–185.

16. Shubina A.G., Sinyutina S.Ye., Popova (Biryukova) Ye.D. Aktivnost' polifenoloksidazy v khvoye yeli goluboy (*Picea pungens*) i kartofele (*Solanum tuberosum*) kak fitoindikatsionnyy marker sostoyaniya okruzhayushchey sredy [Polyphenol oxidase activity in the needles of blue spruce (*Picea pungens*) and potatoes (*Solanum tuberosum*) as a phytindicative marker of environmental conditions] // Vestnik TGU. 2017. Vol. 17, iss. 1. P. 347–348.

17. Garcia D.E., Glasser W.G., Pizzi A., Paczkowski S.P., Laborie M.P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering // New journal of chemistry. 2016. No 1. P. 234–242. doi: 10.1039/C5NJ02131F.

18. Maiti R., Rodriguez H.G., Sarkar N.C., Kumari A. Biodiversity in leaf chemistry (pigments, epicuticular wax and leaf nutrients) in woody plant species in North-eastern Mexico, a Synthesis // Forest Research. 2016. No 5. P. 170–176. doi: 10.4172/2168-9776.1000170.

19. Hyder P.W., Fredrickson E.L., Estell R.E., Tellez M., Gibbens R.P. Distribution and concentration of total phenolics, condensed tannins, and nordihydroguaiaretic acid (NDGA) in creosotebush (*Larrea tridentata*) // Biochemical Systematics and Ecology. 2020. No 30. P. 905–912. doi:10.1016/S0305-1978(02)00050-9.

20. Kernaghan G., Griffin A., Gailey J., Hussain A. Tannin tolerance and resistance in dark septate endophytes // Rhizosphere. 2022. No 23. 100574. doi: 10.1016/j.rhisph.2022.100574.

21. Nikerova K.M., Galibina N.A., Moshchenskaya Y.L., Tarelkina T.V., Borodina M.N., Sofronova I.N., Semenova L.I., Ivanova D.S., Novitskaya L.L. Upregulation of antioxidant enzymes is a biochemical indicator of abnormal xylogenesis in Karelian birch // Trees. Structure and function. 2022. No 36 (2). P. 517–529. doi: 10.1007/s00468-021-02225-5.

22. He F., Shi Y.-J., Zhao Q., Zhao K.-J., Cui X.-L., Chen L.-H., Yang H.-B., Zhang F., Mi J.-X., Huang J.-L., Wan X.-Q. Genome-wide investigation and expression profiling of polyphenol oxidase (PPO) family genes uncover likely functions in organ development and stress responses in *Populus trichocarpa* // BMC Genomics. 2021. No 22. 731. doi: 10.1186/s12864-021-08028-9.

23. Cao Y., Ma C., Chen H., Chen G., White J. C., Xing B. Copper stress in flooded soil: Impact on enzyme activities, microbial community composition and diversity in the rhizosphere of *Salix integra* // Science of the total environment. 2020. 704. 135350. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135350

24. Cisse E.-H.M., Zhang L.-J., Pu Y.-J., Miao L.-F., Li D.-D., Zhang J., Yang F. Exogenous Ca^{2+} Associated with melatonin alleviates drought-induced damage in the woody tree *Dalbergia odorifera* // Journal of plant growth regulation. 2022. No 41 (6). P. 2359–2374. doi: 10.1007/s00344-021-10449-5.

25. Huang R., Li C., Guo M., Xu H., Zhang S., Wang M., Ge Y. Caffeic acid regulated respiration, ethylene and reactive oxygen species metabolism to suppress senescence of *Malus domestica* // Postharvest biology and technology. 2022. No 194. 112074. doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112074.

26. Li C., Li J., Du X., Zhang J., Zou Y., Liu Y., Li Y., Lin H., Li H., Liu D., Lu H. Chloroplast thylakoidal ascorbate peroxidase, PtotAPX, has enhanced resistance to oxidative stress in *Populus tomentosa* // International journal of molecular sciences. 2022. No 23 (6). 3340. doi:10.3390/ijms23063340.

27. Skrypnik L., Maslennikov P., Feduraev P., Pungin A., Belov N. Changes in antioxidative compounds and enzymes in small-leaved linden (*Tilia cordata* mill.) in response to mistletoe (*Viscum album* L.) infestation // Plants. 2021. No 10 (9). 1871. doi: 10.3390/plants10091871.

Kuzmin P.A. Investigation of physiological and biochemical features of *Populus balsamifera* l. under conditions of anthropogenic stress.

The article presents data on the content of photosynthetic pigments and biochemical parameters of southern and northern exposure leaves in balsam poplar crown under anthropogenic stress. We revealed peculiarities in the dynamics of the content of photosynthetic pigments in leaves of different exposures. The maximum amount of chlorophyll was in the control zone; under conditions of anthropogenic stress, its amount decreased, while its content in the southern exposure of the tree crown was lower than

in the leaves of the northern exposure. The content of chlorophyll b in plants of anthropogenic environment increased in June and August, and carotenoids in June, July and August. The maximum number of carotenoids was in leaves of southern exposure in the main plantings. A higher activity of ascorbate oxidase was established for the entire analyzed period in the leaves of the southern and northern exposures of balsam poplar growing in plantations of the SPZ and main plantings than in control individuals. At the same time, the activity in the leaves of the southern exposure was lower than in the leaves of the northern exposure. A significant increase in enzyme activity was noted from June to August, regardless of the exposure of leaves in the tree crown. Under the conditions of the anthropogenic environment in plants, a greater amount of ascorbic acid was found in the leaves than in plants in the control. At the same time, in all zones, more ascorbic acid accumulated in the leaves of the northern exposure in balsam poplar crown. The maximum values of polyphenol oxidase activity were in the leaves of the southern exposure of the crown in balsam poplar growing in the main plantings in June, July and August. The dynamics of the activity of polyphenol oxidase and tannins in the leaves of the northern and southern exposure of the crown was characterized by growth from June to August in plants in all studied zones.

Keywords: *Populus balsamifera* L.; anthropogenic stress; chlorophyll; carotenoids; ascorbate oxidase activity; polyphenol oxidase activity; tannins; ascorbic acid; crown exposure.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 03.11.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 17.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.12.2023

Сведения об авторах

Кузьмин Петр Анатольевич, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 400062, Россия, г. Волгоград, Университетский пр., 97, E-mail: kuzmin-p@vfanc.ru.

Information about the authors

Petr A. Kuzmin, Ph.D. of Agriculture, Head of the Laboratory, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97, Universitetsky av., Volgograd, 400062, Russia, E-mail: kuzmin-p@vfanc.ru.

