

УДК 581.1:574.24

Е. Г. Тюлькова*канд. биол. наук, доц. каф. товароведения**Белорусского торгово-экономического университета потребительской кооперации**e-mail: tut-3@mail.ru***СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Представлены результаты изучения содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений различных возрастных групп, произрастающих в условиях техногенного воздействия выбросов промышленных предприятий, содержащих в своем составе летучие органические соединения. Получено, что для березы повислой в большинстве вариантов характерно повышенное содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях представителей возрастной группы до 20 лет на протяжении всего периода вегетации; у тополя пирамидального наблюдалось повышенное содержание пигментов в группе после 30 лет в мае и августе; у клена остролистного возрастной группы до 20 лет содержание пигментов фотосинтеза в сентябре превышало категорию более 30 лет, а в мае и июле – наоборот, было ниже в этой группе. Липа мелколистная в отличие от остальных изучаемых древесных растений в меньшей степени характеризовалась наличием каких-либо тенденций изменений в содержании пигментов фотосинтеза.

TYULKOVA E. G.**SEASONAL DYNAMICS OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENT CONTENT IN LEAVES OF WOOD PLANTS OF DIFFERENT AGE GROUPS UNDER EXPOSURE CONDITIONS VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS**

The article presents the results of the study of photosynthetic pigment content in leaves of wood plants of different age groups growing under conditions of technogenic impact of emissions of industrial enterprises containing volatile organic compounds. It is obtained that the birch in most variants is characterized by an increased content of chlorophylls and carotenoids in the leaves of members of the under 20 age group throughout the growing period; the pyramidal poplar showed increased pigment content in the group after 30 years in may and august; in maple of acute age group under 20 years of age content of photosynthesis pigments in september exceeded category more than 30 years, and in may and july – on the contrary, was lower in this group. Small-leaved linden, in contrast to the rest of the studied woody plants, was less characterized by the presence of any trends in changes in the content of photosynthesis pigments.

Введение

Источники техногенных элементов и их соединений в виде промышленных предприятий, неравномерно распределенные по территории и имеющие различный характер и интенсивность, создают достаточно пеструю картину загрязнения окружающей среды как по составу загрязнителей, так и по их концентрации.

Современное промышленное производство резко расширяет спектр источников воздействия и объемы последствий влияния на окружающую среду. Промышленные предприятия теплоэнергетики, топливной, химической и нефтехимической промышленности, машиностроения, цветной металлургии являются источниками летучих органических соединений, выбросы которых в настоящее время могут достигать значительного количества при изменениях в технологических процессах. В результате в окружающую среду поступают алканы, циклоалканы, непредельные и ароматические углеводороды, спирты, сложные эфиры.

Одной из наиболее уязвимых систем растительной клетки при действии различных повреждающих факторов, в том числе различных углеводородов, является фотосинтетический аппарат. Изучение влияния летучих органических соединений на содер-

жание пигментов фотосинтеза и интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений является малоизученным [1–5] по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода, формальдегида, твердых частиц, тяжелых металлов [6–18]. В связи с этим целью исследований явилось изучение содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений различных возрастных групп, произрастающих в условиях техногенного воздействия выбросов промышленных предприятий, содержащих в своем составе летучие органические соединения.

Материал и методы исследований

В качестве объектов для определения концентрации хлорофиллов и каротиноидов были выбраны листья ряда видов местных древесных растений: березы повислой *Betula pendula* Roth., клена остролистного *Acer platanoides* L., тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz., липы мелколистной *Tilia cordata* Mill.

Пробы листьев отбирали вблизи промышленных предприятий г. Гомеля, в выбросах которых летучие органические соединения (ксилолы, бензол, бутилацетат, этилацетат) содержатся в значительном количестве (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» – далее – ОАО «ГЗЛиН») по сравнению с другими загрязняющими веществами.

Что касается бенз(а)пирена, то, несмотря на невысокое наличие в выбросах предприятий теплоэнергетики (ТЭЦ-2), исследование его влияния связано с высокой токсичностью, способностью в небольших количествах вызывать значительный эффект, недостаточной изученностью характера и закономерностей влияния на физиологические процессы в листьях растений и возможностью проведения сравнительной оценки влияния полициклического ароматического углеводорода и одноядерных ароматических углеводородов на растительные организмы.

Контрольными условиями явилась часть территории национального парка Припятский (Хобненское лесничество), максимально приближенная к г. Гомелю и свободная от влияния промышленной деятельности и интенсивного транспорта.

Отбор листьев производили в течение вегетационного периода (май – август 2019 г.) с отдельно стоящих деревьев (не менее 3–5 в каждой точке), находящихся примерно в сходных климатических условиях произрастания, с высоты 1,5 м.

Возраст исследуемых деревьев оценивали путем определения диаметра ствола, который делили на среднегодовой прирост.

Для определения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листовых пластинках овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. использовали спектрофотометр Shimadzu UV-2401 PC («Shimadzu», Япония). Содержание пигментов фотосинтеза определяли через одни и трое суток после обработки. Для экстракции фотосинтетических пигментов использовали навески листьев, сырая масса которых составляла 30–40 мг. Экстракцию хлорофиллов и каротиноидов производили 99,5 %-ным ацетоном. Содержание пигментов в экстрактах рассчитывали с помощью коэффициентов экстинкции, приведенных в работе [19] для соответствующего растворителя, по формулам (1) – (4):

$$C_a = 9,784D_{662} - 0,99D_{644}, \quad (1)$$

$$C_b = 21,426D_{644} - 4,650D_{662}, \quad (2)$$

$$C_a + C_b = 5,134D_{662} + 20,436D_{644}, \quad (3)$$

$$C_k = 4,695D_{440,5} - 0,268C_{a+b}, \quad (4)$$

где C_a , C_b , C_k – средняя концентрация хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в вытяжке листьев объектов исследования (мкг/мл); $D_{440,5}$, D_{644} , D_{662} – оптическая плотность при длинах волн 440,5 нм, 644 нм и 662 нм.

Для перасчета содержания фотосинтетических пигментов на сырую массу использовали массу навесок сырых листьев и объем полученного фильтрата пигментов. Содержание пигментов представлено в мг/г сырой массы.

Достоверность различий между содержанием пигментов в экспериментальных и контрольных пробах оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью компьютерной программы *M. Excel* и *Statistica*.

Результаты исследований и их обсуждение

Характер и уровень содержания хлорофиллов и каротиноидов в пробах листьев древесных растений, как показано в таблицах 1–4, находился в определенной зависимости от их возраста. Сезонная динамика содержания пигментов фотосинтеза в листьях березы повислой, произрастающей на исследуемых территориях, характеризовалась различными направлениями: у деревьев, произрастающих в окружении ОАО «ГЗЛиН», в мае наблюдалось повышенное содержание пигментов в возрастной группе до 20 лет по сравнению с группой после 30 лет, а далее – в июле и сентябре происходило снижение уровня пигментов у молодых представителей (таблица 1).

У березы повислой, произрастающей в окружении ТЭЦ-2 и в контроле, наблюдалось повышенное содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях представителей возрастной группы до 20 лет на протяжении всего периода вегетации, за исключением контрольной территории в июле. Кроме того, представители группы до 20 лет характеризовались повышенным количеством пигментов в мае по сравнению с сентябрем; в остальных вариантах для какой-либо одной возрастной группы на всех исследуемых территориях такая тенденция выявлена не была.

Таблица 1. – Содержание фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой *Betula pendula* Roth.

Отбор проб		Содержание пигментов, мг/г сырой массы			<i>хлорофилла</i>	<i>хлорофилл (a + b)</i>
Место	Время	хлорофилл		каротиноиды	<i>хлорофилл b</i>	<i>каротиноиды</i>
		<i>a</i>	<i>b</i>			
до 20 лет						
контроль	май	2,34 ± 0,10	0,61 ± 0,01	1,32 ± 0,05	3,80	2,08
	июль	1,75 ± 0,08	0,87 ± 0,03	1,26 ± 0,05	2,02	2,08
	сентябрь	2,27 ± 0,10	0,95 ± 0,04	1,13 ± 0,05	2,38	2,84
ОАО «ГЗЛиН»	май	1,60 ± 0,07*	0,68 ± 0,02*	1,01 ± 0,03*	2,35	2,26
	июль	1,27 ± 0,05*	0,41 ± 0,01*	0,80 ± 0,03*	3,10	2,10
	сентябрь	1,51 ± 0,07*	0,52 ± 0,03*	0,86 ± 0,03*	2,90	2,36
ТЭЦ-2	май	1,85 ± 0,08*	0,77 ± 0,02*	1,20 ± 0,05*	2,40	2,18
	июль	1,58 ± 0,07*	0,56 ± 0,03*	1,06 ± 0,04*	2,82	2,02
	сентябрь	1,84 ± 0,08*	0,72 ± 0,04*	1,18 ± 0,05*	2,56	2,48
20–30 лет						
контроль	май	1,63 ± 0,06	0,40 ± 0,01	0,96 ± 0,04	4,07	1,78
	июль	2,14 ± 0,10	0,90 ± 0,03	1,16 ± 0,05	2,39	1,15
	сентябрь	2,04 ± 0,09	0,86 ± 0,03	1,19 ± 0,05	2,39	2,44
ОАО «ГЗЛиН»	май	1,44 ± 0,06*	0,76 ± 0,03*	0,87 ± 0,03*	1,89	2,53
	июль	1,25 ± 0,05*	0,40 ± 0,01*	0,75 ± 0,03*	3,13	2,20
	сентябрь	1,38 ± 0,06*	0,40 ± 0,01*	0,74 ± 0,03*	3,41	2,41
ТЭЦ-2	май	1,44 ± 0,06*	0,59 ± 0,02	0,89 ± 0,03*	2,46	2,27
	июль	1,41 ± 0,06*	0,54 ± 0,01*	0,92 ± 0,05*	2,61	2,12
	сентябрь	1,61 ± 0,07*	0,58 ± 0,02*	0,96 ± 0,04*	2,77	2,31

Окончание таблицы 1

более 30 лет						
контроль	май	1,65 ± 0,05	0,78 ± 0,03	1,05 ± 0,04	2,13	2,30
	июль	1,86 ± 0,08	0,83 ± 0,03	0,81 ± 0,02	2,38	2,35
	сентябрь	1,85 ± 0,08	0,75 ± 0,03	1,06 ± 0,04	2,46	2,45
ОАО «ГЗЛиН»	май	1,37 ± 0,06*	0,51 ± 0,02*	0,85 ± 0,08*	2,66	2,21
	июль	1,54 ± 0,07*	0,53 ± 0,02*	1,01 ± 0,04*	2,91	1,11
	сентябрь	1,63 ± 0,07*	0,49 ± 0,01*	0,82 ± 0,03*	3,32	2,59
ТЭЦ-2	май	1,40 ± 0,06*	0,56 ± 0,02*	0,89 ± 0,03*	2,50	2,20
	июль	1,32 ± 0,06*	0,49 ± 0,02*	0,88 ± 0,03*	2,69	2,06
	сентябрь	1,02 ± 0,04*	0,28 ± 0,01*	0,68 ± 0,02*	3,64	3,09

Примечание – * – достоверные значения исследуемых показателей при $p \leq 0,05$.

В результате сравнения данных по содержанию фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой из контрольных условий и исследуемых промышленных предприятий выявлено, что в большинстве вариантов количество пигментов в контроле достоверно выше. Исключение составило содержание каротиноидов в условиях воздействия выбросов ТЭЦ-2 в сентябре в категории до 20 лет.

Наиболее интенсивное превышение содержания пигментов контрольных значений (в 1,26 раза) было характерно для хлорофилла *b* в мае у березы в группе до 20 лет, произрастающей вблизи ТЭЦ-2. Максимальное снижение содержания пигментов по сравнению с контролем – в 1,56–2,68 раза – наблюдалось в сентябре у березы повислой в группе после 30 лет вблизи ТЭЦ-2.

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками значений количества пигментов березы повислой в контроле и вблизи промышленных предприятий ($F_{\text{факт.}}(1, 16) = 23,14 \div 421,78$; $F_{\text{крит.}}(1, 16) = 4,49$ при $p \leq 0,05$).

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Содержание фотосинтетических пигментов в листьях тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz.

Отбор проб		Содержание пигментов, мг/г сырой массы			хлорофилла хлорофилл <i>b</i>	хлорофилл (<i>a</i> + <i>b</i>) каротиноиды
Место	Время	хлорофилл		каротиноиды		
		<i>a</i>	<i>b</i>			
до 20 лет						
контроль	май	1,80 ± 0,08	0,68 ± 0,02	1,17 ± 0,05	2,63	2,13
	июль	1,95 ± 0,09	0,83 ± 0,03	1,07 ± 0,04	2,33	2,59
	сентябрь	1,74 ± 0,08	0,49 ± 0,01	1,26 ± 0,05	3,58	1,76
20–30 лет						
контроль	май	1,49 ± 0,06	0,67 ± 0,02	1,01 ± 0,04	2,24	2,13
	июль	1,68 ± 0,07	0,60 ± 0,02	0,95 ± 0,04	2,78	2,41
	сентябрь	1,86 ± 0,08	0,69 ± 0,02	1,43 ± 0,06	2,68	1,78
ОАО «ГЗЛиН»	май	0,60 ± 0,02*	0,21 ± 0,01*	0,37 ± 0,01*	2,86	2,19
	июль	1,27 ± 0,05*	0,41 ± 0,01*	0,97 ± 0,04	3,10	1,73
	сентябрь	1,19 ± 0,05*	0,30 ± 0,01*	0,85 ± 0,03*	3,96	1,75
более 30 лет						
кон- троль	май	1,61 ± 0,07	0,58 ± 0,02	1,04 ± 0,04	2,77	2,11
	июль	1,92 ± 0,09	0,94 ± 0,04	1,24 ± 0,05	2,04	2,31
	сентябрь	2,47 ± 0,10	0,99 ± 0,04	2,0 ± 0,09	2,50	1,73

Окончание таблицы 2

ОАО «ГЗЛиН»	май	1,15 ± 0,05*	0,36 ± 0,01*	0,88 ± 0,03*	3,19	1,72
	июль	0,96 ± 0,04*	0,30 ± 0,01*	0,54 ± 0,02*	3,20	3,13
	сентябрь	1,88 ± 0,08*	0,51 ± 0,02*	1,32 ± 0,06*	3,69	1,81
ТЭЦ-2	май	1,30 ± 0,06*	0,42 ± 0,02*	0,84 ± 0,03*	3,10	2,05
	июль	1,06 ± 0,04*	0,40 ± 0,02*	0,65 ± 0,02*	2,65	2,24
	сентябрь	1,17 ± 0,06*	0,44 ± 0,02*	0,79 ± 0,03*	2,66	2,73

Примечание – * – достоверные значения исследуемых показателей при $p \leq 0,05$.

В окружении ОАО «ГЗЛиН» наблюдалось повышенное содержание пигментов в группе после 30 лет в мае и августе; сезонная динамика содержания пигментов фотосинтеза в листьях тополя пирамидального, произрастающего в контрольной зоне, характеризовалась повышенным содержанием пигментов в возрастной группе до 20 лет по сравнению с группой после 30 лет в мае и июле, а далее, в сентябре, происходило снижение уровня пигментов у молодых представителей (таблица 2).

Представители группы 20–30 лет во всех зонах и более 30 лет – в пределах контроля и ОАО «ГЗЛиН» характеризовались повышенным количеством пигментов в сентябре по сравнению с маем.

В результате сравнения данных по содержанию фотосинтетических пигментов в листьях тополя пирамидального из контрольных условий и исследуемых промышленных предприятий выявлено, что в большинстве вариантов количество пигментов в контроле было выше. Исключение составило содержание каротиноидов в возрастной группе 20–30 лет в условиях воздействия выбросов ОАО «ГЗЛиН» в июле.

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками значений количества пигментов тополя пирамидального в контроле и вблизи промышленных предприятий ($F_{\text{факт.}}(1, 16) = 13,66 \div 688,6$; $F_{\text{крит.}}(1, 16) = 4,49$ при $p \leq 0,05$).

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях клена остролистного *Acer platanoides* L. представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Содержание фотосинтетических пигментов в листьях клена остролистного *Acer platanoides* L.

Отбор проб		Содержание пигментов, мг/г сырой массы			хлорофилл а	хлорофилл (а + b)
Место	Время	хлорофилл		каротиноиды	хлорофилл b	каротиноиды
		a	b			
до 20 лет						
контроль	май	2,85 ± 0,12	1,13 ± 0,05	1,52 ± 0,07	2,52	2,19
	июль	2,79 ± 0,13	0,97 ± 0,04	1,83 ± 0,08	2,86	2,06
	сентябрь	2,73 ± 0,12	1,20 ± 0,05	1,50 ± 0,07	2,28	2,61
ОАО «ГЗЛиН»	май	1,08 ± 0,04*	0,36 ± 0,02*	0,42 ± 0,01*	2,97	3,41
	июль	1,31 ± 0,06*	0,43 ± 0,01*	0,74 ± 0,03*	3,05	2,35
	сентябрь	2,27 ± 0,10*	1,09 ± 0,04*	1,31 ± 0,06*	2,09	2,56
ТЭЦ-2	май	1,66 ± 0,07*	0,65 ± 0,02*	0,94 ± 0,04*	2,55	1,71
	июль	1,65 ± 0,07*	0,58 ± 0,02*	0,97 ± 0,04*	2,84	2,30
	сентябрь	1,71 ± 0,08*	0,64 ± 0,02*	1,02 ± 0,04*	2,67	2,13
20–30 лет						
контроль	май	2,96 ± 0,13	1,42 ± 0,06	1,69 ± 0,07	2,08	2,31
	июль	2,96 ± 0,14	1,41 ± 0,06	1,74 ± 0,08	2,10	2,51
	сентябрь	2,75 ± 0,13	1,65 ± 0,07	1,50 ± 0,07	1,66	2,93

Окончание таблицы 3

ОАО «ГЗЛиН»	май	1,51 ± 0,07*	0,51 ± 0,02*	0,89 ± 0,03*	2,97	2,27
	июль	1,97 ± 0,08*	0,60 ± 0,02*	1,03 ± 0,04*	3,28	2,50
	сентябрь	2,74 ± 0,13	1,13 ± 0,05*	1,49 ± 0,05	2,35	2,60
ТЭЦ-2	май	1,49 ± 0,06*	0,57 ± 0,02*	0,98 ± 0,04*	2,61	1,94
	июль	1,98 ± 0,09*	0,79 ± 0,02*	1,05 ± 0,04*	3,03	2,50
	сентябрь	2,57 ± 0,10*	1,24 ± 0,05*	1,73 ± 0,04*	2,67	2,13
более 30 лет						
контроль	май	2,67 ± 0,11	1,31 ± 0,06	1,44 ± 0,06	2,04	2,09
	июль	2,53 ± 0,10	1,07 ± 0,04	1,25 ± 0,05	2,35	2,87
	сентябрь	2,82 ± 0,13	1,42 ± 0,06	1,47 ± 0,06	1,99	2,88
ОАО «ГЗЛиН»	май	2,14 ± 0,10*	1,22 ± 0,05*	1,01 ± 0,04*	1,76	3,32
	июль	2,21 ± 0,10*	0,97 ± 0,04*	1,76 ± 0,08*	2,28	2,24
	сентябрь	1,90 ± 0,09*	0,67 ± 0,02*	0,98 ± 0,04*	2,85	2,63
ТЭЦ-2	май	1,98 ± 0,09*	0,79 ± 0,02*	0,99 ± 0,04*	2,51	3,15
	июль	2,01 ± 0,08*	0,82 ± 0,03*	1,03 ± 0,04*	2,45	2,74
	сентябрь	1,42 ± 0,06*	0,61 ± 0,02*	0,91 ± 0,04*	2,32	2,68

Примечание – * – достоверные значения исследуемых показателей при $p \leq 0,05$.

В сентябре у представителей возрастной группы до 20 лет содержание пигментов фотосинтеза превышало категорию более 30 лет в зоне влияния ОАО «ГЗЛиН» и ТЭЦ-2, а в мае и июле, наоборот, было ниже в группе до 20 лет.

При произрастании на контрольной территории в начале периода вегетации и его середине клен остролистный в возрасте до 20 лет отличался более высоким количеством пигментов, тогда как в сентябре этот показатель у представителей данной категории был ниже, чем в группе более 30 лет.

Клен остролистный в группе более 30 лет характеризовался особенностью повышенного содержания фотосинтетических пигментов в мае по сравнению с сентябрем на территориях ОАО «ГЗЛиН» и ТЭЦ-2 и более высоким уровнем пигментов в сентябре по сравнению с маем при произрастании на контрольной территории. Представители от 20 до 30 лет отличались повышенным содержанием пигментов в мае в контроле и в сентябре – в условиях развития вблизи ТЭЦ-2.

В результате сравнения данных по содержанию фотосинтетических пигментов в листьях тополя пирамидального из контрольных условий и исследуемых промышленных предприятий выявлено, что в большинстве вариантов количество пигментов в контроле было выше. Исключение составило содержание хлорофилла *a* и каротиноидов в сентябре 2019 г. в группе 20–30 лет вблизи ОАО «ГЗЛиН».

Наиболее интенсивное превышение содержания пигментов контрольных значений (в 1,22 раза) было характерно для каротиноидов в июле у клена остролистного в группе после 30 лет, произрастающего вблизи ОАО «ГЗЛиН».

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками значений количества пигментов клена остролистного в контроле и вблизи промышленных предприятий ($F_{\text{факт.}}(1, 16) = 7,50 \div 218,70$; $F_{\text{крит.}}(1, 16) = 4,49$ при $p \leq 0,05$).

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Содержание фотосинтетических пигментов в листьях липы мелколистной *Tilia cordata* Mill.

Отбор проб		Содержание пигментов, мг/г сырой массы			<i>хлорофилла</i>	<i>хлорофилл (a + b)</i>
Место	Время	хлорофилл		каротиноиды	<i>хлорофиллb</i>	<i>каротиноиды</i>
		<i>a</i>	<i>b</i>			
до 20 лет						
контроль	май	2,37 ± 0,06	0,81 ± 0,01	1,47 ± 0,02	2,93	2,17
	июль	3,14 ± 0,15	1,31 ± 0,06	1,62 ± 0,07	2,39	2,15
	сентябрь	2,66 ± 0,12	1,48 ± 0,06	1,61 ± 0,07	1,79	3,88
ОАО «ГЗЛиН»	май	2,15 ± 0,10*	1,06 ± 0,04*	1,25 ± 0,06*	2,03	2,57
	июль	3,40 ± 0,15*	1,57 ± 0,07*	2,01 ± 0,09*	2,17	2,47
	сентябрь	1,72 ± 0,08*	0,52 ± 0,02*	0,84 ± 0,03*	3,30	2,66
ТЭЦ-2	май	3,15 ± 0,04*	1,45 ± 0,01*	1,95 ± 0,01*	2,17	2,36
	июль	1,98 ± 0,09*	0,87 ± 0,03*	1,10 ± 0,05*	2,28	2,59
	сентябрь	2,07 ± 0,08*	1,01 ± 0,04*	1,14 ± 0,05*	2,05	3,05
20–30 лет						
контроль	май	2,44 ± 0,06	0,96 ± 0,01	1,54 ± 0,02	2,54	2,70
	июль	2,61 ± 0,12	1,18 ± 0,05	1,26 ± 0,05	2,21	2,45
	сентябрь	2,08 ± 0,08	1,16 ± 0,05	1,26 ± 0,05	1,79	3,42
ОАО «ГЗЛиН»	май	1,80 ± 0,08*	0,76 ± 0,03*	1,04 ± 0,04*	2,37	2,46
	июль	1,68 ± 0,07*	0,60 ± 0,02*	1,01 ± 0,04*	2,80	2,26
	сентябрь	1,90 ± 0,09*	0,80 ± 0,03*	1,07 ± 0,04*	2,38	2,27
ТЭЦ-2	май	2,02 ± 0,02*	0,84 ± 0,01*	1,24 ± 0,01*	2,40	2,31
	июль	1,96 ± 0,07*	0,86 ± 0,03*	1,09 ± 0,04*	2,28	2,59
	сентябрь	2,42 ± 0,11*	1,06 ± 0,04*	1,25 ± 0,05*	2,28	2,50
более 30 лет						
контроль	май	2,51 ± 0,07	0,99 ± 0,01	1,56 ± 0,02	2,54	2,24
	июль	2,62 ± 0,10	1,10 ± 0,05	1,58 ± 0,07	2,38	2,35
	сентябрь	2,53 ± 0,12	1,54 ± 0,07	1,49 ± 0,06	1,64	2,72
ОАО «ГЗЛиН»	май	1,66 ± 0,07*	0,60 ± 0,03*	1,04 ± 0,04*	2,77	2,18
	июль	1,99 ± 0,09*	0,85 ± 0,02*	1,23 ± 0,05*	2,34	2,31
	сентябрь	1,99 ± 0,08*	0,85 ± 0,03*	1,13 ± 0,05*	2,34	2,50
ТЭЦ-2	май	1,91 ± 0,04*	0,76 ± 0,02*	1,06 ± 0,02*	2,51	2,52
	июль	3,04 ± 0,14*	1,35 ± 0,06*	1,84 ± 0,08*	2,25	1,34
	сентябрь	1,93 ± 0,08*	0,78 ± 0,03*	1,0 ± 0,04*	2,47	2,61

Липа мелколистная в отличие от остальных изучаемых древесных растений в меньшей степени характеризовалась наличием каких-либо тенденций изменений в содержании пигментов фотосинтеза. Так, в листьях липы мелколистной, произрастающей в окружении промышленных предприятий, в мае наблюдалась закономерность роста содержания пигментов фотосинтеза от возрастной группы более 30 лет к представителям до 20 лет. На контрольной территории в начале периода вегетации липа мелколистная в возрасте после 30 лет отличалась более высоким количеством пигментов, тогда как далее в сентябре этот показатель у представителей данной категории был ниже, чем в группе до 20 лет.

Тенденция снижения содержания фотосинтетических пигментов в сентябре по сравнению с маем наблюдалась на территориях ОАО «ГЗЛиН» и ТЭЦ-2 в группе до 20 лет. В группах 20–30 лет и более 30 лет в сентябре содержание пигментов было выше, чем в мае при росте в окружении ОАО «ГЗЛиН» и ТЭЦ-2.

В результате сравнения данных по содержанию фотосинтетических пигментов в листьях из контрольных условий и исследуемых промышленных предприятий выявлено, что в большинстве вариантов количество пигментов в контроле было выше. Исключение составило содержание хлорофилла *b* в 2019 г. в возрастной группе до 20 лет в мае и всех пигментов в июле в условиях воздействия выбросов ОАО «ГЗЛиН», а также количество всех пигментов вблизи ТЭЦ-2 в мае. Представители липы мелколистной от 20 до 30 лет в 2019 г. отличались более высоким по сравнению с контролем содержанием хлорофилла *a* в сентябре вблизи ТЭЦ-2, а группа более 30 лет – всех пигментов в июле на этой же территории.

Наиболее значительное превышение содержания пигментов контрольных значений (в 1,79 раза) было характерно для хлорофилла *b* в мае 2019 г. у липы мелколистной в группе до 20 лет, произрастающей вблизи ТЭЦ-2. Максимальное снижение содержания пигментов по сравнению с контролем – в 2,41–3,78 раза – наблюдалось в мае 2018 г. у липы мелколистной в группе после 30 лет вблизи ОАО «ГЗЛиН», а минимальное – в 1,14–1,24 раза – в мае 2019 г. в группе 20–30 лет на территории ТЭЦ-2.

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками значений количества пигментов липы мелколистной в контроле и вблизи промышленных предприятий ($F_{\text{факт.}}(1, 16) = 21,08 \div 277,44$; $F_{\text{крит.}}(1, 16) = 4,49$ при $p \leq 0,05$).

В целом, если сравнивать условия произрастания древесных растений на двух исследуемых территориях, то за исследуемый период у березы повислой, клена остролистного и липы мелколистной в большинстве вариантов наблюдалось более низкое содержание пигментов фотосинтеза по сравнению с контрольной территорией под влиянием выбросов ОАО «ГЗЛиН», содержащих в своем составе о-ксилол и бутилацета, а у тополя пирамидального – на территории ТЭЦ-2, в выбросах которой присутствует бенз(а)пирен.

Заключение

Характер и уровень содержания хлорофиллов и каротиноидов в пробах листьев древесных растений находился в определенной зависимости от их возраста.

У березы повислой в большинстве вариантов наблюдалось повышенное содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях представителей возрастной группы до 20 лет на протяжении всего периода вегетации; представители этой группы характеризовались повышенным количеством пигментов в мае по сравнению с сентябрем; в остальных вариантах для какой-либо одной возрастной группы на всех исследуемых территориях такая тенденция выявлена не была.

В техногенных условиях у тополя пирамидального наблюдалось повышенное содержание пигментов в группе после 30 лет в мае и августе; в контрольной зоне, наоборот, повышенное содержание пигментов приходилось на категорию до 20 лет в мае и июле. Тополь пирамидальный в возрасте 20–30 лет во всех зонах и более 30 лет – в пределах контроля и ОАО «ГЗЛиН» характеризовался повышенным количеством пигментов в сентябре по сравнению с маем.

У представителей клена остролистного возрастной группы до 20 лет содержание пигментов фотосинтеза в сентябре превышало категорию более 30 лет в зоне влияния ОАО «ГЗЛиН» и ТЭЦ-2, а в мае и июле, наоборот, было ниже в группе до 20 лет. Клен остролистный в группе более 30 лет характеризовался особенностью повышенного содержания фотосинтетических пигментов в мае по сравнению с сентябрем на территориях ОАО «ГЗЛиН» и ТЭЦ-2. Представители от 20 до 30 лет отличались повышенным содержанием пигментов в мае в контроле и в сентябре – в условиях развития вблизи ТЭЦ-2.

Липа мелколистная в отличие от остальных изучаемых древесных растений в меньшей степени характеризовалась наличием каких-либо тенденций изменений в содержании пигментов фотосинтеза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фотосинтетичні пігменти рослин *Carex hirta* L. за умов нафтового забруднення ґрунту / О. І. Терек [та ін.] // Физиология и биохимия культур. растений. – 2008. – № 3. – С. 238–244.
2. Ланкин, А. В. Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.01.15 / А. В. Ланкин ; Ин-т физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. – М., 2016. – 22 с.
3. Singh, R. Fluoranthene, a polycyclic aromatic hydrocarbon, inhibits light as well as dark reactions of photosynthesis in wheat (*Triticum aestivum*) / R. Singh, T. A. Jajoo // Ecotoxicology and Environ. Safety. – 2014. – Vol. 109. – P. 110–115.
4. Khpalwakab, W. Individual and combined effects of fluoranthene, phenanthrene, mannitol and sulfuric acid on marigold (*Calendula officinalis*) / W. Khpalwakab, S. M. Abdel-dayemac, H. Sakugawa // Ecotoxicology and Environ. Safety. – 2018. – Vol. 148. – P. 834–841.
5. Uptake and phytotoxicity of anthracene and benzo[k]fluoranthene applied to the leaves of celery plants (*Apium graveolens* var. *secalinum* L.) / J. Wiczoreka [et al.] // Ecotoxicology and Environ. Safety. – 2015. – Vol. 115. – P. 19–25.
6. Prustya, B. A. K. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India / B. A. K. Prustya, P. C. Mishraa, P. A. Azeezb // Ecotoxicology and Environ. Safety. – 2005. – Vol. 60. – P. 228–235.
7. Effects of copper on the growth, antioxidant enzymes and photosynthesis of spinach seedlings / Q. Gongabl [et al.] // Ecotoxicology and Environ. Safety. – 2019. – Vol. 171. – P. 771–780.
8. Говорова, А. Ф. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Кольском полуострове (на примере комбината «Североникель») : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 / А. Ф. Говорова ; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2004. – 23 с.
9. Коротченко, И. С. Влияние тяжелых металлов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях моркови / И. С. Коротченко // Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 86–91.
10. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла древесных растений в условиях различной транспортной нагрузки / М. Ю. Алиева [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2014. – № 1 (3). – С. 701–704.
11. Двоглазова, А. А. Эколого-биологические особенности древесных и травянистых растений в насаждениях урбанозкосистемы крупного промышленного центра (на примере г. Ижевска) : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / А. А. Двоглазова ; Ижевс. гос. с.-х. акад. – Уфа, 2009. – 21 с.
12. Photosynthetic response of maize plants against cadmium and paraquat impact / G. Chaneva [et al.] // Water, Air and Soil Pollut. – 2010. – № 1–4. – P. 287–293.
13. Гулиев, Р. Б. Оценка содержания хлорофилла в растениях, подвергнутых антропогенному воздействию, спектрометрическим методом / Р. Б. Гулиев, Б. М. Азизов, А. А. Аббасаде // Оптика и спектроскопия. – 2009. – № 3. – С. 514–517.
14. Заплатин, Б. П. Биотестирование атмосферных загрязнений по содержанию хлорофилла и активности полифенолоксидазы / Б. П. Заплатин // Изв. Пенз. гос. пед. ун-та. – 2008. – № 10. – С. 82–87.

15. Effect of Pb, Zn and their interaction on chlorophyll content and antioxidant protective system in *Houttuynia cordata* / Li Zheng-Zheng [et al.] // Acta Ecol. Sin. – 2007. – Nr 12. – P. 5441–5446.

16. Shi-sheng, K. Effect of copper on the photosynthesis and oxidative metabolism of *Amaranthus tricolor* seedlings / K. Shi-sheng // Agr. Sci. China. – 2007. – Nr 10. – P. 1182–1192.

17. Бухарина, И. Л. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) / И. Л. Бухарина, П. А. Кузьмин, И. И. Гибадулина // Вестн. Удмурт. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 20–25.

18. Response of gas-exchange characteristics and chlorophyll fluorescence to acute sulfur dioxide exposure in landscape plants / J. Duan [et al.] // Ecotoxicology and Environ. Safety. – 2019. – Vol. 171. – P. 122–129.

19. Кабашникова, Л. Ф. Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков / Л. Ф. Кабашникова. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 327 с.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 21.04.2020