

Е. Г. Тюлькова

Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Беларусь,  
e-mail: tut-3@mail.ru

### ДЕЙСТВИЕ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ САЖЕНЦЕВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

Изучение влияния группы летучих органических соединений, представителями которых являются некоторые ароматические вещества, на интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений, с одной стороны, является актуальным в целях сравнительного анализа степени их токсичности при одиночном и совместном воздействии, с другой – малоизученным по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода. В этой связи цель работы – изучение характера изменения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, а также показателей фотохимической активности фотосинтетического аппарата древесных растений (на примере саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и клена остролистного *Acer platanoides* L.) в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз *o*-ксилола и бенз(а)пирена. Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок саженцев древесных растений городской среды ароматическими углеводородами свидетельствуют о том, что при воздействии *o*-ксилола на листовые пластинки исследуемых древесных саженцев выявлено наибольшее снижение содержания хлорофилла *a* и *b* через одни сутки у липы мелколистной, а у клена остролистного – каротиноидов. Использование бенз(а)пирена обусловило максимальное снижение количества хлорофилла *a* и каротиноидов через трое суток у липы мелколистной, а у клена остролистного – хлорофилла *b* через одни сутки опыта. В целом растворы *o*-ксилола и бенз(а)пирена оказали наибольшее воздействие на изменение содержания пигментов фотосинтеза липы мелколистной и параметров флуоресценции клена остролистного. При этом введение *o*-ксилола обусловило наибольшее снижение величины эффективного квантового выхода и фотохимического тушения флуоресценции через одни сутки у клена остролистного, а бенз(а)пирена – значения нефотохимического тушения флуоресценции.

**Ключевые слова:** саженцы липы мелколистной *Tilia cordata* Mill., саженцы клена остролистного *Acer platanoides* L., *o*-ксилол, бенз(а)пирен, фотосинтетические пигменты, эффективный квантовый выход, фотохимическое и нефотохимическое тушения

E. G. Tyulkova

Belarusian Trade and Economic University of Consumer Cooperatives, Gomel, Belarus, e-mail: tut-3@mail.ru

### THE EFFECT OF AROMATIC HYDROCARBONS ON PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF WOODY PLANTS SAPLINGS

The study of the volatile organic compounds group influence represent some aromatic substances on the intensity of the photosynthetic apparatus plants functioning, on the one hand, is relevant for the purpose of comparative analysis of their toxicity degree at single and combined action, on the other hand understudied compared to the effects of oxides of nitrogen, carbon, sulfur, ammonia, hydrogen sulfide. In this regard, the aim of the work was to study the nature of changes in the content of chlorophylls *a*, *b* and carotenoids, as well as indicators of the woody plants photosynthetic apparatus photochemical activity (at least the seedlings of small-leaved linden *Tilia cordata* Mill. and maple holly *Acer platanoides* L.) under specified experimental conditions under the influence of *o*-xylol and benz(a)pyrene different doses. The results of the experiment on the processing of woody plants seedlings leaf blades in urban environment aromatic hydrocarbons indicate that when exposed to *o*-xylol on the leaf blade studied woody seedlings revealed a decrease in the content of chlorophyll *a* and *b* through one day at small-leaved linden, and maple holly – carotenoids. The use of benz(a)pyrene resulted in a maximum reduction in the number of chlorophyll *a* and carotenoids after three days, the small-leaved linden and maple holly – a chlorophyll *b* through one day experience. In general, solutions of *o*-xylol and benz(a)pyrene had the greatest impact on the change in the content of small-leaved linden photosynthesis pigments and the fluorescence parameters of holly maple. The introduction of *o*-xylol caused the largest decrease in effective quantum output and photochemical quenching of fluorescence after one day at the maple tree, and benz(a)pyrene – values of non-photochemical fluorescence quenching.

**Keywords:** small-leaved linden *Tilia cordata* Mill. seedlings, maple holly *Acer platanoides* L. seedlings, *o*-xylol, benz(a)pyrene, photosynthetic pigments, effective quantum yield, photochemical quenching, non-photochemical quenching

А. Р. Цюлькова

Беларускі гандлёва-эканамічны ўніверсітэт спажывецкай кааперацыі, Гомель, Беларусь, e-mail: tut-3@mail.ru

**ДЗЕЯННЕ АРАМАТЫЧНЫХ ВУГЛЕВАДАРОДАЎ НА ФОТАСІНТЭТЫЧНЫ АПАРАТ САДЖАНЦАЎ ДРАЎНЯНЫХ РАСЛІН**

Вывучэнне ўплыву групы лятучых арганічных злучэнняў, прадстаўнікамі якіх з'яўляюцца некаторыя ароматычныя рэчывы, на інтэнсіўнасць функцыянавання фотасінтэтычнага апарату раслін, з аднаго боку, з'яўляецца актуальным у мэтах параўнальнага аналізу ступені іх таксічнасці пры адзіночным і сумесным уздзеянні, з другога боку – малавывучаным пры параўнанні з уздзеяннем аксідаў азоту, вугляроду, серы, аміяку, серавадароду. У гэтай сувязі мэтай працы з'явілася вывучэнне характару змены ўтрымання хларафіла *a*, *b* і караціноідаў, а таксама паказчыкаў фотакхімічнай актыўнасці фотасінтэтычнага апарату драўняных раслін (на прымеры саджанцаў ліпы драбналістай *Tilia cordata* Mill. і клёна вастралістага *Acer platanoides* L.) у зададзеных ўмовах эксперыменту пры ўздзеянні розных доз *o*-ксілола і бенз(а)пірэна. Вынікі эксперыменту па апрацоўцы ліставых пласцінак саджанцаў драўняных раслін гарадскога асяроддзя ароматычнымі вуглевадародамі сведчаць аб тым, што пры ўздзеянні *o*-ксілола на ліставыя пласцінкі доследных драўняных саджанцаў выяўлена найбольшае зніжэнне ўтрымання хларафіла *a* і *b* праз адныя суткі ў ліпы драбналістай, а ў клёна вастралістага – караціноідаў. Выкарыстанне бенз(а)пірэна абумовіла максімальнае зніжэнне колькасці хларафіла *a* і караціноідаў праз тры сутак у ліпы драбналістай, а ў клёна вастралістага – хларафіла *b* праз адныя суткі вопыту. У цэлым раствору *o*-ксілола і бенз(а)пірэна аказалі найбольшае ўздзеянне на змяненне зместу пігментаў фотасінтэзу ліпы драбналістай і параметраў флуарэсцэнцыі клёна вастралістага. Пры гэтым ўвядзенне *o*-ксілола абумовіла найбольшае зніжэнне велічыні эфектыўнага квантавага выхаду і фотакхімічнага тушэння флуарэсцэнцыі праз адзін дзень у клёна вастралістага, а бенз(а)пірэна – значэння нефотакхімічнага тушэння флуарэсцэнцыі.

**Ключавыя словы:** саджанцы ліпы драбналістай *Tilia cordata* Mill., саджанцы клёна вастралістага *Acer platanoides* L., *o*-ксілол, бенз(а)пірэн, фотасінтэтычныя пігменты, эфектыўны квантавы выхад, фотакхімічнае і нефотакхімічнае тушэнні

**Введение.** Известно, что одной из наиболее уязвимых систем растительной клетки при действии различных повреждающих факторов является фотосинтетический аппарат [1–6]. В последние годы в Республике Беларусь наблюдается рост количества стационарных источников и объемов выбросов техногенных элементов и их соединений в атмосферный воздух от стационарных источников по сравнению с мобильными [7]. Для отдельных промышленных предприятий Беларуси характерно наличие в преобладающем количестве в выбросах загрязняющих веществ в атмосферу группы неметановых летучих органических соединений, в результате чего в атмосферу поступают алканы, циклоалканы, непредельные и ароматические углеводороды, спирты, сложные эфиры. Изучение влияния данной группы соединений на интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений, с одной стороны, является актуальным в целях сравнительного анализа степени их токсичности при одиночном и совместном воздействии [8–15], а с другой – малоизученным по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода [2, 3, 5, 6, 10]. В этой связи цель работы – изучение характера изменения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, а также показателей фотохимической активности фотосинтетического аппарата древесных растений (на примере саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и клена остролистного *Acer platanoides* L.) в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз *o*-ксілола и бенз(а)пірэна.

**Материалы и методы исследования.** Выбор саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и клена остролистного *Acer platanoides* L. обусловлен тем, что они являются одними из наиболее распространенных представителей древесных растений в городских условиях. Использование *o*-ксілола обусловлено преобладающим количеством этого соединения в выбросах отдельных промышленных предприятий города Гомеля (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей») по сравнению с другими загрязняющими веществами. Что касается бенз(а)пірэна, то несмотря на невысокое наличие в выбросах предприятий теплоэнергетики (ТЭЦ-2), его использование в эксперименте связано с высокой токсичностью, способностью в небольших количествах вызывать значительный эффект, недостаточной изученностью эффектов влияния и возможностью проведения сравнительной оценки влияния полициклического ароматического углеводорода и одноядерных ароматических углеводородов (*o*-ксілол) на растительные организмы.

Листовые пластинки древесных саженцев обрабатывали водными растворами углеводов. Размеры используемых доз углеводов рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ [16]. В соответствии с нормативами ПДК ксилолов в атмосферном воздухе является 200 мкг/м<sup>3</sup>; бенз(а)-пирена – 5,0 нг/м<sup>3</sup>. Для *o*-ксилолола использовали величину максимальной разовой ПДК; для бенз(а)пирена – среднесуточную ПДК [16].

В качестве контроля использовали необработанные растения; экспериментальными явились растения, обработанные водными растворами исследуемых соединений в следующих концентрациях: 0,0002–0,06 мкг/мл *o*-ксилолола; 0,000 005–0,0015 нг/мл бенз(а)пирена.

Обработку листовых пластинок древесных саженцев осуществляли путем опрыскивания водными растворами (по 50 мл водного раствора каждой дозы вводимого соединения). Для определения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листовых пластинках саженцев древесных растений 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 в трех биологических повторностях. Содержание пигментов в экстрактах рассчитывали по уравнениям Ветштейна и Хольма с помощью коэффициентов экстинкции, приведенных в работе [1] для соответствующего растворителя, по формулам:

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

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

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

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

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

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

Для оценки фотохимической активности фотосистемы II использовали метод импульсно-модулированной флуоресцентной спектроскопии (PAM, pulse-amplitude modulated fluorometry), позволяющий проводить прижизненную регистрацию кинетической кривой индукции флуоресценции хлорофилла *a*. Параметры флуоресценции хлорофилла *a* измеряли на флуориметре Dual-PAM 100 («Walz», Германия), согласно методам [17–19]. Листья предварительно адаптировали к темноте в течение 15 мин. Модулированный с низкой частотой (32 Гц) свет (650 нм) очень низкой интенсивности (0,04 мкмоль квант/м<sup>2</sup>с) возбуждал флуоресценцию, повышая ее минимальный уровень ( $F_0$ ). Повышение выхода флуоресценции до уровня  $F_m$  инициировали включением света (665 нм) высокой интенсивности (3500 мкмоль квант/м<sup>2</sup>с). Параметры флуоресценции измеряли с использованием актиничного света (120 мкмоль квант/м<sup>2</sup>с) и рассчитывали по формулам:

$$Y(II) = \frac{F'_m - F}{F'_m}, \quad (5)$$

$$qP = \frac{F'_m - F}{F'_m - F_0}, \quad (6)$$

$$qN = \frac{F_m - F'_m}{F_m - F_0} \quad (7)$$

где  $F_0$  и  $F'_0$  – минимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету соответственно;  $F_m$  и  $F'_m$  – максимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету соответственно;  $F$  – выход флуоресценции

на фоне действия модулированного и актиничного света;  $Y(II)$  – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II;  $qP$  и  $qN$  – фото- и нефотохимические тушения флуоресценции хлорофилла *a* соответственно.

Достоверность различий между содержанием пигментов и параметрами флуоресценции хлорофилла *a* в экспериментальных и контрольных пробах оценивали с помощью дисперсионного анализа. Однофакторный дисперсионный анализ проводился в отношении выборок контрольных и экспериментальных значений содержания пигментов, а также выборок экспериментальных значений содержания пигментов через одни и трое суток после обработки. Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью *Microsoft Excel*.

С целью проведения сравнительной количественной оценки изменений содержания пигментов и параметров флуоресценции хлорофилла *a* древесных саженцев проводили вычисление среднего значения разности изучаемых параметров в начале и конце опыта в экспериментальных образцах при обработке каждым из использованных соединений.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента по обработке углеводородами представлены в табл. 1 и 2.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками контрольных и экспериментальных значений количества пигментов ( $F_{\text{фактич}}(1, 6) = 7,85 \div 35,14$  для липы мелколистной *Tilia cordata* Mill.;  $F_{\text{фактич}}(1, 6) = 8,22 \div 150,87$  для клена остролистного *Acer platanoides* L.;  $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$  при  $p \leq 0,05$ ). Исключение составили следующие варианты опыта: у клена остролистного через одни сутки при обработке раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,000 005 нг/мл (каротиноиды) и через трое суток – раствором *o*-ксилола 0,01 мкг/мл (каротиноиды). Таким образом, недостоверные различия между экспериментальными и контрольными пробами были характерны для клена остролистного. Для липы мелколистной недостоверные различия между контролем и экспериментальными пробами отмечены не были.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа выборок, включающих содержание пигментов через одни и трое суток после обработки, также позволили установить достоверность

Т а б л и ц а 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки *o*-ксилолом

Концентрация раствора <i>o</i> -ксилола, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
Через одни сутки после обработки						
Контроль	2,44 ± 0,10	0,98 ± 0,05	1,58 ± 0,07	2,79 ± 0,12	1,31 ± 0,05	1,79 ± 0,08
0,0002	1,83 ± 0,05*	0,73 ± 0,04*	1,14 ± 0,05*	2,67 ± 0,10*	1,08 ± 0,02*	1,63 ± 0,05*
0,01	1,81 ± 0,08*	0,73 ± 0,04*	1,12 ± 0,06*	2,62 ± 0,08*	0,96 ± 0,03*	1,26 ± 0,05*
0,02	1,78 ± 0,04*	0,72 ± 0,03*	1,10 ± 0,06*	1,83 ± 0,05*	0,79 ± 0,02*	1,15 ± 0,04*
0,04	1,73 ± 0,06*	0,70 ± 0,02*	1,08 ± 0,04*	1,72 ± 0,04*	0,75 ± 0,04*	1,06 ± 0,03*
0,06	1,65 ± 0,05*	0,71 ± 0,01*	1,05 ± 0,05*	1,51 ± 0,06*	0,62 ± 0,03*	0,96 ± 0,02*
Через трое суток после обработки						
Контроль	3,89 ± 0,10	1,87 ± 0,08	2,47 ± 0,10	2,57 ± 0,10	1,03 ± 0,04	1,86 ± 0,08
0,0002	2,11 ± 0,05*	1,05 ± 0,04*	1,19 ± 0,03*	2,75 ± 0,09*	1,24 ± 0,05*	1,89 ± 0,08*
0,01	2,06 ± 0,06*	0,99 ± 0,04*	1,12 ± 0,04*	2,61 ± 0,08*	1,06 ± 0,04*	1,87 ± 0,07
0,02	2,04 ± 0,08*	0,95 ± 0,03*	1,06 ± 0,04*	2,0 ± 0,07*	0,87 ± 0,03*	1,20 ± 0,05*
0,04	2,01 ± 0,07*	0,85 ± 0,02*	1,01 ± 0,04*	1,73 ± 0,07*	0,73 ± 0,03*	1,07 ± 0,04*
0,06	1,67 ± 0,04*	0,60 ± 0,02*	0,99 ± 0,02*	1,65 ± 0,06*	0,54 ± 0,02*	1,03 ± 0,04*

П р и м е ч а н и е. Здесь и далее в табл. 2–4 достоверные значения исследуемых параметров (при их сравнении с контролем) при  $p \leq 0,05$  обозначены \*.

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	хлорофилл а	хлорофилл b	каротиноиды	хлорофилл а	хлорофилл b	каротиноиды
Через одни сутки после обработки						
Контроль	2,44 ± 0,10	0,98 ± 0,05	1,58 ± 0,07	2,79 ± 0,12	1,31 ± 0,05	1,79 ± 0,08
0,000005	3,09 ± 0,09*	1,37 ± 0,06*	1,87 ± 0,08*	2,63 ± 0,10*	1,28 ± 0,05*	1,78 ± 0,06
0,00025	2,25 ± 0,08*	0,95 ± 0,04*	1,32 ± 0,06*	2,59 ± 0,09*	1,27 ± 0,04*	1,75 ± 0,07*
0,0005	2,01 ± 0,07*	0,85 ± 0,03*	1,27 ± 0,05*	1,47 ± 0,05*	0,56 ± 0,02*	0,96 ± 0,03*
0,001	1,95 ± 0,05*	0,82 ± 0,02*	1,18 ± 0,05*	1,46 ± 0,04*	0,55 ± 0,02*	0,92 ± 0,03*
0,0015	1,86 ± 0,06*	0,79 ± 0,02*	1,14 ± 0,05*	1,42 ± 0,06*	0,49 ± 0,01*	0,86 ± 0,02*
Через трое суток после обработки						
Контроль	3,89 ± 0,10	1,87 ± 0,08	2,47 ± 0,10	2,57 ± 0,10	1,03 ± 0,04	1,86 ± 0,08
0,000005	2,40 ± 0,08*	1,04 ± 0,04*	1,21 ± 0,05*	2,61 ± 0,09*	1,21 ± 0,04*	2,01 ± 0,08*
0,00025	2,09 ± 0,09*	1,03 ± 0,04*	1,09 ± 0,04*	2,53 ± 0,08*	1,17 ± 0,05*	1,15 ± 0,05*
0,0005	1,99 ± 0,08*	0,89 ± 0,03*	1,08 ± 0,03*	2,0 ± 0,07*	0,81 ± 0,03*	1,01 ± 0,04*
0,001	1,94 ± 0,07*	0,84 ± 0,02*	1,06 ± 0,04*	1,68 ± 0,07*	0,60 ± 0,02*	0,97 ± 0,02*
0,0015	1,93 ± 0,05*	0,78 ± 0,03*	1,02 ± 0,04*	1,43 ± 0,05*	0,58 ± 0,02*	0,89 ± 0,03*

их различий ( $F_{\text{фактич}} = 7,51 \pm 184,64$ ;  $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$  при  $p \leq 0,05$ ). Исключения наблюдались в следующих случаях: у липы мелколистной при обработке раствором *o*-ксилола с концентрацией 0,01 мкг/мл для каротиноидов и 0,06 мкг/мл для хлорофилла *a*; раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,0005 нг/мл для хлорофилла *a*, 0,001 нг/мл – для хлорофилла *a* и *b*, 0,0015 нг/мл – для хлорофилла *b*. У клена остролистного были отмечены следующие недостоверные отличия между содержанием пигментов через одни и трое суток после обработки: при воздействии раствора *o*-ксилола с концентрацией 0,01 мкг/мл для хлорофилла *a* и 0,04 мкг/мл – для всех пигментов; раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,000005 и 0,0015 нг/мл для хлорофилла *a*.

В целом количество недостоверных различий между экспериментальными пробами через одни и трое суток эксперимента у липы мелколистной и клена остролистного оказалось равным и составило по 20,0 % вариантов сравнений.

Полученные результаты свидетельствуют, что в случае достоверных различий введенное соединение продолжает свое воздействие на содержание фотосинтетических пигментов листьев саженцев в течение трех суток после обработки, а при недостоверных различиях – основное влияние соединения проявляется только в течение первых суток опыта. Далее содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов изменяется, однако эти изменения незначительны и носят недостоверный характер.

Данные табл. 1 и 2 свидетельствуют, что обработка листовых пластинок *o*-ксилолом и бенз(а)пиреном в большинстве случаев явилась причиной снижения содержания фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными значениями. Так, под действием *o*-ксилола наблюдалось снижение содержания всех изученных пигментов в листьях саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. в 1,37–1,50 раза через одни сутки и в 2,33–3,11 раза через трое суток с учетом сравнений контрольных проб и содержания пигментов при максимальной дозе влияния действующего вещества (табл. 1). При этом в данном случае через трое суток воздействие *o*-ксилола по сравнению с бенз(а)пиреном на листья саженцев было максимальным в наших исследованиях.

У клена остролистного *Acer platanoides* L., имеющего более широкие листовые пластинки, воздействие *o*-ксилола вызвало снижение содержания фотосинтетических пигментов в 1,85–2,09 раза через одни сутки после обработки и в 1,56–1,92 раза – через трое суток эксперимента, т.е. более интенсивно через один сутки и менее значительно после трех суток по сравнению с липой мелколистной. При этом через трое суток после обработки раствором *o*-ксилола с концентрацией

0,0002 и 0,01 мкг/мл содержание пигментов превышало контрольные значения, а снижение их количества наблюдалось лишь при увеличении концентрации растворов (0,02–0,06 мкг/мл).

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), представителем которых является бенз(а)пирен, относятся к группе достаточно распространенных в окружающей среде загрязнителей. Их источником может быть как антропогенная деятельность, так и природные явления. При этом основным техногенным источником ПАУ в окружающей среде является термическое разложение органических веществ при недостатке кислорода в результате неполного сжигания различных материалов, прежде всего древесины и топлива. Растения способны поглощать ПАУ из природной среды в больших количествах.

В наших исследованиях при воздействии бенз(а)пирена у липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. через одни сутки после обработки наблюдалось снижение содержания пигментов в 1,24–1,38 раза по сравнению с контролем, через трое суток – в 2,02–2,41 раза, т.е. по сравнению с *o*-ксилолом через трое суток влияние бенз(а)пирена на листья саженцев липы мелколистной было менее интенсивным (табл. 2).

Клен остролистный *Acer platanoides* L. при воздействии бенз(а)пирена характеризовался более резким снижением содержания пигментов по сравнению с липой мелколистной через одни сутки после обработки: в 1,96–2,67 раза и в 1,77–2,10 раза – через трое суток эксперимента. При этом у липы мелколистной воздействие раствора бенз(а)пирена с концентрацией 0,000005 нг/мл через одни сутки эксперимента не вызывало снижения количества пигментов, а у клена остролистного – через трое суток. Кроме того, у клена остролистного при обработке бенз(а)пиреном 0,00025 нг/мл содержание хлорофилла *b* также превышало контрольную величину.

С целью проведения количественной оценки длительности влияния использованных ароматических углеводородов на содержание пигментов фотосинтеза в листьях саженцев древесных растений нами был проведен расчет различий количества хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов между экспериментальными пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки. Для этого из значений содержания пигментов через одни сутки после обработки всеми дозами действующих веществ вычитали количество пигментов через трое суток. Из полученных разностей находили среднее значение.

В результате выявления различий между пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки, было отмечено, что влияние *o*-ксилола на хлорофилл *a* и *b* липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. проявлялось в виде уменьшения содержания пигментов через одни сутки эксперимента, а в течение последующих трех суток ответная реакция пигментного аппарата выражалась в постепенном увеличении их количества; тогда как количество каротиноидов, наоборот, незначительно снизилось через трое суток опыта (на рис. 1 представлена разница в содержании каждого из пигментов, определенном через одни и трое суток после обработки).

Обработка листовых пластинок саженцев липы мелколистной растворами бенз(а)пирена привела к более резкому снижению содержания всех пигментов фотосинтеза через трое суток эксперимента, тогда как на начальных этапах опыта влияние бенз(а)пирена было менее значительным.

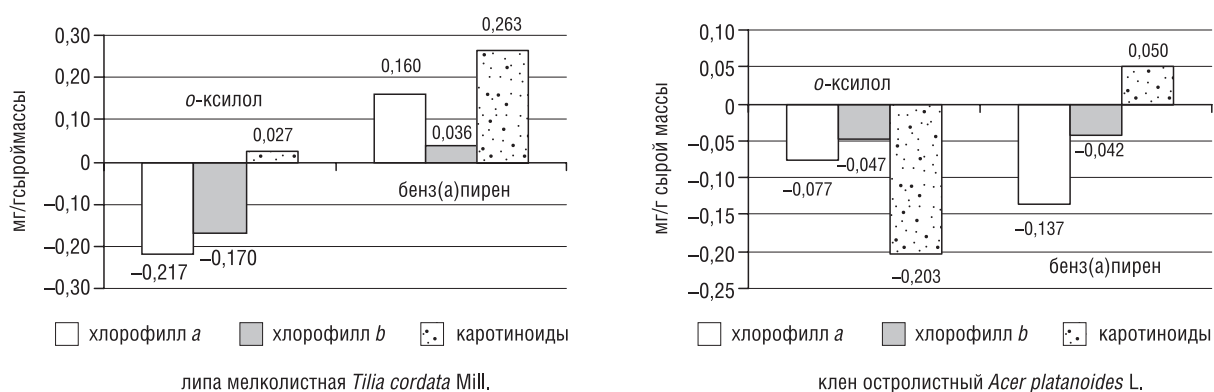


Рис. 1. Изменение содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях саженцев древесных растений за период эксперимента

Ответной реакцией клена остролистного на введение растворов о-ксилола явилось снижение содержания всех пигментов фотосинтеза сразу через одни сутки после обработки, а бенз(а)пирена – только количества хлорофилла *a* и *b*, тогда как содержание каротиноидов снизилось только через трое суток после обработки. Таким образом, при воздействии о-ксилола на листовые пластинки исследуемых древесных саженцев выявлено наибольшее снижение содержания хлорофилла *a* и *b* через одни сутки у липы мелколистной, а у клена остролистного – каротиноидов. Использование бенз(а)пирена обусловило максимальное снижение количества хлорофилла *a* и каротиноидов через трое суток у липы мелколистной, а у клена остролистного – хлорофилла *b* через одни сутки опыта. В целом растворы о-ксилола и бенз(а)пирена в течение времени эксперимента оказали наибольшее воздействие на изменение содержания пигментов фотосинтеза липы мелколистной по сравнению с кленом остролистным. В случае с о-ксилолом это проявлялось через одни сутки эксперимента, а с бенз(а)пиреном – через трое суток после обработки, причем влияние бенз(а)пирена было более сильным. Для клена остролистного наиболее сильно действующим веществом явился о-ксилол.

Эффективность функционирования фотосинтетического аппарата в условиях влияния стрессовых факторов характеризуется не только изменением содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов, но и эффективным квантовым выходом, фото- и нефотохимическим тушением флуоресценции (табл. 3 и 4) и рядом других фотохимических параметров (минимальная и максимальная флуоресценция, потенциальный квантовый выход фотохимических реакций, скорость электронного транспорта, количество открытых реакционных центров).

Результаты дисперсионного анализа комплексов, включающих параметры флуоресценции хлорофилла *a* при каждой вводимой дозе углеводов и контроля, позволили установить достоверность их изменений ( $F_{\text{фактич}} = 21,18 \div 347,56$  для липы мелколистной;  $F_{\text{фактич}} = 10,55 \div 651,27$  для клена остролистного;  $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$  при  $p \leq 0,05$ ).

Сравнение комплексов дисперсий параметров флуоресценции хлорофилла *a* через одни и трое суток в эксперименте также позволило установить достоверность их изменений с течением времени действия органических соединений без учета контрольных проб ( $F_{\text{фактич}} = 7,89 \div 148,15$  для липы мелколистной;  $F_{\text{фактич}} = 8,59 \div 389,61$  для клена остролистного;  $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$  при  $p \leq 0,05$ ).

Данные табл. 3 и 4 свидетельствуют о том, что эффективный квантовый выход  $Y(II)$ , характеризующий степень деформации реакционных центров и активность фотосинтетического аппара-

Т а б л и ц а 3. Параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки о-ксилолом

Концентрация раствора о-ксилола, мкг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	$Y(II)$	$qN$	$qP$	$Y(II)$	$qN$	$qP$
Через одни сутки после обработки						
Контроль	0,709 ± 0,025	0,226 ± 0,009	0,898 ± 0,035	0,590 ± 0,025	0,251 ± 0,009	0,817 ± 0,031
0,0002	0,642 ± 0,022*	0,293 ± 0,008*	0,861 ± 0,033*	0,372 ± 0,010*	0,537 ± 0,018*	0,584 ± 0,025*
0,01	0,618 ± 0,011*	0,345 ± 0,007*	0,840 ± 0,032*	0,320 ± 0,008*	0,678 ± 0,027*	0,573 ± 0,024*
0,02	0,520 ± 0,016*	0,425 ± 0,011*	0,735 ± 0,027*	0,267 ± 0,012*	0,770 ± 0,024*	0,490 ± 0,015*
0,04	0,307 ± 0,010*	0,677 ± 0,014*	0,528 ± 0,016*	0,269 ± 0,011*	0,695 ± 0,025*	0,460 ± 0,016*
0,06	0,265 ± 0,012*	0,679 ± 0,024*	0,454 ± 0,013*	0,274 ± 0,007*	0,698 ± 0,026*	0,447 ± 0,018*
Через трое суток после обработки						
Контроль	0,655 ± 0,030	0,416 ± 0,020	0,884 ± 0,034	0,522 ± 0,016	0,298 ± 0,012	0,718 ± 0,026
0,0002	0,650 ± 0,023*	0,270 ± 0,011*	0,864 ± 0,032*	0,590 ± 0,025*	0,317 ± 0,014*	0,805 ± 0,024*
0,01	0,533 ± 0,018*	0,448 ± 0,012*	0,767 ± 0,028*	0,380 ± 0,010*	0,640 ± 0,022*	0,664 ± 0,025*
0,02	0,513 ± 0,014*	0,475 ± 0,015*	0,742 ± 0,024*	0,309 ± 0,009*	0,722 ± 0,026*	0,559 ± 0,021*
0,04	0,277 ± 0,010*	0,662 ± 0,023*	0,481 ± 0,020*	0,275 ± 0,008*	0,715 ± 0,027*	0,478 ± 0,020*
0,06	0,204 ± 0,008*	0,665 ± 0,024*	0,350 ± 0,015*	0,181 ± 0,005*	0,764 ± 0,028*	0,329 ± 0,010*

Т а б л и ц а 4. Параметры флуоресценции хлорофилла а в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла а					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	$Y (II)$	$qN$	$qP$	$Y (II)$	$qN$	$qP$
Через одни сутки после обработки						
Контроль	0,709 ± 0,025	0,226 ± 0,009	0,898 ± 0,035	0,590 ± 0,025	0,251 ± 0,009	0,817 ± 0,031
0,000005	0,521 ± 0,020*	0,501 ± 0,015*	0,742 ± 0,027*	0,449 ± 0,020*	0,578 ± 0,018*	0,691 ± 0,025*
0,00025	0,439 ± 0,012*	0,532 ± 0,017*	0,665 ± 0,023*	0,453 ± 0,013*	0,531 ± 0,017*	0,685 ± 0,024*
0,0005	0,284 ± 0,010*	0,673 ± 0,024*	0,498 ± 0,015*	0,470 ± 0,014*	0,460 ± 0,013*	0,677 ± 0,026*
0,001	0,257 ± 0,008*	0,708 ± 0,015*	0,442 ± 0,012*	0,384 ± 0,015*	0,597 ± 0,025*	0,623 ± 0,021*
0,0015	0,228 ± 0,005*	0,672 ± 0,024*	0,409 ± 0,015*	0,370 ± 0,018*	0,540 ± 0,018*	0,593 ± 0,025*
Через трое суток после обработки						
Контроль	0,655 ± 0,030	0,416 ± 0,020	0,884 ± 0,034	0,522 ± 0,016	0,298 ± 0,012	0,718 ± 0,026
0,000005	0,568 ± 0,018*	0,391 ± 0,015*	0,846 ± 0,032*	0,455 ± 0,013*	0,569 ± 0,018*	0,689 ± 0,030*
0,00025	0,337 ± 0,015*	0,723 ± 0,026*	0,589 ± 0,019*	0,401 ± 0,015*	0,623 ± 0,021*	0,629 ± 0,024*
0,0005	0,289 ± 0,010*	0,717 ± 0,025*	0,491 ± 0,015*	0,382 ± 0,011*	0,674 ± 0,024*	0,627 ± 0,028*
0,001	0,254 ± 0,008*	0,653 ± 0,023*	0,453 ± 0,013*	0,361 ± 0,017*	0,580 ± 0,018*	0,574 ± 0,015*
0,0015	0,218 ± 0,007*	0,604 ± 0,025*	0,372 ± 0,014*	0,302 ± 0,009*	0,724 ± 0,024*	0,544 ± 0,017*

та в реальных условиях, с учетом сравнений контрольных значений и величин при минимальной и максимальной дозе воздействия *o*-ксилола у липы мелколистной снижался в 1,11–2,68 раза через одни сутки после обработки и в 3,22 раза – через трое суток, при этом при минимальной дозе *o*-ксилола значение  $Y (II)$  было практически равным контролю. Растворы бенз(а)пирена вызывали снижение эффективного квантового выхода в 1,36–3,11 раза через одни сутки и в 1,15–3,01 раза – через трое суток, т.е. влияние бенз(а)пирена через одни сутки было более интенсивным.

У клена остролистного снижение эффективного квантового выхода под влиянием *o*-ксилола было менее значительным: через одни сутки в 1,59–2,15 раза и в 2,89 раза – через трое суток; при этом при минимальной дозе *o*-ксилола, аналогично липе мелколистной, величина эффективного квантового выхода превышала контрольное значение. Обработка листовых пластинок бенз(а)пиреном явилась причиной менее значительных изменений значений  $Y (II)$  как по сравнению с *o*-ксилолом, так и с липой мелколистной, которые через одни сутки составили 1,32–1,60 раза по сравнению с контролем, а через трое суток в 1,15–1,73 раза.

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла  $qN$ , которое характеризует расход поглощенной энергии света на тепловое рассеивание, возрастало у исследуемых саженцев практически при всех дозах, причем у липы мелколистной через одни сутки опыта в 1,30–3,01 раза при влиянии *o*-ксилола и в 2,22–2,97 раза – бенз(а)пирена; через трое суток действие используемых соединений ослабевало, причем в случае бенз(а)пирена более заметно, чем при введении *o*-ксилола.

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла а у клена остролистного через одни сутки опыта при влиянии *o*-ксилола усиливалось в 2,14–2,78 раза и в 2,15–2,30 раза – бенз(а)пирена; через трое суток действие используемых соединений ослабевало аналогично липе мелколистной, причем в случае бенз(а)пирена более заметно, чем при введении *o*-ксилола за исключением максимальной дозы бенз(а)пирена.

Увеличение тепловых потерь поглощенной световой энергии негативно сказывается на функционировании фотосинтетического аппарата растений и может привести к снижению количества энергии, необходимой для фотохимического преобразования энергии света, что и наблюдалось в наших исследованиях. Так, у исследуемых древесных саженцев происходило уменьшение величин фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла  $qP$ , за исключением минимальной дозы воздействия *o*-ксилола на листья клена остролистного через трое суток после обработки.



Для количественной оценки длительности влияния использованных ароматических углеводов на параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений был проведен расчет различий эффективного квантового выхода, фотохимического и нефотохимического тушения между экспериментальными пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки, аналогично расчету различий в количестве пигментов. В результате получено, что после обработки раствором *o*-ксилола листовых пластинок липы мелколистной значения  $Y(II)$  и  $qP$  снижались более интенсивно через трое суток после воздействия, а клена остролистного – через одни сутки (на рис. 2 представлена разница между значениями каждого из параметров флуоресценции, определенными через одни и трое суток после обработки).

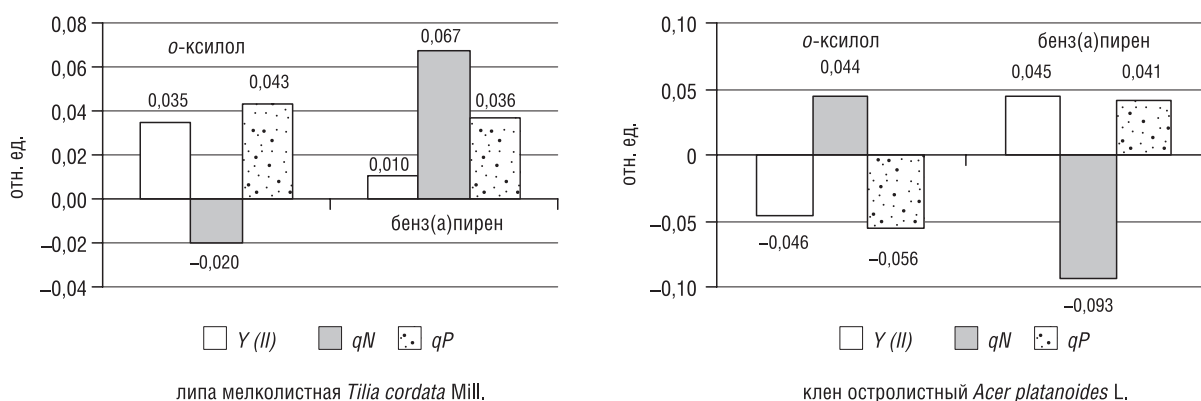


Рис. 2. Изменение параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений за период эксперимента

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла  $qN$  в случае использования *o*-ксилола при обработке листьев липы мелколистной возрастало более интенсивно через трое суток опыта, а клена остролистного – через одни сутки.

Растворы бенз(а)пирена через трое суток после обработки липы мелколистной явились причиной снижения значений  $Y(II)$ ,  $qN$  и  $qP$ , а у клена остролистного – снижения  $Y(II)$  и  $qP$  и роста  $qN$ .

В целом растворы *o*-ксилола и бенз(а)пирена в течение времени эксперимента оказали наибольшее воздействие на изменение параметров флуоресценции в листьях клена остролистного, причем бенз(а)пирен более сильно, чем *o*-ксилол. При этом введение *o*-ксилола обусловило наибольшее снижение величины эффективного квантового выхода и фотохимического тушения флуоресценции через одни сутки у клена остролистного, а бенз(а)пирена – значения нефотохимического тушения флуоресценции.

**Выводы.** Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок саженцев древесных растений городской среды ароматическими углеводородами свидетельствуют, что при воздействии *o*-ксилола на листовые пластинки исследуемых древесных саженцев выявлено наибольшее снижение содержания хлорофилла *a* и *b* через одни сутки у липы мелколистной, а у клена остролистного – каротиноидов. Использование бенз(а)пирена обусловило максимальное снижение количества хлорофилла *a* и каротиноидов через трое суток у липы мелколистной, а у клена остролистного – хлорофилла *b* через одни сутки опыта. В целом растворы *o*-ксилола и бенз(а)пирена в течение эксперимента оказали наибольшее воздействие на изменение содержания пигментов фотосинтеза липы мелколистной.

Кроме того, используемые соединения оказали наиболее интенсивное влияние на изменение параметров флуоресценции клена остролистного, причем бенз(а)пирен более сильно, чем *o*-ксилол.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Кабашникова, Л. Ф.* Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков / Л. Ф. Кабашникова. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 327 с.
2. 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.
3. *Орехов, Д. И.* Изучение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях древесных растений, растущих в условиях г. Москвы / Д. И. Орехов, Ю. П. Козлов // Вестник РУДН. – 2010. – № 4. – С. 23–28.
4. *Ланкин, А. В.* Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат: автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / А. В. Ланкин; ин-т физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. – М., 2016. – 22 с.
5. *Сергейчик, С. А.* Устойчивость древесных растений в техногенной среде / С. А. Сергейчик. – Минск: Навука и тэхніка, 1994. – 279 с.
6. *Сергейчик, С. А.* Экологическая физиология хвойных пород Беларуси в техногенной среде / С. А. Сергейчик, А. А. Сергейчик, Е. А. Сидорович. – Минск: Беларус. навука, 1998. – 199 с.
7. Охрана окружающей среды: статистический сборник. – Минск: Национальный статистический комитет Респ. Беларусь, 2018. – 228 с.
8. *Чикидова, А. Л.* Полициклические ароматические углеводороды в экосистемах г. Москвы (на примере Восточного административного округа): дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / А. Л. Чикидова; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – 141 с.
9. *Масленко, Е. А.* Влияние производных бензола (п-ксилол и ароматические кислоты) и 2-метил-1,3-диоксолана на водоросли и высшие растения: автореф. ... канд. биол. наук : 03.00.16 / Е. А. Масленко; Тюмен. гос. сельскохоз. академия. – Борок, 2006. – 22 с.
10. *Малахова, Е. С.* Газоустойчивость и аккумуляционная способность растений в техногенной среде нефтехимических предприятий Западной Сибири (на примере ОАО «Техуглерод»): автореф. ... канд. биол. наук : 03.00.16 / Е. С. Малахова; Омск. гос. аграр. ун-т. – Омск, 2004. – 19 с.
11. Phytoremediation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene contaminated air by *D. deremensis* and *O. microdasys* plants / M. H. Mosaddegh [et al.] // J. Environ. Health Sci. and Eng. – 2014. – Vol. 12. – P. 113–126.
12. *Сушкова, С. Н.* Оценка содержания бенз(а)пирена в почвах и растениях зоны влияния Новочеркасской ГРЭС: автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.13; 03.02.08 / С. Н. Сушкова; Южн. федеральн. ун-т. – М., 2012. – 26 с.
13. *Wolverton, B. C.* Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, ethylbenzene and ammonia from the indoor environment / B. C. Wolverton, J. D. Wolverton // Journal of Mississippi Academic Science. – 1993. – Vol. 38(2). – P. 11–15.
14. *Song, J. E.* The impact of plants on the reduction of volatile organic compounds in a small space / J. E. Song, Y. S. Kim, J. Y. Sohn // J. Physiol Anthropol. – 2007. – Vol. 26(6). – P. 599–603.
15. *Yoo, M. H.* Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatiles on the plants / M. H. Yoo, Y. J. Kwon, K. Son // J. Amer Soc Hort Sci. – 2006. – Vol. 131(4). – P. 452–458.
16. Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь «Об утверждении и введении в действие нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и ориентировочно безопасных уровней воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения» от 8.11.2016 № 113.
17. *Krause, G. N.* Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Ann. Rev. / G. N. Krause, E. Wels // Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 1991. – Vol. 42. – P. 313–349.
18. *Rochacek, K.* Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters and some application / K. Rochacek, M. Bartak // Photosynthetica. – 1999. – Vol. 37. – P. 339–363.
19. *Korneev, D. Ju.* Informacionnie vozmozhnosti metoda indukcii fluorescencii (Information capabilities of the fluorescence induction method) / D. Ju. Korneev. – Kiev: Albatros, 2002. – 188 p.

Поступила 30.08.2019