

УДК 581.1:574.24581.1:574.24

## ИНГИБИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ САЖЕНЦЕВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

Е. Г. ТЮЛКОВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации,  
пр. Октября, 50, 246029, г. Гомель, Беларусь

Представлены результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях саженцев одних из наиболее распространенных представителей древесных растений городской среды – березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. – в задаваемых условиях эксперимента. Установлено, что токсическое воздействие на пигменты березы повислой раствора о-ксилола и бенз(а)пирена проявлялось через одни сутки эксперимента; бутилацетата и смеси бутилацетата с о-ксилолом – через трое суток после обработки. Ответная реакция тополя пирамидального характеризовалась снижением содержания пигментов фотосинтеза через трое суток после введения всех используемых растворов. Максимальное изменение содержания пигментов в процессе эксперимента у березы повислой вызывало действие бутилацетата; тополя пирамидального – бенз(а)пирена. Наибольшее изменение в содержании пигментов по сравнению с контролем отмечено под действием о-ксилола и смеси бутилацетата с о-ксилолом у березы повислой, а у тополя пирамидального – под влиянием о-ксилола и бенз(а)пирена.

**Ключевые слова:** о-ксилол; бенз(а)пирен; бутилацетат; береза повислая *Betula pendula* Roth.; тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz.; фотосинтетические пигменты.

## VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS INHIBITING EFFECT ON THE PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS CONTENT IN WOODY PLANTS SEEDLINGS LEAVES

E. G. TULKOVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian Trade-Economic University of Consumer Cooperation,  
50 Kastychnika Avenue, Gomel 246029, Belarus

The article presents the results of determining the photosynthetic pigments content in the seedlings leaves of the most common representatives the urban environment tree plants – the hanging birch *Betula pendula* Roth. and poplar pyramidal *Populus pyramidalis* Roz. – in the given experimental conditions. It was established that the toxic effect on hanging birch pigments the o-xylene and benz (a) pyrene suspended solution manifested itself after one day of the experiment; butyl acetate and a mixture of butyl acetate with o-xylol – after three days treatment. The response of the pyramidal poplar was characterized by a decrease in the content of photosynthesis pigments after three days after the introduction of all the solutions used. The maximum change in the pigment content during the experiment in hanging birch caused the action of butyl acetate; pyramid poplar – benz (a) pyrene; and the greatest change in the pigment content

---

### Образец цитирования:

Тюлькова Е.Г. Ингибирующий эффект летучих органических соединений на содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2019;4:36–44.

### For citation:

Tulkova EG. Volatile organic compounds inhibiting effect on the photosynthetic pigments content in woody plants seedlings leaves. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2019;4:36–44. Russian.

---

### Автор:

Елена Григорьевна Тюлькова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры товароведения.

### Author:

Elena G. Tulkova, PhD (biology), docent; associate professor at the department of commodity science.  
tut-3@mail.ru

compared with the control was noted under the action of o-xylol and a mixture of butyl acetate with o-xylol in birch hanging, and in pyramidal poplar under the influence of o-xylol and benz (a) pyrene.

**Key words:** o-xylol; benz (a) pyrene; butyl acetate; drooping birch *Betula pendula* Roth.; pyramidal poplar *Populus pyramidalis* Roz.; photosynthetic pigments.

## Введение

В настоящее время для отдельных промышленных предприятий Республики Беларусь характерно наличие в выбросах загрязняющих веществ преимущественно 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 содержание пигментов фотосинтеза и интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений, с одной стороны, является актуальным в целях сравнительного анализа степени их токсичности при одиночном и совместном воздействии [1–3], с другой – малоисследованным по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода [4–11]. В этой связи целью работы явилось изучение характера изменения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. как наиболее распространенных представителей древесных растений городской среды при разных дозах воздействия о-ксилола, бенз(а)пирена, бутилацетата и их смеси в задаваемых условиях эксперимента.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследований явились саженцы березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. – наиболее распространенных представителей древесных растений в городских условиях. Основная научная цель при постановке эксперимента по обработке саженцев ароматическими углеводородами и сложным эфиром заключалась в том, чтобы установить характер изменений содержания фотосинтетических пигментов, искусственно задавая определенные уровни поступления углеводородов в листовые пластинки. Следовательно, проведен сравнительный анализ состава фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений, обработанных различными дозами углеводородов (о-ксилолом, бенз(а)пиреном, бутилацетатом и их смесью) через определенные периоды времени после воздействия (через одни и трое суток).

Выбор органических соединений обусловлен преобладающим количеством группы данных веществ в выбросах отдельных промышленных предприятий г. Гомеля (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей») по сравнению с другими загрязняющими элементами. Что касается бенз(а)пирена, то несмотря на невысокое наличие в выбросах предприятий теплоэнергетики (ТЭЦ-2), это соединение характеризуется высокой токсичностью в небольших количествах, а также недостаточной изученностью эффектов влияния на активность фотосинтетического аппарата растений. Наличие в эксперименте бенз(а)пирена как представителя полициклических ароматических углеводородов позволило также провести сравнительную оценку влияния на растительный организм много- и одноядерных ароматических углеводородов (о-ксилол).

Листовые пластинки саженцев обрабатывали водными растворами углеводородов. Использованные дозы углеводородов рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ<sup>1</sup>. В соответствии с нормативами ПДК ксилолов в атмосферном воздухе составляет 200 мкг/м<sup>3</sup>; бутилацетата – 100,0 мкг/м<sup>3</sup>; бенз(а)пирена – 5,0 нг/м<sup>3</sup>. Для всех соединений, кроме бенз(а)пирена, использовали величину максимальной разовой ПДК; для бенз(а)пирена – среднесуточную ПДК.

В качестве контроля использовали необработанные растения саженцев. Экспериментальными явились растения, обработанные водными растворами исследуемых соединений в следующих концентрациях: 0,0002–0,06 мкг/мл о-ксилола, 0,000005–0,0015 нг/мл бенз(а)пирена, 0,0001–0,03 мкг/мл бутилацетата (бутилового эфира уксусной кислоты). Обработка листовых пластинок саженцев осуществлялась путем опрыскивания водными растворами (по 50 мл водного раствора каждой дозы вводимого соединения).

Для выявления эффектов совместного воздействия исследуемых соединений использовали смесь следующих концентраций: 0,01 мкг/мл бутилацетата + 0,02 мкг/мл о-ксилола; 0,02 мкг/мл бутилацетата + 0,04 мкг/мл о-ксилола.

<sup>1</sup>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.

Для определения содержания хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов в листовых пластинках саженцев применялся 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 3 биологических повторностях.

Содержание пигментов в экстрактах рассчитывали с помощью коэффициентов экстинкции, приведенных в работе [4] для соответствующего растворителя, по формулам 1–4:

$$C_a = 9,784D_{662} - 0,99D_{644} \quad (1), \quad C_b = 21,426D_{644} - 4,650D_{662} \quad (2),$$

$$C_a + C_b = 5,134D_{662} + 20,436D_{644} \quad (3), \quad C_k = 4,695D_{440,5} - 0,268C_{a+b} \quad (4),$$

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

С целью количественной оценки изменений содержания фотосинтетических пигментов проводили вычисления среднего значения разностей содержаний каждого фотосинтетического пигмента, измеренных через одни и трое суток эксперимента при обработке каждым из используемых соединений.

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

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях саженцев исследуемых древесных растений в условиях эксперимента по обработке углеводородами и их смесью представлены в табл. 1–4.

Таблица 1

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки о-ксилолом

Table 1

The content of photosynthetic pigments in wood plants seedlings leaves in the experiment after treatment with o-xylol

Концентрация раствора о-ксилола, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.			тополь пирамидальный <i>Populus pyramidalis</i> Roz.		
	хлорофилл $a$	хлорофилл $b$	каротиноиды	хлорофилл $a$	хлорофилл $b$	каротиноиды
через одни сутки после обработки						
контроль	1,54±0,07	0,56±0,03	0,98±0,04	1,61±0,06	0,60±0,02	1,07±0,05
0,0002	1,26±0,05*	0,46±0,01*	0,80±0,04*	1,52±0,07*	0,56±0,01*	0,97±0,05*
0,01	1,20±0,06*	0,43±0,02*	0,78±0,03*	1,29±0,05*	0,42±0,01*	0,74±0,03*
0,02	1,13±0,04*	0,38±0,02*	0,71±0,04*	1,15±0,06*	0,40±0,02*	0,72±0,03*
0,04	1,10±0,05*	0,37±0,02*	0,70±0,03*	1,07±0,04*	0,37±0,02*	0,70±0,02*
0,06	1,08±0,04*	0,37±0,01*	0,67±0,02*	0,77±0,03*	0,30±0,01*	0,53±0,02*
через трое суток после обработки						
контроль	1,76±0,08	0,64±0,03	1,08±0,05	1,47±0,06	0,52±0,03	0,93±0,05
0,0002	1,31±0,06*	0,47±0,02*	0,85±0,04*	0,34±0,06*	0,45±0,02*	0,81±0,04*
0,01	1,25±0,05*	0,43±0,01*	0,80±0,04*	0,25±0,05*	0,44±0,01*	0,76±0,04*
0,02	1,19±0,06*	0,43±0,02*	0,76±0,03*	0,76±0,04*	0,27±0,01*	0,49±0,02*
0,04	1,18±0,06*	0,39±0,02*	0,72±0,03*	0,72±0,04*	0,24±0,01*	0,48±0,02*
0,06	1,04±0,04*	0,35±0,02*	0,64±0,02*	0,65±0,03*	0,24±0,01*	0,42±0,01*

Примечание. Здесь и далее в табл. 2–4 достоверные значения содержания фотосинтетических пигментов при  $p \leq 0,05$  обозначены (\*).

Данные табл. 1–4 свидетельствуют о том, что обработка листовых пластинок о-ксилолом, бенз(а)пиреном, бутилацетатом и их смесью в большинстве случаев явилась причиной снижения содержания фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными значениями. Так, под действием о-ксилола

наблюдалось снижение содержания всех изученных пигментов в листьях саженцев *Betula pendula* Roth. в 1,43–1,50 раза через одни сутки и в 1,68–1,84 раза через трое суток по сравнению с контрольными пробами (табл. 1). У *Populus pyramidalis* Roz. воздействие о-ксилола вызвало более резкое снижение содержания фотосинтетических пигментов: в 2,0–2,09 раза через одни сутки после обработки; в 2,20–2,26 раза – через трое суток эксперимента, что возможно явилось следствием анатомических особенностей строения листа. Эти особенности проявляются в виде наличия у тополя пирамидального плотных листьев с сосудистой системой сетевой формы в виде одной доминирующей жилки, от которой отходят вторичные сосудистые пучки, что, с одной стороны, позволяет ему эффективно улавливать и сохранять значительное количество частиц из атмосферы, а с другой – обеспечивает устойчивость по отношению к атмосферным загрязнителям.

Несмотря на наличие сведений об одном из самых сильных токсических эффектов воздействия бенз(а)пирена на живые организмы, в наших исследованиях этот полициклический ароматический углеводород не всегда характеризовался самым интенсивным отрицательным влиянием на содержание пигментов фотосинтеза в процессе эксперимента. Так, у березы повислой через одни сутки после обработки наблюдалось снижение содержания пигментов в 1,33–1,6 раза по сравнению с контролем, через трое суток – в 1,13–1,6 раза: по сравнению с о-ксилолом через трое суток влияние бенз(а)пирена на листья саженцев березы повислой было менее интенсивным (табл. 2). Тополь пирамидальный, аналогично воздействию о-ксилола, характеризовался более резким снижением содержания пигментов по сравнению с березой повислой: в 1,48–1,61 раза через одни сутки после обработки; в 2,47–2,66 раза – через трое суток эксперимента. В данном случае через трое суток воздействие бенз(а)пирена, по сравнению с другими использованными соединениями, на листья саженцев, в наших исследованиях было максимальным.

Таблица 2

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

Table 2

The content of photosynthetic pigments in woody plants seedlings leaves in the experiment after treatment with benz (a) pyrene

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.			тополь пирамидальный <i>Populus pyramidalis</i> Roz.		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
через одни сутки после обработки						
Контроль	1,54±0,07	0,56±0,03	0,98±0,04	1,61±0,06	0,60±0,02	1,07±0,05
0,000005	1,59±0,02*	0,56±0,02	1,02±0,02*	1,31±0,07*	0,45±0,01*	0,86±0,04*
0,00025	1,42±0,06*	0,55±0,03	0,90±0,04*	1,26±0,06*	0,44±0,01*	0,84±0,04*
0,0005	1,38±0,05*	0,53±0,01*	0,87±0,03*	1,19±0,06*	0,43±0,02*	0,80±0,03*
0,001	1,34±0,06*	0,50±0,01*	0,81±0,03*	1,15±0,05*	0,41±0,02*	0,77±0,03*
0,0015	1,14±0,04*	0,35±0,02*	0,73±0,03*	1,08±0,04*	0,37±0,01*	0,72±0,03*
через трое суток после обработки						
Контроль	1,76±0,08	0,64±0,03	1,08±0,05	1,47±0,06	0,52±0,03	0,93±0,05
0,000005	1,81±0,09*	0,71±0,04*	1,14±0,06*	1,06±0,05*	0,41±0,02*	0,67±0,03*
0,00025	1,71±0,03*	0,67±0,02*	1,05±0,02*	0,82±0,04*	0,31±0,01*	0,53±0,03*
0,0005	1,65±0,06*	0,60±0,02*	1,02±0,04*	0,79±0,04*	0,30±0,01*	0,52±0,03*
0,001	1,62±0,07*	0,55±0,02*	0,99±0,03*	0,75±0,03*	0,26±0,01*	0,48±0,02*
0,0015	1,55±0,05*	0,40±0,01*	0,95±0,02*	0,55±0,02*	0,21±0,01*	0,38±0,01*

Согласно данным статистической отчетности, за последние годы происходит резкое увеличение выбросов бутилацетата в атмосферный воздух в результате деятельности отдельных промышленных предприятий Республики Беларусь. Результатом влияния этого соединения явилось достоверное снижение содержания всех исследуемых фотосинтетических пигментов (по сравнению с контролем) через одни сутки после обработки саженцев березы повислой только при воздействии растворов бутилацетата с концентрацией 0,02 мкг/мл и 0,03 мкг/мл действующего вещества (табл. 3).

Через трое суток после воздействия бутилацетата растворы с концентрацией 0,0001 мкг/мл и 0,005 мкг/мл вызывали незначительные изменения в содержании пигментов березы повислой, которые для хлорофилла *b* и каротиноидов были недостоверными; остальные дозы бутилацетата вызывали достоверное снижение содержания пигментов фотосинтеза по сравнению с контрольным значением.



Итак, в результате действия бутилацетата наблюдалось снижение содержания пигментов в листьях саженцев *Betula pendula* Roth. в 1,14–1,32 раза через одни сутки и в 1,42–1,64 раза через трое суток по сравнению с контрольными пробами, что свидетельствует о самом незначительном влиянии одиночных соединений на березу повислую через одни сутки в условиях проведенного эксперимента и более сильным, по сравнению с бенз(а)пиреном, влиянии через трое суток после обработки одиночными соединениями. Что касается *Populus pyramidalis* Roz., то под влиянием данного эфира на пигментный состав листьев содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов снизилось в 1,54–2,06 раза через одни сутки эксперимента и в 1,7–1,78 раз – через трое суток, что явилось самым незначительным воздействием на тополь пирамидальный через трое суток эксперимента с одиночными растворами соединений.

Таблица 3

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки бутилацетатом

Table 3

The content of photosynthetic pigments in woody plants seedlings leaves in the experiment after treatment with butyl acetate

Концентрация раствора бутилацетата, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.			тополь пирамидальный <i>Populus pyramidalis</i> Roz.		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
через одни сутки после обработки						
контроль	1,54±0,07	0,56±0,03	0,98±0,04	1,61±0,06	0,60±0,02	1,07±0,05
0,0001	1,67±0,07*	0,64±0,03*	1,05±0,05*	1,48±0,07*	0,52±0,02*	1,0±0,04*
0,005	1,58±0,03*	0,63±0,02*	0,97±0,04	1,23±0,05*	0,46±0,02*	0,79±0,04*
0,01	1,53±0,06	0,60±0,02*	0,96±0,04	1,13±0,05*	0,44±0,01*	0,74±0,03*
0,02	1,43±0,05*	0,50±0,02*	0,93±0,02*	1,10±0,06*	0,41±0,01*	0,72±0,03*
0,03	1,35±0,05*	0,42±0,01*	0,85±0,03*	1,04±0,04*	0,37±0,01*	0,52±0,02*
через трое суток после обработки						
контроль	1,76±0,08	0,64±0,03	1,08±0,05	1,47±0,06	0,52±0,03	0,93±0,05
0,0001	1,73±0,03*	0,63±0,02	1,08±0,05	1,21±0,05*	0,43±0,02*	1,63±0,04*
0,005	1,73±0,02*	0,62±0,03	1,07±0,04	1,10±0,05*	0,40±0,02*	0,53±0,04*
0,01	1,47±0,06*	0,53±0,02*	0,90±0,03*	0,95±0,04*	0,39±0,02*	0,34±0,03*
0,02	1,33±0,05*	0,42±0,01*	0,83±0,03*	0,91±0,04*	0,33±0,01*	0,24±0,03*
0,03	1,23±0,06*	0,39±0,02*	0,76±0,03*	0,86±0,04*	0,30±0,01*	0,17±0,02*

По причине того, что выбросы промышленных предприятий характеризуются содержанием множества техногенных элементов или соединений, для изучения характера сочетанного действия органических соединений на пигментный аппарат саженцев нами был проведен эксперимент с использованием смеси бутилацетата с о-ксилолом, наличие которой характерно для выбросов рассматриваемого промышленного предприятий (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей»).

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о наличии видовых различий адаптивных механизмов саженцев к действию о-ксилола и бутилацетата по отдельности и совместно (табл. 4).

Данные табл. 4 свидетельствуют о том, что в результате действия смеси бутилацетата с о-ксилолом наблюдалось снижение содержания пигментов в листьях саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. в 1,18–1,20 раза через одни сутки и в 1,36–1,53 раза через трое суток по сравнению с контрольными пробами. Для тополя пирамидального содержание фотосинтетических пигментов снизилось в 1,56–1,62 раза через одни сутки эксперимента и в 1,52–1,66 раза – через трое суток (более резко по сравнению с березой повислой).

Как уже отмечалось, влияние раствора о-ксилола без сочетания с бутилацетатом приводило к более резкому снижению содержания пигментов в листьях экспериментальных саженцев древесных растений по сравнению с эфиром.

Обработка листовых пластинок саженцев экспериментальных древесных растений смесью бутилацетата с о-ксилолом приводила к ослаблению отрицательного воздействия о-ксилола на количество пигментов, за исключением тополя пирамидального, через одни сутки после воздействия. В этом случае через одни сутки после обработки смесью в максимальной дозе наблюдалось усиление токсического эффекта о-ксилола на содержание хлорофилла *a* и каротиноидов по сравнению с использованием раствора только одного этого соединения.

Таблица 4

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений  
в условиях эксперимента после обработки смесью бутилацетата с о-ксилолом

Table 4

The content of photosynthetic pigments in woody plants seedlings leaves  
in the experiment after treatment with a mixture of butyl acetate and o-xylol

Варианты опыта	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.			тополь пирамидальный <i>Populus pyramidalis</i> Roz.		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
через одни сутки после обработки, смесь бутилацетат +о-ксилол						
контроль	1,54±0,07	0,56±0,03	0,98±0,04	1,61±0,06	0,60±0,02	1,07±0,05
0,01 мкг/мл +0,02 мкг/мл	1,56±0,08	0,57±0,03	0,98±0,05	1,29±0,05*	0,43±0,02*	0,99±0,05*
0,02 мкг/мл +0,04 мкг/мл	1,28±0,05*	0,47±0,01*	0,81±0,04*	1,03±0,05*	0,38±0,02*	0,66±0,03*
через трое суток после обработки, смесь бутилацетат +о-ксилол						
контроль	1,76±0,08	0,64±0,03	1,08±0,05	1,47±0,06	0,52±0,03	0,93±0,05
0,01 мкг/мл +0,02 мкг/мл	1,45±0,07*	0,43±0,02*	0,90±0,04*	1,14±0,05*	0,35±0,02*	0,85±0,04*
0,02 мкг/мл +0,04 мкг/мл	1,28±0,05*	0,42±0,02*	0,79±0,03*	0,97±0,04*	0,31±0,01*	0,56±0,02*

Последствия введения о-ксилола в смеси с бутилацетатом в указанных дозах характеризовались видовыми различиями ответных реакций пигментного аппарата саженцев по сравнению с действием только раствора бутилацетата и отличались с течением времени эксперимента. Так, использование максимальной дозы смеси приводило к усилению негативного влияния бутилацетата и снижению содержания всех пигментов в листьях березы повислой и тополя пирамидального через одни сутки эксперимента. Минимальная доза смеси, напротив, приводила к ослаблению отрицательного воздействия бутилацетата на содержание хлорофилла *a* и каротиноидов используемых саженцев древесных растений через одни сутки эксперимента. По истечении трех суток после обработки смесью у березы повислой наблюдалось увеличение токсического эффекта бутилацетата на содержание пигментов во всех дозах, а у тополя пирамидального – снижение, за исключением количества хлорофилла *b*.

Достоверность различий между содержанием фотосинтетических пигментов в листовых пластинках экспериментальных и контрольных растений, а также экспериментальных растений через одни и трое суток обработки оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками контрольных и экспериментальных значений количества пигментов ( $F_{\text{факт.}}(1, 6) = 6,75 \div 26,17$  для березы повислой;  $F_{\text{факт.}}(1, 6) = 9,34 \div 100,35$  для тополя пирамидального;  $F_{\text{критич.}}(1, 6) = 5,99$  при  $p \leq 0,05$ ). Исключение составили следующие варианты опыта: через одни сутки у березы повислой – при обработке раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,000005 нг/мл и 0,00025 нг/мл (хлорофилл *b*); 0,01 мкг/мл раствором бутилацетата (хлорофилл *a*, каротиноиды); 0,005 мкг/мл раствором бутилацетата (каротиноиды); 0,01 мкг/мл бутилацетата + 0,02 мкг/мл о-ксилола (все пигменты). Через трое суток у березы повислой недостоверными явились отличия от контрольных образцов проб пигментов при обработке раствором бутилацетата с концентрацией 0,0001 мкг/мл и 0,005 мкг/мл (хлорофилл *b*, каротиноиды). Таким образом, количество недостоверных различий между экспериментальными и контрольными пробами у саженцев березы повислой составило 10 % вариантов сравнений с контролем при обработке одиночными реагентами и 25 % – при обработке смесью. Кроме того, недостоверные различия в большинстве вариантов опыта с саженцами березы повислой наблюдались при обработке одиночными соединениями (бенз(а)пиреном и бутилацетатом) и были характерны для проб, обработанных бутилацетатом. В случае использования смеси все недостоверные различия отмечались через одни сутки после обработки. Для тополя пирамидального недостоверные различия между контролем и экспериментальными пробами отмечены не были.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа выборок содержания пигментов через одни и трое суток после обработки позволили установить достоверность их различий ( $F_{\text{факт.}} = 6,61 \div 145,87$ ;  $F_{\text{критич.}}(1, 6) = 5,99$  при  $p \leq 0,05$ ). Исключения наблюдались в следующих случаях: у березы повислой при обработке раствором о-ксилола с концентрацией 0,0002 мкг/мл, 0,01 мкг/мл, 0,04 мкг/мл и 0,06 мкг/мл для хлорофилла *b*; 0,01 мкг/мл и 0,04 мкг/мл о-ксилола для каротиноидов; 0,0001 мкг/мл и 0,005 мкг/мл бутилацетата для хлорофилла *b* и каротиноидов; смеси 0,02 мкг/мл бутилацетата +0,04 мкг/мл о-ксилола для хлорофилла *a* и каротиноидов. У тополя пирамидального были отмечены следующие недостоверные

отличия между содержанием пигментов через одни и трое суток после обработки: для хлорофилла *b* и каротиноидов при обработке раствором о-ксилола с концентрацией 0,01 мкг/мл; 0,005 мкг/мл и 0,03 мкг/мл бутилацетата для каротиноидов. Итак, количество недостоверных различий между экспериментальными пробами через одни и трое суток эксперимента у саженцев березы повислой составило 13,3 % вариантов сравнений при обработке одиночными реагентами и 16,7 % – при обработке смесью; у тополя пирамидального – 6,7 % вариантов сравнений при обработке одиночными реагентами.

Полученные результаты свидетельствуют о том, 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.

С целью проведения количественной оценки влияния использованных ароматических углеводородов и сложного эфира на содержание пигментов фотосинтеза в листьях саженцев древесных растений нами был проведен расчет различий количества хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов между экспериментальными и контрольными значениями, а также между пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки.

В результате выявления различий между пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки, было отмечено, что влияние о-ксилола и бенз(а)пирена на пигменты березы повислой 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 (рис. 1).

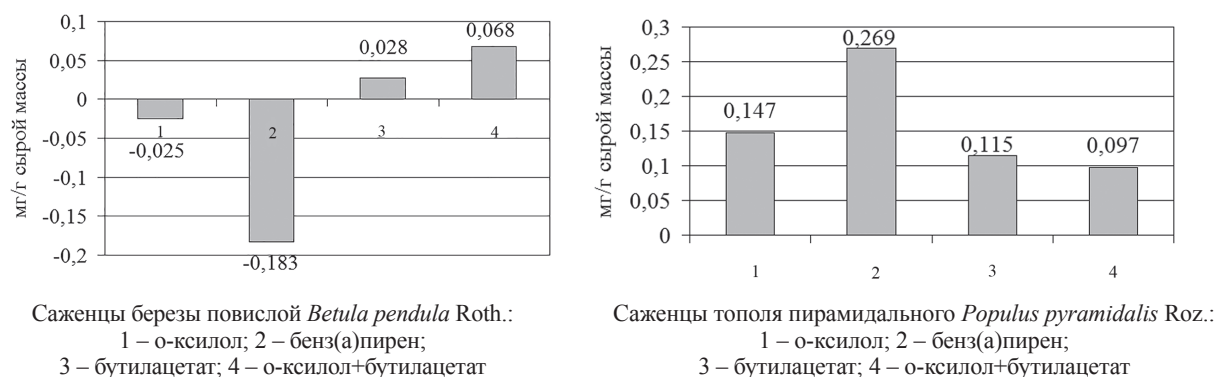


Рис. 1. Изменение содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях саженцев исследуемых древесных растений за период эксперимента

Fig. 1. Changes in the chlorophyll *a*, *b* and carotenoids content in investigated woody plants seedlings leaves during the experiment

Влияние бутилацетата и смеси бутилацетата с о-ксилолом в опыте с березой повислой, наоборот, вызывало более интенсивное уменьшение содержания пигментов через трое суток после воздействия растворов на листовые пластинки. Ответная реакция тополя пирамидального, имеющего более плотные листовые пластинки, проявлялась в виде снижения содержания пигментов фотосинтеза через трое суток после обработки всеми используемыми одиночными растворами и смесью бутилацетата с о-ксилолом (рис. 1).

Таким образом, максимальное изменение содержания пигментов в течение времени эксперимента у исследуемых древесных саженцев вызывало действие бенз(а)пирена: у березы повислой – через одни сутки после обработки, а у тополя пирамидального – через трое суток.

Результаты кластерного анализа изменений содержания фотосинтетических пигментов в листьях экспериментальных саженцев древесных растений по сравнению с контрольными пробами представлены на рис. 2 (кластерный анализ методом иерархической классификации).

Результаты кластерного анализа изменений содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях саженцев березы повислой через одни сутки после обработки по сравнению с контрольными пробами свидетельствуют о том, что один кластер образовали бенз(а)пирен и смесь бутилацетата и о-ксилола, влияние которых привело к изменениям содержания пигментов фотосинтеза по сравнению с контролем в пределах от 0,033 до 0,162 мг/г сырой массы для изучаемых пигментов. Менее значительные различия отмечались после воздействия бутилацетата (от -0,005 до 0,026 мг/г сырой массы). Максимальные изменения через одни сутки в наших исследованиях по отношению к контрольным образцам были вызваны обработкой о-ксилола и составили 0,152–0,384 мг/г сырой массы листа для изучаемых пигментов. Через трое суток эксперимента ситуация несколько изменилась, и один кластер с бенз(а)пиреном образовал бутилацетат (изменения содержания пигментов составили от 0,044 до 0,257 мг/г сырой массы); наиболее значительные различия по отношению к контролю через трое суток были вызваны влиянием о-ксилола и смеси бутилацетата с о-ксилолом (0,230–0,559 мг/г сырой массы).

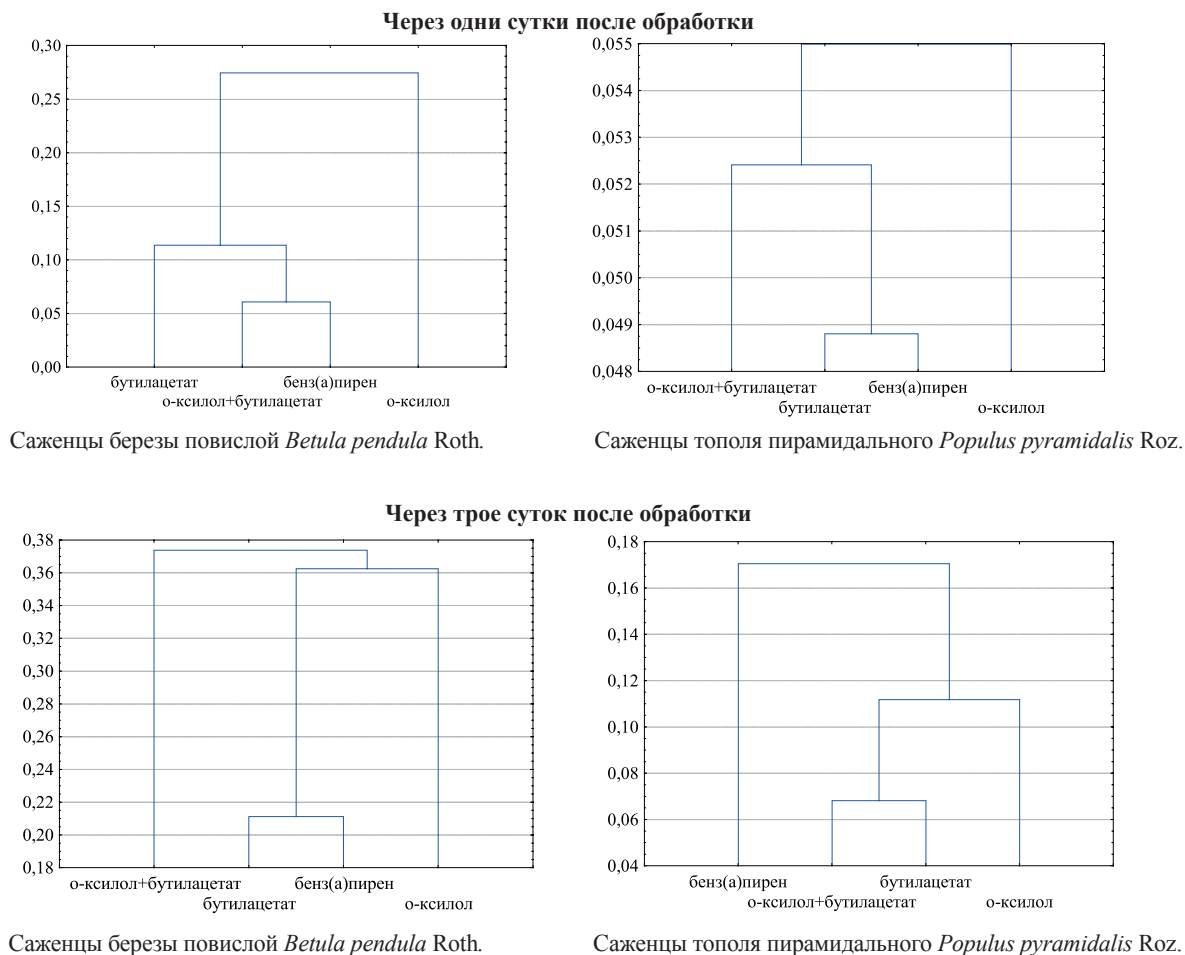


Рис. 2. Дендрограммы изменений содержания фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений по сравнению с контролем

Fig. 2. Dendrograms of photosynthetic content changes pigments in woody plants seedlings leaves compared with the control

У тополя пирамидального через одни сутки после обработки аналогично березе повислой наиболее резкие различия между контрольными и экспериментальными пробами наблюдались после обработки раствором о-ксилола (0,189–0,444 мг/г сырой массы); достаточно сильно повлияла смесь бутилацетата и о-ксилола (0,193–0,449 мг/г сырой массы); один кластер образовали бенз(а)пирен и бутилацетат (различия по сравнению с контролем составили 0,157–0,406 мг/г сырой массы). Через трое суток эксперимента максимально выраженные различия по отношению к контрольным пробам были обусловлены влиянием бенз(а)пирена (0,223–0,677 мг/г сырой массы); достаточно сильное влияние было характерно для о-ксилола (различия составили 0,190–0,527 мг/г сырой массы по сравнению с контролем); один кластер менее действующих соединений образовали бутилацетат и смесь бутилацетата и о-ксилола (0,148–0,460 мг/г сырой массы).

Таким образом, по сравнению с контрольными пробами максимальное изменение содержания пигментов у экспериментальных древесных саженцев березы повислой вызывало действие о-ксилола и смеси о-ксилола с бутилацетатом; у тополя пирамидального – о-ксилола и бенз(а)пирена.

### Заключение

Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок саженцев древесных растений городской среды летучими углеводородами и их смесью свидетельствуют о том, что воздействие на пигменты березы повислой *Betula pendula* Roth. раствора о-ксилола и бенз(а)пирена проявлялось через одни сутки эксперимента в виде уменьшения содержания, а в течение последующих трех суток ответная реакция пигментного аппарата выражалась в постепенном увеличении их количества. Влияние бутилацетата и смеси бутилацетата с о-ксилолом в опыте с березой повислой *Betula pendula* Roth. вызывало более интенсивное уменьшение содержания пигментов через трое суток после воздействия растворов на листовые пластинки. Ответная реакция тополя пирамидального проявлялась в виде снижения



содержания пигментов фотосинтеза через трое суток после обработки всеми используемыми одиночными растворами и смесью бутилацетата с о-ксилолом.

В процессе проведенного эксперимента по совместному воздействию на листовые пластинки саженцев использованных соединений в виде смеси выявлена возможность бутилацетата к ослаблению отрицательного воздействия о-ксилола на количество пигментов в большинстве случаев. Что касается бутилацетата, то использование максимальной дозы смеси приводило к усилению его негативного влияния через одни сутки эксперимента; минимальная доза смеси приводила к ослаблению отрицательного воздействия бутилацетата на содержание хлорофилла *a* и каротиноидов используемых саженцев древесных растений через одни сутки эксперимента. По истечении трех суток после обработки смесью у березы повислой наблюдалось увеличение токсического эффекта бутилацетата на содержание пигментов во всех дозах, а у тополя пирамидального – снижение, за исключением количества хлорофилла *b*.

### Библиографические ссылки

1. Ланкин АВ. *Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат* [автореферат диссертации]. Москва: [б. н.]; 2016. 22 с.
2. Чикидова АЛ. *Полициклические ароматические углеводороды в экосистемах г. Москвы (на примере Восточного административного округа)* [диссертация]. Москва: [б. н.]; 2017. 141 с.
3. Масленко ЕА. *Влияние производных бензола (п-ксилол и ароматические кислоты) и 2-метил-1,3-диоксолана на водоросли и высшие растения* [автореферат диссертации]. Борок: [б. н.]; 2006. 22 с.
4. Кабашникова ЛФ. *Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков*. Минск: Беларуская навука; 2011. 327 с.
5. Тюлькова ЕГ. Влияние техногенных условий на содержание фотосинтетических пигментов древесных растений различных возрастных групп. *Вестник Брестского государственного университета*. 2019;1:52–60.
6. Касимов НС, и др. *Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния*. Москва: ИП Филимонов М.В., 2014. – 560 с.
7. Бухарин ИЛ. *Биоэкологические особенности древесных растений и обоснование их использования в целях экологической оптимизации урбаноосреды (на примере г. Ижевска)* [автореферат диссертации]. Тольятти: [б. н.]; 2009. 36 с.
8. Мошеникова НБ. *Оценка экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга* [автореферат диссертации]. Москва: [б. н.]; 2011. 19 с.
9. Савинцева ЛС. *Экологический анализ адаптивных механизмов растений в урбанизированной среде* [автореферат диссертации]. Петрозаводск: [б. н.]; 2015. 23 с.
10. Павлюк ВВ. *Влияние повышенных концентраций CO<sub>2</sub> на рост сеянцев хвойных* [автореферат диссертации]. Львов: [б. н.]; 1990. 17 с.
11. Николаевская ТВ. *Эколого-физиологическая оценка устойчивости растений к трем газам (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>)* [автореферат диссертации]. Москва: [б. н.]; 19 с.

### References

1. Lankin AV. *Mekhanizmy toksicheskogo deystviya politsiklicheskih aromaticheskikh uglevodorodov na photosinteticheskiy apparat* [The mechanisms of polycyclic aromatic hydrocarbons toxic effects on the photosynthetic apparatus] [PhD thesis]. Moscow: [publisher unknown]; 2016. 22 p. Russian.
2. Chikidova AL. *Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody v ekosistemakh g. Moskvy (na primere Vostochnogo administrativnogo okruga)* [Polycyclic aromatic hydrocarbons in the ecosystems of Moscow (case study of the eastern administrative district)] [dissertation]. Moscow: [publisher unknown]; 2017. 141 p. Russian.
3. Maslenko EA. *Vlijanie proizvodnykh benzola (n-ksilol i aromaticheskie kisloty) i 2-metil-1,3-dioksolana na vodorosli i vysshie rasteniya* [The effect of benzene derivatives (p-xylol and aromatic acids) and 2-ethyl-1,3-dioxolane on algae and higher plants] [PhD thesis]. Bork: [publisher unknown]; 2006. 22 p. Russian.
4. Kabashnikova LF. *Photosinteticheskiy apparat i potentsial produktivnostikhlebnyykh zlakov* [Photosynthetic apparatus and the productivity potential of cereals]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2011. 327 p. Russian.
5. Tyulkova EG. Technogenic conditions influence on the photosynthetic pigments content of various age groups woody plants of. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Brest state university]. 2019;1:52–60. Russian.
6. Kasimov NS, et al. *Regiony i goroda Rossii: integralnaya otsenka ekologicheskogo sostojaniya* [Regions and cities of Russia: an integrated assessment of the ecological state]. Moscow: IP Filimonov M.V.; 2014. 560 p. Russian.
7. Bukharin IL. *Bioekologicheskie osobennosti drevesnykh rasteniy i obosnovanie ikh ispolzovaniya v tselakh ekologicheskoy optimizatsii urbanosredy (na primere g izhevskaya)* [Bioecological features of woody plants and the rationale for their use for environmental optimization of the urban environment (for example, Izhevsk)] [PhD thesis]. Tolyatti: [publisher unknown]; 2009. 36 p. Russian.
8. Moschenikova NB. *Otsenka ekologicheskogo sostojaniya zelenykh nasazhdeniy Sankt-Peterburga* [The ecological status assessment of St. Petersburg green spaces] [PhD thesis]. Moscow: [publisher unknown]; 2011. 19 p. Russian.
9. Savintseva LS. *Ekologicheskby anaiz adaptivnykh mtkhanizmov rasteniy v urbanizirovannoy srede* [Ecological analysis of plants adaptive mechanisms in an urbanized environment] [PhD thesis]. Petrozavodsk: [publisher unknown]; 2015. 23 p. Russian.
10. Pavlyuk VV. *Vlijanie povyshennykh kontsentratsiy CO<sub>2</sub> na rost sejantsev khvoynykh* [The effect of increased CO<sub>2</sub> concentrations on the growth of coniferous seedlings] [PhD thesis]. Lvov: [publisher unknown]; 1990. 17 p. Russian.
11. Nikolaevskaya TV. *Ekologo-phiziologicheskaja otsenka ustoychivosti rasteniy k trem gazam (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>)* [Ecological and physiological assessment of plant resistance to three gases (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>)] [PhD thesis]. Moscow: [publisher unknown]; 1992. 19 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 19.09.2019.  
Received by editorial board 19.09.2019.