

УДК 574.24.633

Е. Г. Тюлькова, Л. П. Авдашкова, Л. Ф. Кабашишникова

ВЛИЯНИЕ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ОВСЯНИЦЫ ТРОСТНИКОВОЙ *FESTUCA ARUNDINACEA SCHREB.* В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА (на примере предельных, ароматических углеводов и сложных эфиров)

61

Представлены результаты определения содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) в листьях одного из наиболее распространенных представителей травянистых растений городской среды – овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. – в контролируемых условиях эксперимента. Установлено, что более резкое снижение содержания пигментов в листьях овсяницы через одни сутки после обработки органическими соединениями по сравнению с тремя сутками происходило после обработки пентаном, гексаном, бензолом, а также смесями пентана с гексаном; пентана и гексана с бенз(а)пиреном. Влияние *o*-ксилола, бенз(а)пирена, бутилацетата; смеси бутилацетата с *o*-ксилолом и бензола с *o*-ксилолом вызывало более интенсивное уменьшение содержания пигментов через трое суток после обработки растений. При этом максимальное изменение содержания пигментов в процессе эксперимента вызывало действие бутилацетата, *o*-ксилола и смеси бутилацетата с *o*-ксилолом, а наибольшее снижение содержания пигментов по сравнению с контролем отмечено под действием *o*-ксилола.

The article presents the results of the photosynthetic pigments content analysis (chlorophyll *a*, *b* and carotenoids) in the leaves of one of the most common representatives of the urban herbaceous plants – reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb., in controlled experimental conditions. The content of pigments in the leaves in one day after treatment with organic compounds sharply decreases compared to three days occurred after treatment with pentane, hexane, benzene, as well as mixtures of pentane and hexane; pentane and hexane with benz(a)pyrene. The influence of *o*-xylol, benz(a)pyrene, butyl acetate; mixtures of butyl acetate with *o*-xylol and benzene with *o*-xylol caused a more intense reduction in the content of pigments three days after the treatment of plants. At the same time, the maximum change in the content of pigments during the experiment is caused by the action of butyl acetate, *o*-xylol and a mixture of butyl acetate with *o*-xylol; and the greatest decrease in the content of pigments compared to the control was observed under the action of *o*-xylol.

Ключевые слова: фотосинтетические пигменты, овсяница тростниковая *Festuca arundinacea* Schreb., пентан, гексан, бензол, *o*-ксилол, бенз(а)пирен, бутилацетат.

Keywords: photosynthetic pigments, reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb., pentane, hexane, benzene, *o*-xylol, benz(a)pyrene, butyl acetate.



Введение

В последние годы в глобальном масштабе в целом и в Республике Беларусь в частности происходят изменения в структуре размещения промышленных производств и их технологических процессов. Это обусловило увеличение количества стационарных источников и объемов выбросов техногенных элементов и их соединений в атмосферный воздух по сравнению с мобильными источниками [1]. Для отдельных промышленных предприятий Беларуси характерно наличие 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. Одной из наиболее уязвимых систем растительной клетки при действии различных повреждающих факторов, в том числе углеводородов, является фотосинтетический аппарат [2]. Изучение влияния данной группы соединений на интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений, с одной стороны, актуально в целях сравнительного анализа степени их токсичности при одиночном и совместном воздействии [3–7], а с другой стороны – мало изучено по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода [8–13]. В этой связи цель работы – изучение характера изменения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях одного из наиболее распространенных представителей травянистых растений городской среды – овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. – при разных дозах воздействия предельных, ароматических углеводородов и сложного эфира и их смесей в задаваемых условиях эксперимента.

Материал и методы

Объектом исследований послужили растения овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. как одного из наиболее распространенных представителей травянистых растений в городских условиях. Основная научная идея при постановке эксперимента по обработке растений овсяницы предельными, ароматическими углеводородами и сложным эфиром заключалась в том, чтобы установить характер изменений содержания фотосинтетических пигментов, искусственно задавая уровни поступления углеводородов в листовые пластинки. Исходя из этого, проведен сравнительный анализ состава фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы, обработанных различными дозами углеводородов (пентаном, гексаном, бензолом, о-ксилолом, бенз(а)пиреном, бутилацетатом и их смесями) через определенные периоды времени после воздействия (одни и трие суток).

Выбор органических соединений обусловлен преобладающим количеством группы неметановых летучих органических соединений, представителями которой являются данные вещества, в выбросах от-



дельных промышленных предприятий Гомеля (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей») по сравнению с другими загрязняющими веществами. Что касается бенз(а)пирена, 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 (бензол, о-ксилол)

Листовые пластинки овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. обрабатывали водными растворами углеводородов. Использованные дозы углеводородов рассчитывались из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ [14]. В соответствии с нормативами ПДК пентана в атмосферном воздухе является 100000,0 мкг/м³; гексана – 60000,0 мкг/м³; бензола – 100,0 мкг/м³; ксилолов – 200 мкг/м³; бутилацетата – 100,0 мкг/м³; бенз(а)пирена – 5,0 нг/м³. Для всех соединений, кроме бенз(а)пирена, использовали величину максимальной разовой ПДК; для бенз(а)пирена – среднесуточную ПДК [14].

В качестве контроля использовали необработанные растения овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. Экспериментальными выступили растения, обработанные водными растворами исследуемых соединений в следующих концентрациях: 0,0001–0,03 мг/мл пентана; 0,00006–0,018 мг/мл гексана; 0,0001–0,03 мкг/мл бензола; 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 овсяницы осуществлялась путем опрыскивания водными растворами (по 50 мл водного раствора каждой дозы вводимого соединения).

Для выявления эффектов совместного воздействия исследуемых соединений использовали смеси следующих концентраций: 0,01 мкг/мл бутилацетата + 0,02 мкг/мл о-ксилола; 0,02 мкг/мл бутилацетата + 0,04 мкг/мл о-ксилола; 0,01 мкг/мл бензола + 0,02 мкг/мл о-ксилола; 0,02 мкг/мл бензола + 0,04 мкг/мл о-ксилола; 0,01 мг/мл пентана + 0,006 мг/мл гексана; 0,02 мг/мл пентана + 0,012 мг/мл гексана; 0,01 мг/мл пентана + 0,006 мг/мл гексана + 0,0005 нг/мл бенз(а)пирена; 0,02 мг/мл пентана + 0,012 мг/мл гексана + 0,001 нг/мл бенз(а)пирена.

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 в 3 биологических повторностях. Содержание пигментов в



экстрактах рассчитывали с помощью коэффициентов экстинкции, приведенных в работе [2] для соответствующего растворителя, по формулам 1, 2, 3, 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 волнах длиной 440,5, 644 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 комплексной количественной оценки изменений содержания фотосинтетических пигментов в условиях эксперимента проводили вычисления среднего значения разностей содержаний каждого фотосинтетического пигмента, измеренных через одни и трое суток эксперимента. Также определяли долю изменения содержания каждого пигмента в сумме отклонений значений содержания пигментов через одни и трое суток эксперимента.

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 *Microsoft Excel*.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea Schreb.* в условиях эксперимента по обработке углеводородами и их смесями представлены в таблицах 1–7.

Таблица 1

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea Schreb.* в условиях эксперимента после обработки пентаном

Концентрация раствора пентана, мг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки после обработки</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,0001	0,71 ± 0,006*	0,28 ± 0,002*	0,45 ± 0,004*
0,005	0,88 ± 0,005*	0,31 ± 0,002*	0,55 ± 0,003*
0,01	0,69 ± 0,004*	0,27 ± 0,002*	0,44 ± 0,002*



Концентрация раствора пентана, мг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
0,02	0,80 ± 0,005*	0,30 ± 0,001*	0,53 ± 0,004*
0,03	0,63 ± 0,004*	0,26 ± 0,001*	0,39 ± 0,002*
<i>Через трое суток после обработки</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,0001	0,94 ± 0,005*	0,35 ± 0,001*	0,57 ± 0,003*
0,005	1,09 ± 0,008*	0,33 ± 0,004*	0,60 ± 0,007*
0,01	1,03 ± 0,004*	0,37 ± 0,004*	0,62 ± 0,003*
0,02	0,76 ± 0,001*	0,31 ± 0,001*	0,47 ± 0,001*
0,03	0,65 ± 0,002*	0,26 ± 0,001*	0,40 ± 0,001*

Примечание. Здесь и далее в таблицах достоверные значения содержания фотосинтетических пигментов при $p \leq 0,05$ обозначены *.

Данные таблиц 1–7 свидетельствуют о том, что обработка пентаном, гексаном, бензолом, *o*-ксилолом, бенз(а)пиреном, бутилацетатом и их смесями в большинстве случаев явилась причиной снижения содержания фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными значениями. Так, под действием пентана наблюдалось снижение содержания всех изученных пигментов в 1,51–1,89 раза через одни сутки и в 2,0–2,18 раза через трое суток по сравнению с контрольными пробами (табл. 1).

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что по сравнению с пентаном опрыскивание листовых пластинок гексаном обусловило менее резкое снижение содержания пигментов как через одни сутки, так и через трое суток после обработки (в 1,21–1,79 раза и в 1,39–2,03 раза соответственно).

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки гексаном

Концентрация раствора гексана, мг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки после обработки</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,00006	0,94 ± 0,004*	0,31 ± 0,002*	0,56 ± 0,002*
0,003	0,90 ± 0,005*	0,28 ± 0,003*	0,53 ± 0,003*
0,006	0,80 ± 0,001*	0,24 ± 0,001*	0,48 ± 0,001*
0,012	0,72 ± 0,002*	0,27 ± 0,002*	0,45 ± 0,001*
0,018	0,69 ± 0,001*	0,29 ± 0,001*	0,61 ± 0,001*



Концентрация раствора гексана, мг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через трое суток после обработки</i>			
Контроль	1,42±0,013	0,52±0,005	0,84±0,007
0,00006	1,31±0,006*	0,81±0,019*	0,96±0,008*
0,003	0,99±0,002*	0,41±0,001*	0,57±0,001*
0,006	0,97±0,001*	0,27±0,001*	0,56±0,001*
0,012	0,78±0,004*	0,30±0,002*	0,45±0,001*
0,018	0,70±0,001*	0,31±0,001*	0,61±0,001*

Результатом влияния ароматического углеводорода (бензола) явилось снижение содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в 1,44 – 1,50 раза через одни сутки и в 1,71 – 2,0 раза через трое суток после обработки листовых пластинок (табл. 3).

Таблица 3

**Содержание фотосинтетических пигментов
в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.
в условиях эксперимента после обработки бензолом**

Концентрация раствора бензола, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки после обработки</i>			
Контроль	1,24±0,004	0,39±0,001	0,74±0,001
0,0001	1,05±0,003*	0,36±0,002*	0,41±0,012*
0,005	1,02±0,002*	0,32±0,001*	0,61±0,001*
0,01	0,92±0,002*	0,29±0,001*	0,57±0,001*
0,02	0,91±0,001*	0,29±0,001*	0,57±0,001*
0,03	0,84±0,001*	0,27±0,001*	0,51±0,001*
<i>Через трое суток после обработки</i>			
Контроль	1,42±0,013	0,52±0,005	0,84±0,007
0,0001	1,33±0,002*	0,41±0,002*	0,80±0,001
0,005	1,16±0,001*	0,39±0,001*	0,70±0,001*
0,01	0,92±0,001*	0,36±0,003*	0,56±0,002*
0,02	0,90±0,005*	0,29±0,004*	0,55±0,001*
0,03	0,82±0,001*	0,25±0,001*	0,49±0,001*

Более значительное отрицательное действие на содержание пигментов в сравнении с бензолом отмечено для *o*-ксилола (в 1,57 – 2,07 раза через одни сутки, в 2,35 – 2,93 раза через трое суток (табл. 4)). При этом среди исследованных ароматических углеводородов *o*-ксилол оказывал более негативное воздействие на содержание пигментов фотосинтеза по сравнению с алканами.



Таблица 4

**Содержание фотосинтетических пигментов
в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.
в условиях эксперимента после обработки о-ксилолом**

Концентрация раствора о-ксилола, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки после обработки</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,0002	1,09 ± 0,007*	0,46 ± 0,002*	0,68 ± 0,004
0,01	1,07 ± 0,007*	0,45 ± 0,002*	0,66 ± 0,004*
0,02	1,01 ± 0,007*	0,42 ± 0,003	0,62 ± 0,004*
0,04	0,84 ± 0,001*	0,28 ± 0,003*	0,55 ± 0,001*
0,06	0,60 ± 0,012*	0,25 ± 0,003*	0,40 ± 0,007*
<i>Через трое суток после обработки</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,0002	1,30 ± 0,009*	0,48 ± 0,003	0,81 ± 0,006
0,01	0,91 ± 0,011*	0,39 ± 0,005*	0,55 ± 0,006*
0,02	0,59 ± 0,003*	0,26 ± 0,001*	0,37 ± 0,002*
0,04	0,51 ± 0,003*	0,23 ± 0,002*	0,31 ± 0,002*
0,06	0,48 ± 0,002*	0,22 ± 0,001*	0,31 ± 0,001*

67

Бенз(а)пирен, несмотря на наличие сведений о сильном токсическом воздействии на живые организмы, в наших исследованиях характеризовался не самым интенсивным отрицательным влиянием на содержание пигментов фотосинтеза в процессе эксперимента: через одни сутки после обработки наблюдалось снижение содержания пигментов в 1,50–2,03 раза по сравнению с контролем, через трое суток – в 2,19–2,39 раза (табл. 5). Максимальное уменьшение уровня пигментов в листьях овсяницы под действием изученных ароматических углеводородов в условиях проведенного эксперимента наблюдалось в случае использования о-ксилола.

Таблица 5

**Содержание фотосинтетических пигментов
в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.
в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном**

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки после обработки</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,000005	1,00 ± 0,003*	0,38 ± 0,001	0,62 ± 0,002*
0,00025	0,99 ± 0,002*	0,34 ± 0,001*	0,44 ± 0,001*
0,0005	0,97 ± 0,005*	0,32 ± 0,001*	0,51 ± 0,002*
0,001	0,94 ± 0,004*	0,36 ± 0,001*	0,59 ± 0,002*
0,0015	0,61 ± 0,001*	0,25 ± 0,001*	0,37 ± 0,001*



Окончание табл. 5

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через трое суток после обработки</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,000005	1,10 ± 0,001	0,38 ± 0,001*	0,63 ± 0,002*
0,00025	0,86 ± 0,001*	0,30 ± 0,001*	0,50 ± 0,001*
0,0005	0,82 ± 0,002*	0,31 ± 0,001*	0,52 ± 0,002*
0,001	0,69 ± 0,001*	0,29 ± 0,001*	0,43 ± 0,001*
0,0015	0,59 ± 0,001*	0,24 ± 0,001*	0,36 ± 0,001*

68

Согласно данным статистической отчетности за последние годы, происходит резкое увеличение выбросов бутилацетата в атмосферный воздух в результате деятельности отдельных промышленных предприятий Беларуси. Результатом влияния этого соединения стало снижение содержания фотосинтетических пигментов по сравнению с контролем через одни сутки после обработки только при воздействии растворов бутилацетата с концентрацией 0,02 мкг/мл и 0,03 мкг/мл действующего вещества (табл. 6).

Таблица 6

**Содержание фотосинтетических пигментов
в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.
в условиях эксперимента после обработки бутилацетатом**

Концентрация раствора бутилацетата, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки после обработки</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,0001	1,62 ± 0,001*	0,53 ± 0,001*	1,08 ± 0,001*
0,005	1,29 ± 0,001*	0,41 ± 0,001	0,76 ± 0,001
0,01	1,28 ± 0,002	0,49 ± 0,001*	0,84 ± 0,002*
0,02	1,11 ± 0,001*	0,37 ± 0,001	0,71 ± 0,001
0,03	0,98 ± 0,001*	0,35 ± 0,001*	0,67 ± 0,001*
<i>Через трое суток после обработки</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,0001	1,25 ± 0,001*	0,78 ± 0,001*	0,89 ± 0,001
0,005	1,03 ± 0,001*	0,35 ± 0,001*	0,60 ± 0,001*
0,01	0,90 ± 0,002*	0,33 ± 0,001*	0,55 ± 0,002*
0,02	0,80 ± 0,001*	0,30 ± 0,001*	0,50 ± 0,001*
0,03	0,77 ± 0,001*	0,28 ± 0,001*	0,50 ± 0,001*

Через трое суток снижение уровня фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными пробами наблюдалось во всех вариантах опыта, за исключением раствора с концентрацией действующего вещества 0,0001 мкг/мл, где наблюдалось увеличение содержания хло-



рофилла *b* и каротиноидов. Это свидетельствует о том, что бутиловый эфир уксусной кислоты проявляет свое воздействие не сразу, а через некоторое время, в отличие от других исследованных органических соединений.

Следует отметить, что выбросы промышленных предприятий характеризуются наличием не одного техногенного элемента или соединения, а целого их спектра, иногда довольно значительного. Вследствие этого загрязнители могут оказывать воздействие на растения в виде различных смесей. Учитывая наличие в живых организмах определенных защитных механизмов для нейтрализации воздействия токсических веществ, возможно взаимное влияние на эти механизмы различных соединений при их сочетанном действии.

Для изучения характера сочетанного действия некоторых органических соединений на пигментный аппарат овсяницы нами проведен сравнительный эксперимент с использованием смесей бутилацетата с *o*-ксилолом; бензола с *o*-ксилолом; пентана с гексаном; пентана, гексана с бенз(а)пиреном, наличие которых характерно для выбросов рассматриваемых промышленных предприятий (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» и ТЭЦ-2).

Результаты проведенного анализа показали способность бутилацетата снижать токсическое влияние *o*-ксилола, а *o*-ксилола – усиливать токсическое влияние бутилацетата на содержание пигментов фотосинтеза (табл. 7).

69

Таблица 7

**Содержание фотосинтетических пигментов
в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.
в условиях эксперимента после обработки смесями
исследуемых соединений**

Варианты опыта	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки, смесь бутилацетат + o-ксилол</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,01 мкг/мл + 0,02 мкг/мл	1,33 ± 0,002*	0,46 ± 0,001*	0,88 ± 0,002*
0,02 мкг/мл + 0,04 мкг/мл	0,98 ± 0,001*	0,35 ± 0,001	0,68 ± 0,001*
<i>Через трое суток, смесь бутилацетат + o-ксилол</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,01 мкг/мл + 0,02 мкг/мл	0,80 ± 0,002*	0,32 ± 0,001*	0,51 ± 0,002*
0,02 мкг/мл + 0,04 мкг/мл	0,62 ± 0,001*	0,26 ± 0,001*	0,39 ± 0,001*
<i>Через сутки, смесь бензол + o-ксилол</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,01 мкг/мл + 0,02 мкг/мл	1,27 ± 0,002	0,51 ± 0,001*	0,81 ± 0,002*
0,02 мкг/мл + 0,04 мкг/мл	1,09 ± 0,001*	0,44 ± 0,001	0,71 ± 0,001
<i>Через трое суток, смесь бензол + o-ксилол</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± ± 0,007
0,01 мкг/мл + 0,02 мкг/мл	0,94 ± 0,002*	0,35 ± 0,001*	0,62 ± 0,002*
0,02 мкг/мл + 0,04 мкг/мл	0,62 ± 0,001*	0,27 ± 0,001*	0,39 ± 0,001*



Варианты опыта	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
<i>Через сутки, смесь пентан + гексан</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,01 мг/мл + 0,006 мг/мл	0,66 ± 0,002*	0,31 ± 0,001*	0,41 ± 0,002*
0,02 мг/мл + 0,012 мг/мл	0,63 ± 0,001*	0,31 ± 0,001*	0,39 ± 0,001*
<i>Через трое суток, смесь пентан + гексан</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,01 мг/мл + 0,006 мг/мл	1,03 ± 0,002*	0,42 ± 0,001	0,63 ± 0,002
0,02 мг/мл + 0,012 мг/мл	0,50 ± 0,001*	0,25 ± 0,001*	0,30 ± 0,001*
<i>Через сутки, смесь пентан + гексан + бенз(а)пирен</i>			
Контроль	1,24 ± 0,004	0,39 ± 0,001	0,74 ± 0,001
0,01 мг/мл + 0,006 мг/мл + + 0,0005 нг/мл	0,67 ± 0,002*	0,30 ± 0,001*	0,42 ± 0,002*
0,02 мг/мл + 0,012 мг/мл + + 0,001 нг/мл	0,58 ± 0,001*	0,21 ± 0,001*	0,35 ± 0,001*
<i>Через трое суток, смесь пентан + гексан + бенз(а)пирен</i>			
Контроль	1,42 ± 0,013	0,52 ± 0,005	0,84 ± 0,007
0,01 мг/мл + 0,006 мг/мл + + 0,0005 нг/мл	0,63 ± 0,002*	0,31 ± 0,001*	0,35 ± 0,002*
0,02 мг/мл + 0,012 мг/мл + + 0,001 нг/мл	0,62 ± 0,001*	0,23 ± 0,001*	0,38 ± 0,001*

Обработка листовых пластинок смесью бензола и о-ксилола приводила к ослаблению отрицательного воздействия этих соединений по отдельности на количество пигментов в листьях овсяницы. Смеси пентана с гексаном, а также пентана с гексаном и бенз(а)пиреном, напротив, усиливали отрицательное влияние этих соединений в сравнении с их одиночным воздействием на пигментный аппарат растений.

Достоверность различий между содержанием фотосинтетических пигментов в листовых пластинках экспериментальных и контрольных растений оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками контрольных и экспериментальных значений количества пигментов ($F_{\text{фактич.}}(1, 6) = 6,44 \div 227,95$; $F_{\text{критич.}}(1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$). Исключение составили следующие варианты опыта: через одни сутки – при обработке раствором о-ксилола с концентрацией 0,0002 мкг/мл (каротиноиды), 0,02 мкг/мл о-ксилола (хлорофилл *b*); 0,000005 нг/мл бенз(а)пирена (хлорофилл *b*); 0,01 мкг/мл бутилацетата (хлорофилл *a*); 0,005 мкг/мл, 0,02 мкг/мл бутилацетата (хлорофилл *b*); 0,005 мкг/мл и 0,02 мкг/мл бутилацетата (каротиноиды). В случае использования смесей недостоверные различия между контрольным значением и экспериментальной пробой наблюдались после совместной обработки листьев 0,01 мкг/мл бензола и 0,02 мкг/мл о-ксилола (хлорофилл *a*); 0,02 мкг/мл бензола и 0,04 мкг/мл о-ксилола (хлорофилл *b*);



0,02 мкг/мл бензола и 0,04 мкг/мл о-ксилола (каротиноиды). Через трое суток недостоверные отличия отмечались в следующих случаях: при обработке 0,0001 мкг/мл бензола (каротиноиды); 0,0002 мкг/мл о-ксилола (хлорофилл *b* и каротиноиды); 0,000005 нг/мл бенз(а)пирена (хлорофилл *a*); 0,0001 мкг/мл бутилацетата (каротиноиды); смеси 0,01 мг/мл пентана и 0,006 мг/мл гексана (хлорофилл *b* и каротиноиды).

Таким образом, количество недостоверных различий между экспериментальными и контрольными пробами составило 9,4 % вариантов сравнений с контролем при обработке одиночными реагентами и 14,6 % – при обработке смесями. Кроме того, недостоверные различия в большинстве вариантов опыта наблюдались при обработке одиночными соединениями через одни сутки по сравнению с тремя сутками и были характерны для проб, обработанных бутилацетатом.

В случае использования смесей большинство недостоверных различий отмечалось при совместном введении бензола с о-ксилолом через одни сутки. Через трое суток после воздействия наибольшее количество недостоверных различий между экспериментальными и контрольными пробами наблюдалось после обработки бензолом, о-ксилолом и смесью пентана с гексаном.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа выборок содержания пигментов через одни и трое суток после обработки позволили установить достоверность их различий ($F_{\text{фактич.}} = 7,72 \div 96,51$; $F_{\text{критич.}}(1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$). Исключения наблюдались в следующих случаях: при обработке раствором бензола с концентрацией 0,01 мкг/мл для хлорофилла *a*; 0,02 и 0,03 мкг/мл – для всех фотосинтетических пигментов; при введении раствора о-ксилола 0,0002 мкг/мл – для хлорофилла *b*; в эксперименте с раствором пентана с концентрацией 0,005 мг/мл – для хлорофилла *b* и с концентрацией 0,03 мг/мл – для всех пигментов; при обработке раствором гексана 0,012 мг/мл – для каротиноидов и 0,018 мг/мл – для всех пигментов; в эксперименте с раствором бенз(а)пирена 0,000005 нг/мл и 0,0005 нг/мл – для хлорофилла *b* и каротиноидов, 0,0015 нг/мл – для всех пигментов, а также при введении всех используемых концентраций смеси пентана, гексана и бенз(а)пирена – для хлорофилла *b*. В целом количество недостоверных различий между экспериментальными и контрольными пробами составило 25,6 % вариантов сравнений с контролем при обработке одиночными реагентами и 8,3 % – при обработке смесями.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае достоверных различий введенное соединение продолжает свое воздействие на содержание фотосинтетических пигментов 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 учетом общей количественной оценки влияния использованных предельных, ароматических углеводородов и сложного эфира на содержание пигментов фотосинтеза овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. получено, что после обработки пентаном; гексаном;



бензолом, а также смесью пентана с гексаном; пентана, гексана с бенз(а)пиреном воздействие на пигменты через одни сутки эксперимента проявляется в виде уменьшения содержания пигментов, а в течение последующих трех суток ответная реакция пигментного аппарата выражается в постепенном увеличении их содержания (рис. 1).

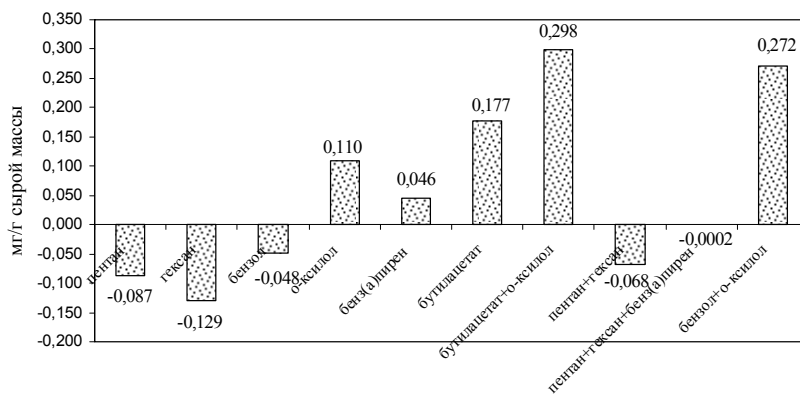


Рис. 1. Изменение содержания хлорофиллов *a, b* и каротиноидов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. за период эксперимента

Влияние *o*-ксилола; бенз(а)пирена; бутилацетата; смеси бутилацетата с *o*-ксилолом и бензола с *o*-ксилолом, наоборот, вызывает более интенсивное уменьшение содержания пигментов через трое суток после обработки. Возможно, такой эффект воздействия данных соединений связан с тем, что пентан и гексан характеризуются максимальной летучестью (объемная относительная летучесть пентана и гексана на фильтровальной бумаге при 25°С составляет 12,3 и 7,43 соответственно), что и может быть причиной более сильного воздействия этих соединений через одни сутки после эксперимента по сравнению с тремя сутками. Бензол относится к группе среднелетучих соединений (объемная относительная летучесть на фильтровальной бумаге при 25°С составляет 3,77); *o*-ксилол, бутилацетат и бенз(а)пирен являются малолетучими соединениями (объемная относительная летучесть *o*-ксилола и бутилацетата на фильтровальной бумаге при 25°С составляет 0,565 и 1,0 соответственно). Возможно, поэтому эффект их воздействия проявляется не сразу после обработки листовых пластинок, а через некоторое время.

Таким образом, оба изученных алкана вызывали наиболее резкое снижение содержания пигментов через одни сутки после обработки, ароматические углеводороды проявляли свое влияние как через одни, так и через трое суток после обработки, а сложный эфир — только после трех суток эксперимента. При этом максимальное изменение количества пигментов в процессе эксперимента среди одиночных соединений вызывало воздействие бутилацетата, среди смесей — смесь бутилацетата с *o*-ксилолом.



Вызывает интерес не только изменение содержания в целом всех пигментов в течение эксперимента, но и изменение содержания каждого пигмента в отдельности. С этой целью осуществляли расчет доли изменения содержания каждого пигмента в сумме отклонений значений содержания пигментов через одни и трое суток эксперимента. Так, если сумму изменений по всем пигментам при воздействии пентана считать за 100 %, то доля изменения содержания хлорофилла *a* составляет 57,96 %, хлорофилла *b* – 18,90 %, каротиноидов – 23,25 % (рис. 2). Аналогично был проведен расчет в отношении других вариантов опыта.

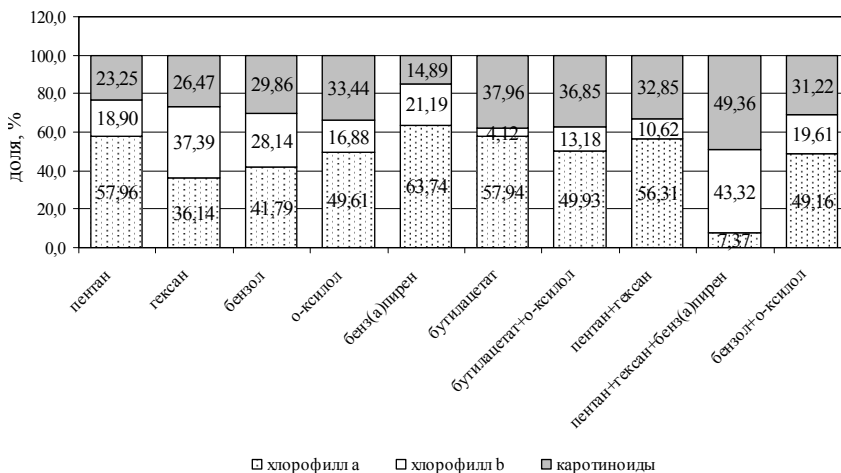


Рис. 2. Доля изменений содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в изменениях суммы этих пигментов за период эксперимента

Данные, представленные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что в большинстве случаев максимальное изменение содержания в течение эксперимента приходилось на хлорофилл *a*. При этом наиболее интенсивное изменение содержания хлорофилла *a* наблюдалось после воздействия бенз(а)пирена, пентана, бутилацетата и смеси пентана с гексаном.

Заключение

Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. летучими углеводородами и их смесями свидетельствуют о том, что более резкое изменение содержания фотосинтетических пигментов через одни сутки по сравнению с тремя сутками происходило после обработки пентаном, гексаном, бензолом, а также смесью пентана с гексаном; пентана, гексана с бенз(а)пиреном. Влияние о-ксилола, бенз(а)пирена, бутилацетата; смеси бутилацетата с о-ксилолом и бензола с о-ксилолом вызывало более интенсивное уменьшение содержания пигментов через трое суток по-



сле обработки. При этом максимальное изменение содержания пигментов вызывало воздействие бутилацетата, о-ксилола и смеси бутилацетата с о-ксилолом.

В процессе проведенного эксперимента по совместному воздействию на листовые пластинки овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* использованных соединений в виде смесей выявлена возможность бутилацетата снижать токсическое влияние о-ксилола на пигментный аппарат и способность о-ксилола усиливать токсическое влияние бутилацетата на содержание пигментов фотосинтеза. Совместная обработка листовых пластинок бензолом и о-ксилолом приводила к ослаблению отрицательного воздействия каждого соединения по отдельности на содержание пигментов; смеси пентана с гексаном, а также пентана с гексаном и бенз(а)пиреном, напротив, проявляли усиленное негативное действие на содержание фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы по сравнению с одиночными соединениями.

74

Список литературы

1. *Охрана окружающей среды* : стат. сборник. Минск, 2018.
2. Кабашикова Л.Ф. Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков. Минск, 2011.
3. Ланкин А.В. Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016.
4. Чикидова А.Л. Полициклические ароматические углеводороды в экосистемах г. Москвы (на примере Восточного административного округа) : дис. ... канд. биол. наук. М., 2017.
5. Масленко Е.А. Влияние производных бензола (п-ксилол и ароматические кислоты) и 2-метил-1,3-диоксолана на водоросли и высшие растения : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2006.
6. Малахова Е.С. Газоустойчивость и аккумуляционная способность растений в техногенной среде нефтехимических предприятий Западной Сибири (на примере ОАО «Техуглерод») : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Омск, 2004.
7. Mosaddegh M.H., Jafarian A., Ghasemi A., Mosaddegh A. Phytoremediation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene contaminated air by *D. deremensis* and *O. microrodasys* plants // J. Environ. Health Sci. and Eng. 2014. 12: 39.
8. Сергейчик С.А. Устойчивость древесных растений в техногенной среде. Минск, 1994.
9. Сергейчик С.А., Сергейчик А.А., Сидорович Е.А. Экологическая физиология хвойных пород Беларуси в техногенной среде. Минск, 1998.
10. Павлюк В.В. Влияние повышенных концентраций CO₂ на рост семян хвойных : автореф. дис. ... канд. сельхоз. наук. Львов, 1990.
11. Николаевская Т.В. Эколого-физиологическая оценка устойчивости растений к трем газам (SO₂, H₂S, NH₃) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1992.
12. Волкова М.В. Эколого-физиологическое обоснование расчета критических нагрузок аммиака для лесных насаждений Европейской территории России : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1994.
13. Вострикова М.А., Шкода В.В. Характеристика основных выбросов автотранспорта и их влияние на растения // Инновационная наука. 2015. №11. С. 65–66.



14. *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 : постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 08.11.2016 г. №113 // Министерство здравоохранения Республики Беларусь : [сайт]. URL: http://minzdrav.gov.by/upload/dadvfiles/000352_132617_postan113.doc (дата обращения: 20.05.2020).

Об авторах

Елена Григорьевна Тюлькова — канд. биол. наук, доц., Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Республика Беларусь.

E-mail: tut-3@mail.ru

Людмила Павловна Авдашкова — канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Республика Беларусь.

E-mail: avdashkova@mail.ru

Людмила Федоровна Кабашникова — д-р биол. наук, член-корр. НАН Беларуси, доц., Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, Республика Беларусь.

E-mail: kabashnikova@mail.ru

The authors

Dr Elena G. Tulkova, Associate Professor, Belarussian Trade and Economic University of Consumer Co-Operation, Republic of Belarus.

E-mail: tut-3@mail.ru

Dr Ludmila P. Avdashkova, Associate Professor, Belarussian Trade and Economic University of Consumer Co-Operation, Republic of Belarus.

E-mail: avdashkova@mail.ru

Dr Lyudmila F. Kabashnikova, Corresponding Member of NAS of Belarus, Associate Professor, Institute of Biophysics and Cell Engineering of NAS of Belarus, Republic of Belarus.

E-mail: kabashnikova@mail.ru