

Е.Г. ТЮЛЬКОВА

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ И АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ  
НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ  
ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ**

*УО «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации»,  
г. Гомель, Республика Беларусь  
tut-3@mail.ru*

**Введение.** В настоящее время в глобальном масштабе в целом и в Республике Беларусь в частности происходят процессы изменения в структуре размещения промышленных производств и их технологических процессах. Эти процессы за последние годы обусловили увеличение количества стационарных источников и объёмов выбросов техногенных элементов и их соединений в атмосферный воздух от стационарных источников по сравнению с мобильными [1]. На фоне различных изменений объёмов выбросов отдельных загрязняющих ингредиентов в атмосферу (твёрдые частицы, диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, неметановые летучие органические соединения, углеводороды) наиболее резкое увеличение объёмов выбросов за 2011 – 2017 гг.

наблюдается по углеводородам. Источниками поступления углеводов в окружающую среду является деятельность объектов сельского хозяйства и промышленные предприятия, в результате чего в атмосферу поступают предельные и ароматические углеводороды.

В настоящее время имеются разнонаправленные данные результатов исследований влияния стрессовых факторов, в том числе углеводов, на эффективность функционирования фотосинтетического аппарата и концентрацию пигментов фотосинтеза древесных и травянистых растений [2 – 3]. Поэтому целью работы явилось изучение закономерностей формирования концентраций хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов травянистых растений при воздействии различного количества предельных и ароматических углеводов в задаваемых условиях эксперимента.

**Материал и методы.** Одной из наиболее уязвимых систем клетки при действии различных повреждающих факторов, в том числе различных углеводов, является фотосинтетический аппарат. Поэтому научная идея при постановке эксперимента по обработке предельными и ароматическими углеводородами листьев овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* как одного из наиболее распространённых представителей травянистых растений в городских условиях заключалась в том, чтобы установить закономерности формирования различных концентраций фотосинтетических пигментов, искусственно задавая определённые уровни поступления углеводов в листовые пластинки при их обработке. Исходя из этого, целью эксперимента ставилось получение и сравнительный анализ биологических проб овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea*, обработанных определёнными дозы углеводов (пентаном, гексаном, бензолом, бенз(а)пиреном) в течение заданного времени.

Листовые пластинки овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* обрабатывали водными растворами углеводов. Размеры используемых доз углеводов рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ [4]. В качестве контроля использовали необработанные растения овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea*; экспериментальными явились растения, обработанные следующим количеством исследуемых соединений на 0,5 л воды: 0,05 – 15,0 мг пентана; 0,03 – 9,0 мг гексана; 0,05 – 15,0 мкг бензола и 0,0025 – 0,750 нг бенз(а)пирена. Обработка листовых пластинок растения осуществлялась путём опрыскивания водными растворами (по 50 мл на каждую дозу вводимого соединения).

Для определения концентрации хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листовых пластинках овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* использовали спектрофотометр *Cary Eclipse*.

С этой целью были приготовлены вытяжки из навески сырых листьев массой 30 – 40 мг в 100 % ацетоне [2].

Среднюю концентрацию хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов (использовали по 3 параллельных определения) определяли через 1 и 3 суток после обработки по формулам 1, 2, 3 и 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 хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в вытяжке сырых листьев объектов исследования (мг/г сырой массы);  $D_{440,5}$ ,  $D_{644}$ ,  $D_{662}$  – оптическая плотность при длинах волн 440,5 нм, 644 нм и 662 нм.

Для пересчёта концентраций фотосинтетических пигментов на сырую массу использовали массу сырых навесок и объем полученного фильтрата пигментов.

С целью комплексной количественной оценки изменений концентраций всех фотосинтетических пигментов в условиях эксперимента по сравнению с контрольным образцом проводили следующие вычисления:  $\sqrt{\sum(C_k - C_i)^2}$ , где  $C_k$  – среднее значение

разности концентрации каждого фотосинтетического пигмента в начале и конце эксперимента в контрольном образце;  $C_i$  – среднее значение разности концентрации каждого фотосинтетического пигмента в начале и конце эксперимента в экспериментальном образце.

Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью *M. Excel*.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в условиях эксперимента представлены в таблицах 1 – 4.

Данные таблиц 1 – 4 свидетельствуют о том, что обработка пентаном, гексаном, бензолом и бенз(а)пиреном является причиной снижения концентрации фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными пробами. При этом после обработки пентаном максимальное снижение концентрации всех рассматриваемых пигментов наблюдается через 3 суток (в 2,03 – 2,18 раза по сравнению с 1,53 – 1,95 раза через 1 сутки).

**Таблица 1 – Концентрация фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в условиях эксперимента после обработки пентаном**

Количество пентана, мг (на 0,5 л воды)	Концентрация фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
через 1 сутки после обработки			
контроль	1,23±0,004	0,39±0,001	0,74±0,001
0,05	0,71±0,006	0,28±0,002	0,45±0,004
2,5	0,88±0,005	0,31±0,002	0,55±0,003
5,0	0,69±0,004	0,27±0,002	0,44±0,002
10,0	0,80±0,005	0,26±0,001	0,52±0,004
15,0	0,63±0,004	0,26±0,001	0,39±0,002
через 3 суток после обработки			
контроль	1,42±0,013	0,53±0,005	0,85±0,007
0,05	0,94±0,005	0,35±0,001	0,57±0,003
2,5	1,09±0,008	0,33±0,004	0,60±0,007
5,0	1,03±0,004	0,37±0,004	0,62±0,003
10,0	0,76±0,001	0,31±0,001	0,47±0,001
15,0	0,65±0,002	0,26±0,001	0,40±0,001

**Таблица 2 – Концентрация фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в условиях эксперимента после обработки гексаном**

Количество гексана, мг (на 0,5 л воды)	Концентрация фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
1	2	3	4
через 1 сутки после обработки			
контроль	1,23±0,004	0,39±0,001	0,74±0,001
0,03	0,94±0,004	0,31±0,002	0,56±0,002
1,5	0,90±0,005	0,28±0,003	0,53±0,003
3,0	0,80±0,001	0,24±0,001	0,48±0,001
6,0	0,72±0,002	0,27±0,002	0,45±0,001
9,0	0,69±0,001	0,29±0,001	0,61±0,001

**Окончание таблицы 2**

1	2	3	4
через 3 суток после обработки			
контроль	1,42±0,013	0,53±0,005	0,85±0,007
0,03	1,31±0,006	0,81±0,019	0,96±0,008
1,5	0,99±0,002	0,41±0,001	0,57±0,001
3,0	0,97±0,001	0,27±0,001	0,56±0,001
6,0	0,78±0,004	0,30±0,002	0,45±0,001
9,0	0,70±0,001	0,31±0,001	0,61±0,001

Опрыскивание листьев гексаном по сравнению с пентаном обусловило менее резкое снижение концентрации пигментов как через 1 сутки, так и через 3 суток после обработки (в 1,21 – 1,77 раза через 1 сутки; в 1,41 – 2,02 раза через 3 сутки).

**Таблица 3 – Концентрация фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в условиях эксперимента после обработки бензолом**

Количество бензола, мкг (на 0,5 л воды)	Концентрация фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
через 1 сутки после обработки			
контроль	1,23±0,004	0,39±0,001	0,74±0,001
0,05	1,05±0,003	0,26±0,002	0,41±0,012
2,5	1,05±0,001	0,33±0,001	0,62±0,001
5,0	0,89±0,001	0,31±0,001	0,55±0,001
10,0	0,79±0,003	0,36±0,001	0,55±0,001
15,0	0,58±0,001	0,34±0,002	0,44±0,001
через 3 суток после обработки			
контроль	1,42±0,013	0,53±0,005	0,85±0,007
0,05	1,19±0,002	0,41±0,002	0,72±0,001
2,5	0,94±0,001	0,37±0,001	0,56±0,001
5,0	0,80±0,001	0,37±0,003	0,53±0,002
10,0	0,73±0,005	0,67±0,004	0,73±0,001
15,0	0,55±0,001	0,59±0,001	0,60±0,001

Результатом влияния бензола явилось наиболее резкое снижение концентрации хлорофилла *a* во время всего эксперимента и минимальное – хлорофилла *b* через 3 суток после введения бензола. Бенз(а)пирен оказывает наиболее разрушительное влияние на концентрацию пигментов фотосинтеза через 3 суток после обработки (снижение в 2,23 – 2,39 раза по сравнению с контролем) и в большей степени влияет аналогично бензолу на хлорофилла *a* во время всего эксперимента.

**Таблица 4 – Концентрация фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в условиях эксперимента после обработки без(а)пиреном**

Количество без(а)пирена, нг (на 0,5 л воды)	Концентрация фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
1	2	3	4
через 1 сутки после обработки			
контроль	1,23±0,004	0,39±0,001	0,74±0,001
0,0025	1,0±0,003	0,38±0,001	0,62±0,002

Окончание таблицы 4

1	2	3	4
0,125	0,99±0,002	0,34±0,001	0,44±0,001
0,250	0,97±0,005	0,32±0,001	0,51±0,002
0,500	0,94±0,004	0,36±0,001	0,59±0,002
0,750	0,61±0,001	0,26±0,001	0,37±0,001
через 3 суток после обработки			
контроль	1,42±0,013	0,53±0,005	0,85±0,007
0,0025	1,10±0,001	0,38±0,001	0,63±0,002
0,125	0,86±0,001	0,30±0,001	0,50±0,001
0,250	0,82±0,002	0,31±0,001	0,52±0,002
0,500	0,69±0,001	0,29±0,001	0,43±0,001
0,750	0,59±0,001	0,24±0,001	0,36±0,001

Следует отметить, что для гексана и бензола через 1 сутки после обработки характерен рост концентрации каротиноидов в экспериментальных пробах в направлении к наибольшей дозе вводимого соединения, а для бензола через 3 суток после обработки – увеличение концентрации хлорофилла *b*.

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

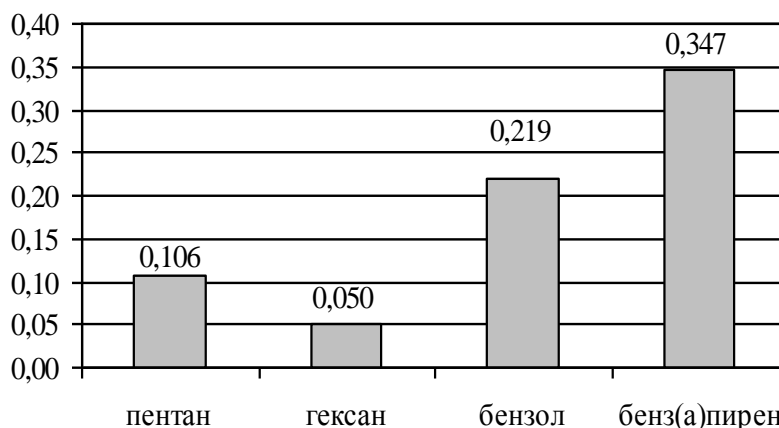
Результаты анализа дисперсионных комплексов, включающих концентрацию хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов проб экспериментальных и контрольных растений через 1 и 3 суток после обработки, свидетельствуют о том, что значение *F*-критерия превышают *F*-критическое для всех исследованных образцов во всех случаях ( $F_{\text{фактич.}} = 4,48 - 86,32$ ;  $F_{\text{критич.}}(5, 18) = 2,77$  при  $p \leq 0,05$ ). Таким образом, концентрация пигментов фотосинтеза овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* статистически достоверно различается при действии углеводов в эксперименте и контроле.

Сравнение дисперсий концентраций пигментов через 1 и 3 суток в эксперименте позволило установить достоверность их различий с течением времени действия обработки.

Результаты дисперсионного анализа комплексов, состоящих из концентрации пигмента при каждой вводимой дозе углеводорода через 1 и 3 суток после обработки и контроля, свидетельствуют о наличии следующих недостоверных различий между контролем и экспериментальной пробой: через 1 сутки – при обработке 0,05 мкг бензола (каротиноиды); 15,0 мкг бензола (хлорофилл *b*); 0,0025 и 0,500 нг бенз(а)пирена (хлорофилл *b*); через 3 суток – 0,05 мкг бензола (все пигменты); 10,0 мкг бензола (хлорофилл *b* и каротиноиды); 15,0 мкг бензола (хлорофилл *b*); 2,5 мг пентана (хлорофилл *a* и каротиноиды); 5,0 мг пентана (хлорофилл *a* и *b*); 0,03 мг гексана (все пигменты); 1,5 мг гексана (хлорофилл *b*); 0,0025 нг бенз(а)пирена (хлорофилл *a*). Таким образом, недостоверные отличия между контролем и экспериментом в большем количестве характерны для введения бензола, чаще наблюдаются для хлорофилла *b* и через 3 суток после обработки.

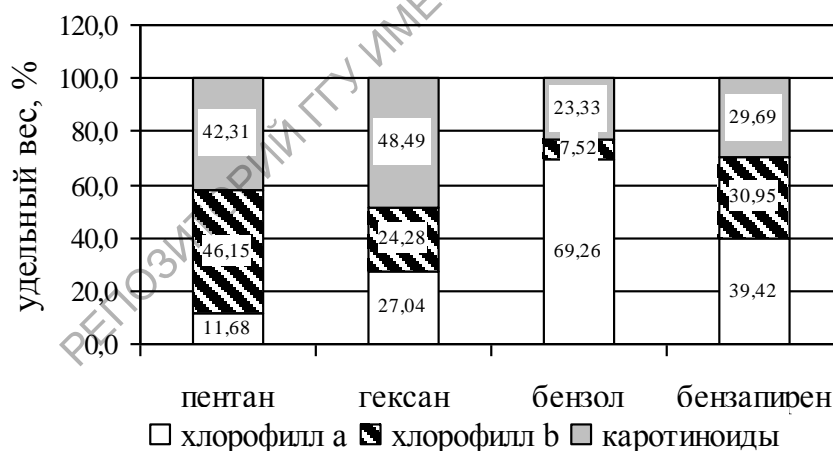
С учетом общей количественной оценки влияния используемых предельных и ароматических углеводов на концентрацию пигментов фотосинтеза овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* получено, что наибольшее различие между контрольными и экспериментальными пробами в концентрации пигментов наблюдается после обработки бенз(а)пиреном; среди используемых предельных углеводов пентан отличается более высоким отрицательным влиянием по сравнению с гексаном; бензол как ароматический углеводород занимает промежуточное положение и характеризуется более

интенсивным воздействием, чем предельные углеводороды, и более слабым влиянием по сравнению с полициклическим ароматическим бенз(а)пиреном (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Величина количественных изменений концентрации пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в условиях эксперимента по сравнению с контрольным значением**

Что касается отдельных пигментов, то обработка бензолом и бенз(а)пиреном оказала наибольшее влияние на снижение концентрации хлорофилла *a*; пентаном – хлорофилла *b*; гексаном – каротиноидов (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Удельный вес изменений концентрации фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* в общей величине изменений в условиях эксперимента по сравнению с контрольным значением**

**Закключение.** Пентан отличается более высоким отрицательным влиянием на концентрацию пигментов фотосинтеза по сравнению с гексаном; бензол как ароматический углеводород характеризуется более интенсивным воздействием, чем предельные углеводороды, и более слабым влиянием по сравнению с полициклическим бенз(а)пиреном. Бенз(а)пирен оказывает наиболее разрушительное влияние на концентрацию пигментов фотосинтеза через 3 суток после обработки и в большей степени влияет аналогично бензолу на хлорофилла *a* во время всего эксперимента.

## Список литературы

- 1 Охрана окружающей среды: статистический сборник. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2018. – 228 с.
- 2 Ланкин, А.В. Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат: автореф. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / А.В. Ланкин; Ин-т физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН. – Москва, 2016. – 22 с.
- 3 Чикидова, А.Л. Полициклические ароматические углеводороды в экосистемах г. Москвы (на примере Восточного административного округа): дисс. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / А.Л. Чикидова; МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва, 2017. – 141 с.
- 4 Постановление Министерства здравоохранения РБ от 8.11.2016 № 113.