

Е. Г. Тюлькова¹, Л. Ф. Кабашникова²

¹Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Республика Беларусь
²Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПЕРЕКИСНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ЛИПИДОВ ОВСЯНИЦЫ ТРОСТНИКОВОЙ *FESTUCA ARUNDINACEA* SCHREB.

Аннотация. В статье представлены результаты определения активности перекисного окисления липидов (ПОЛ) биологических мембран в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. при обработке листовых пластинок различными летучими органическими соединениями (пентаном, гексаном, бензолом, *o*-ксилолом, бенз(а)-пиреном, бутилацетатом) и их смесями.

С учетом динамики содержания малонового диальдегида, стабильного продукта ПОЛ, установлено, что влияние бензола, *o*-ксилола, бутилацетата и всех смесей вызывает более значительное усиление ПОЛ через 1 сут после обработки, чем после 3 сут эксперимента. При этом *o*-ксилол и смесь пентана, гексана и бенз(а)пирена оказывали наиболее интенсивное действие на процессы ПОЛ по сравнению с другими соединениями. Через 3 сут количество малонового диальдегида изменялось более интенсивно по сравнению с 1-ми сутками после обработки пентаном, гексаном и бенз(а)пиреном, причем пентан и гексан вызывали более выраженные изменения по сравнению с бенз(а)пиреном.

Ключевые слова: перекисное окисление липидов, малоновый диальдегид, овсяница тростниковая *Festuca arundinacea* Schreb., пентан, гексан, бензол, *o*-ксилол, бенз(а)пирен, бутилацетат

Для цитирования: Тюлькова, Е. Г. Влияние летучих органических соединений на перекисное окисление липидов овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. / Е. Г. Тюлькова, Л. Ф. Кабашникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 411–419. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-4-411-419>

E. G. Tulkova¹, L. F. Kabashnikova²

¹Belarussian Trade and Economic University of Consumer Cooperation, Gomel, Republic of Belarus
²Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

EFFECT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS ON *FESTUCA ARUNDINACEA* SCHREB. LIPID PEROXIDATION

Abstract. The article presents the results of determining the activity of lipid peroxidation (LPO) in biological membranes of the reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb. plants in an experiment on the processing of leaf blades with different amounts of volatile organic compounds (pentane, hexane, benzene, *o*-xylol, benz(a)pyrene, butylacetate and their mixtures).

Taking into account the dynamics of the content of malonic dialdehyde – of a stable product of LPO, it was established during the experiment that the effect of benzene, *o*-xylol, butyl acetate and all mixtures caused a more significant increase LPO in 1 day after treatment compared to 3 days of the experiment. At the same time, *o*-xylene and a mixture of pentane, hexane, and benz(a)pyrene exerted the most intense effect on the processes of LPO in comparison with other compounds.

After 3 days, the amount of malonic dialdehyde changed more intensively compared to 1 day after treatment with pentane, hexane and benz(a)pyrene, and pentane and hexane caused more pronounced differences compared to benz(a)pyrene.

Keywords: lipid peroxidation, malonic dialdehyde, reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb., pentane, hexane, benzene, *o*-xylol, benz(a)pyrene, butylacetate

For citation: Tulkova E. G., Kabashnikova L. F. Effect of volatile organic compounds on *Festuca arundinacea* Schreb. lipid peroxidation. *Vesti Natsyuanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 411–419 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-4-411-419>

Введение. За последние годы в Республике Беларусь на фоне снижения общего объема выбросов загрязняющих веществ наблюдается рост количества выбросов в атмосферу от стационарных источников – от 371,1 тыс. т в 2011 г. до 453,4 тыс. т в 2017 г. [1]. При этом в результате

функционирования отдельных промышленных предприятий в атмосферу поступают летучие органические соединения, удельный вес которых в общем объеме выбросов загрязняющих веществ по предприятию является наибольшим и которые способны оказывать определенное влияние на рост и развитие растительных организмов. Такую группу веществ составляют алканы, циклоалканы, непредельные и ароматические углеводороды, спирты, сложные эфиры. Одним из критериев адаптации растений к действию летучих органических соединений может служить интенсивность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) как результат соотношения деструктивных окислительных процессов и активности антиоксидантной защиты растений. В настоящее время имеются данные о влиянии тяжелых металлов [2], автотранспортного загрязнения [3], оксидов азота, серы, углерода, взвешенных веществ [4–6], температурного воздействия на накопление продуктов ПОЛ в растениях [7]. При этом наличие небольшого количества данных о влиянии летучих органических токсикантов на показатели ПОЛ растений вызывает интерес к изучению дозовых зависимостей между содержанием малонового диальдегида и количеством таких соединений.

Цель исследования – сравнительное изучение влияния различных доз летучих органических соединений на содержание малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в заданных условиях эксперимента.

Материалы и методы исследования. Выбор овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в качестве исследуемого объекта в экспериментальных условиях обусловлен широкой распространенностью растения в городских условиях. Использование пентана, гексана, бензола, *o*-ксилола, бутилацетата обусловлено преобладающим количеством группы летучих органических соединений, представителями которой являются данные вещества, в выбросах отдельных промышленных предприятий г. Гомеля (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей») по сравнению с другими загрязняющими веществами. Что касается бенз(а)пирена, 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 характера и закономерностей влияния на процессы ПОЛ в листьях растений и возможностью проведения сравнительной оценки влияния полициклического ароматического углеводорода и одноядерных ароматических углеводородов (бензола, *o*-ксилола) на растительные организмы.

Листовые пластинки овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. обрабатывали водными растворами углеводородов. Используемые дозы углеводородов рассчитывали исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ [8]. В соответствии с нормативами ПДК пентана в атмосферном воздухе составляет 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 [8].

Контролем служили необработанные растения овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. Экспериментальными считали 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 *o*-ксилола, 0,000005–0,0015 нг/мл бенз(а)пирена, 0,0001–0,03 мкг/мл бутилацетата (бутилового эфира уксусной кислоты).

Всего в процессе эксперимента было использовано 5 различных доз вводимых соединений, что численно соответствовало 1, 50, 10, 200 и 300 ПДК пентана, гексана, бензола, *o*-ксилола, бенз(а)пирена и бутилацетата в атмосферном воздухе.

Для выявления возможных эффектов совместного воздействия исследуемых соединений использовали смеси следующих концентраций: 0,01 мкг/мл бутилацетата + 0,02 мкг/мл *o*-ксилола; 0,02 мкг/мл бутилацетата + 0,04 мкг/мл *o*-ксилола; 0,01 мкг/мл бензола + 0,02 мкг/мл *o*-ксилола; 0,02 мкг/мл бензола + 0,04 мкг/мл *o*-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.

Обработку листовых пластинок овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. осуществляли путем опрыскивания водными растворами (по 50 мл водного раствора каждой дозы вводимого соединения).

Актыўнасць ПОЛ ацэнівалі па колькасці малонавога дыальдегіда в рэзультате цветной реакцыі с тибарбітуровай кіслотой. Сoderжання малонавога дыальдегіда адредэлялі с пoмoщью спектрофотометра Shimadzu UV-2401 PC (Shimadzu, Японія) в максимуме поглощения при длине волны 532 нм и вычисляли как величину оптической плотности ($\lambda = 532\text{--}630$ нм), умноженную на коэффициент молярной экстинкции 21,285.

Достоверность различий между содержанием малонавого дыальдегіда в экспериментальных и контрольных пробах ацэнівалі с пoмoщью дисперсионного анализа. Математическую обработку цифрового материала выполняли с пoмoщью программ M. Excel и Statistica.

С целью проведения сравнительной количественной оценки изменения содержания малонавого дыальдегіда в условиях эксперимента проводили вычисления разницы между средними значениями содержания малонавого дыальдегіда в начале и в конце исследования при обработке образцов каждым из используемых соединений.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения содержания малонавого дыальдегіда в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента по обработке углеводородами и их смесями представлены в табл. 1–7.

Данные табл. 1–7 свидетельствуют о том, что обработка пентаном, гексаном, бензолом, *o*-ксилолом, бенз(а)пиреном, бутилацетатом и их смесями является причиной увеличения содержания малонавого дыальдегіда в экспериментальных образцах по сравнению с контрольными пробами практически при всех использованных дозах внесения. При этом обработка листовых пластинок овсяницы предельными углеводородами приводила к росту содержания малонавого дыальдегіда в случае воздействия максимальной дозой пентана (0,03 мг/мл) в 5,87 раза по сравнению с контрольными пробами через 1 сут и в 7,69 раза – через 3 сут; обработка минимальной дозой пентана (0,0001 мг/мл) приводила к увеличению исследуемого показателя в 3,07 раза через 1 сут эксперимента и в 6,54 раза – через 3 сут (см. табл. 1).

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что опрыскивание листовых пластинок овсяницы максимальной дозой гексана (0,018 мг/мл) обусловило менее резкое, чем при опрыскивании пентаном, увеличение содержания малонавого дыальдегіда по сравнению с контролем: в 4,01 раза через 1 сут после обработки и в 7,25 раза – через 3 сут.

При воздействии минимальной дозы гексана (0,00006 мг/мл) не отмечалось увеличения содержания малонавого дыальдегіда, которое через 1 и 3 сут было ниже, чем в контроле. В связи с этим предположение о том, что влияние органических загрязнителей обязательно должно вызывать усиление процессов ПОЛ в биологических мембранах растений, не подтвердилось.

Таблица 1. Содержание малонавого дыальдегіда в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки пентаном

Table 1. Malondialdehyde content in cane fescue plants *Festuca arundinacea* Schreb. under experimental conditions after treatment with pentane

Концентрация раствора пентана, мг/мл	Содержание малонавого дыальдегіда, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,0001	4,16±0,01*	7,89±0,12*
0,005	6,86±0,01*	7,08±0,01*
0,01	7,27±0,06*	7,58±0,01*
0,02	6,76±0,10*	8,91±0,06*
0,03	7,96±0,03*	9,28±0,04*

Примечание. * – достоверные различия в содержании малонавого дыальдегіда при $p \leq 0,05$. То же в табл. 2–7.

Таблица 2. Содержание малонавого дыальдегіда в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки гексаном

Table 2. Malondialdehyde content in cane fescue plants *Festuca arundinacea* Schreb. under experimental conditions after treatment with hexane

Концентрация раствора гексана, мг/мл	Содержание малонавого дыальдегіда, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,00006	1,22±0,01	1,17±0,01
0,003	2,99±0,06*	3,60±0,03*
0,006	3,02±0,01*	4,77±0,07*
0,012	3,55±0,01*	6,0±0,04*
0,018	5,43±0,02*	8,74±0,03*

В целом, предельные углеводороды в обоих случаях вызывали увеличение содержания малонового диальдегида в большей степени через 3 сут эксперимента по сравнению с 1-ми сутками после обработки, причем воздействие пентана через 3 сут как в минимальной, так и в максимальной дозе вызывало резкий рост величины изучаемого показателя.

Ароматические углеводороды, аналогично алканам, судя по накоплению стабильных продуктов этого процесса, также в различной степени влияли на интенсивность ПОЛ (табл. 3–5).

Обработка листовых пластинок бензолом привела к росту содержания малонового диальдегида при максимальной дозе воздействия (0,03 мкг/мл) в 2,94 раза через 1 сут по сравнению с контролем и в 2,46 – через 3 сут, при минимальной дозе (0,0001 мкг/мл) – в 1,71 раза через 1 сут и не вызвала изменения данного показателя через 3 сут, т. е. влияние бензола проявлялось в большей степени через 1 сут после обработки (см. табл. 3). Воздействие *o*-ксилола также вызывало более интенсивное накопление малонового диальдегида через 1 сут после опрыскивания, однако проявлялось более интенсивно как в максимальной, так и в минимальной дозе внесения по сравнению с бензолом (табл. 4).

Данные табл. 4 свидетельствуют о том, что максимальная доза воздействия *o*-ксилола (0,06 мкг/мл) приводила к увеличению содержания малонового диальдегида в 4,98 раза через 1 сут эксперимента и в 4,63 раза – через 3 сут по сравнению с контролем; минимальная – в 4,25 и 1,66 раза через 1 и 3 сут соответственно. Таким образом, аналогично действию пентана, через 3 сут влияние *o*-ксилола через 1 сут после обработки мало различалось при воздействии минимальной и максимальной доз.

Таблица 3. Содержание малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки бензолом

Table 3. Malondialdehyde content in cane fescue plants *Festuca arundinacea* Schreb. under experimental conditions after treatment with benzene

Концентрация раствора бензола, мкг/мл	Содержание малонового диальдегида, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,0001	2,31±0,03*	1,20±0,01
0,005	2,80±0,01*	1,61±0,02*
0,01	3,79±0,01*	2,41±0,01*
0,02	2,72±0,03*	2,33±0,01*
0,03	3,98±0,02*	2,97±0,01*

Таблица 5. Содержание малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Table 5. Malondialdehyde content in cane fescue plants *Festuca arundinacea* Schreb. under experimental conditions after treatment with benz(a)pyrene

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Содержание малонового диальдегида, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,000005	4,64±0,06*	6,92±0,05*
0,00025	4,86±0,04*	8,73±0,09*
0,0005	10,42±0,11*	9,61±0,06*
0,001	10,69±0,02*	9,65±0,09*
0,0015	11,17±0,01*	9,70±0,05*

Таблица 4. Содержание малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки *o*-ксилолом

Table 4. Content of malondialdehyde in plants reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb. under experimental conditions after treatment with *o*-xylol

Концентрация раствора <i>o</i> -ксилола, мкг/мл	Содержание малонового диальдегида, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,0002	5,75±0,01*	2,0±0,02*
0,01	5,80±0,02*	2,59±0,06*
0,02	6,03±0,01*	3,09±0,05*
0,04	6,26±0,01*	4,86±0,02*
0,06	6,75±0,01*	5,58±0,17*

Таблица 6. Содержание малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки бутилацетатом

Table 6. Content of malondialdehyde in plants reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb. in an experiment after treatment with butyl acetate

Концентрация раствора бутилацетата, мкг/мл	Содержание малонового диальдегида, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,0001	5,66±0,03*	4,77±0,01*
0,005	6,87±0,03*	6,80±0,01*
0,01	7,17±0,01*	7,48±0,05*
0,02	8,89±0,02*	9,48±0,02*
0,03	12,43±0,02*	11,49±0,07*

Бенз(а)пирен, представитель полициклических ароматических углеводородов, характеризуется более высокой токсичностью по сравнению с бензолом и *o*-ксилолом, что послужило причиной накопления малонового диальдегида в большем количестве (табл. 5), особенно после обработки максимальной дозой (0,0015 нг/мл).

Так, через 1 сут эксперимента содержание малонового диальдегида при воздействии 0,0015 нг/мл бенз(а)пирена увеличилось по сравнению с контролем в 8,25 раза, через 3 сут – в 8,04 раза, т. е. интенсивность процессов ПОЛ в биологических мембранах листьев овсяницы оказалась практически стабильной. Минимальная доза воздействия (0,000005 нг/мл) приводила к росту содержания малонового диальдегида в 3,42 раза через 1 сут после обработки и в 5,74 раза – через 3 сут, что свидетельствует об усилении эффекта бенз(а)пирена в конце эксперимента.

Бутилацетат наряду с этилацетатом всегда присутствует в выбросах отдельных промышленных предприятий, однако в последние годы вследствие некоторых изменений в технологическом процессе наблюдается довольно значительный рост объема выбросов бутилацетата в атмосферу. В нашем эксперименте обработка бутилацетатом листовых пластинок овсяницы приводила к росту содержания малонового диальдегида при максимальной дозе воздействия (0,03 мкг/мл) в 9,17 раза через 1 сут и в 9,53 раза – через 3 сут, что отражает максимальный рост количества малонового диальдегида в условиях всего эксперимента (табл. 6).

Минимальная доза воздействия (0,0001 мкг/мл) вызывала рост содержания малонового диальдегида в 4,18 раза через 1 сут, а через 3 сут после обработки – в 3,95 раза, т. е. была почти в 2 раза ниже по сравнению с максимальной дозой воздействия.

Следует отметить, что в условиях эксперимента бензол и бутилацетат использовались в одинаковых дозах вследствие одинаковых ПДК в атмосферном воздухе. Однако воздействие бутилацетата приводило к более интенсивному развитию процессов ПОЛ в листьях овсяницы, судя по более высокому накоплению малонового диальдегида. Кроме того, в отличие от других использованных соединений, обработка максимальными дозами пентана и гексана вызывала наиболее выраженные различия между содержанием малонового диальдегида через 1 и 3 сут эксперимента и увеличивала активность ПОЛ к 3-м суткам. Минимальные дозы внесения приводили к наиболее заметным различиям между 1-ми и 3-ми суткам после воздействия *o*-ксилолом и пентаном, при этом влияние *o*-ксилола явилось причиной более высокого увеличения содержания малонового диальдегида через 1 сут, а пентана – через 3 сут после обработки.

Результаты кластерного анализа содержания малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. за период эксперимента представлены на рис. 1 (двухвходовый кластерный анализ) и рис. 2 (кластерный анализ методом иерархической классификации).

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что через 1 сут накопление повышенного количества малонового диальдегида в условиях эксперимента является результатом влияния бутилацетата

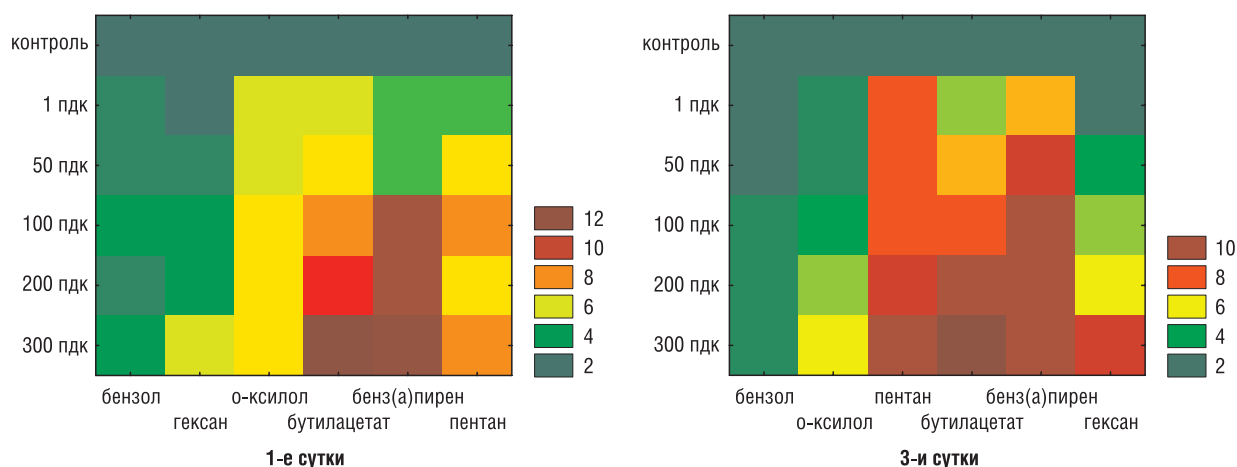


Рис. 1. Результаты кластерного анализа содержания малонового диальдегида (нмоль/мг сырой массы) в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.

Fig. 1. Results of the cluster analysis of the content of malondialdehyde (nmol / mg wet weight) in cane fescue plants *Festuca arundinacea* Schreb.

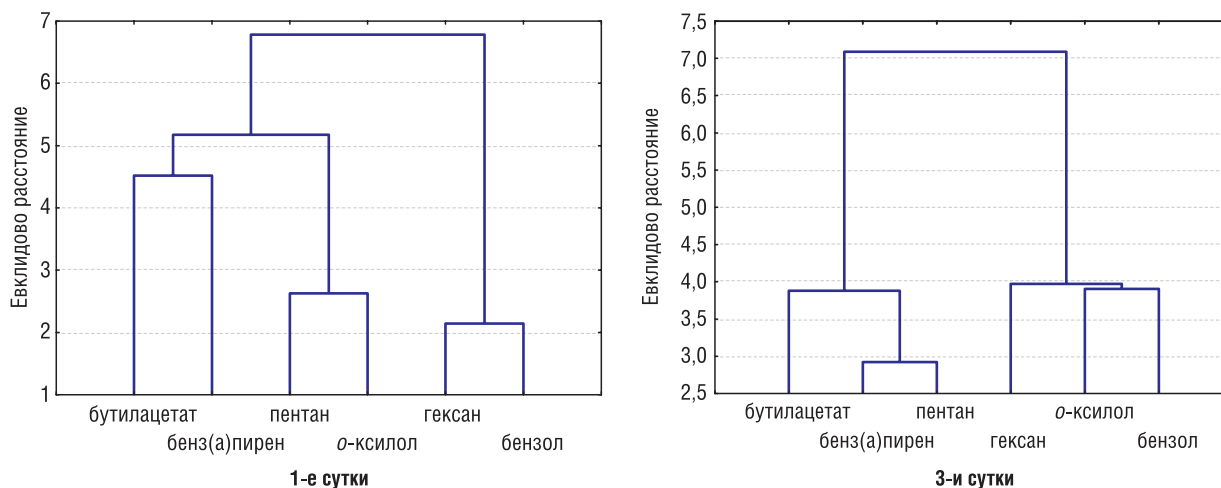


Рис. 2. Дендрограммы кластерного анализа содержания малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb.

Fig. 2. Dendrograms of cluster analysis of malondialdehyde content in cane fescue plants *Festuca arundinacea* Schreb.

и бенз(а)пирена, тогда как интенсивность процессов ПОЛ через 3 сут эксперимента повышается в случае обработки пентаном, бутилацетатом, бенз(а)пиреном и гексаном. Кроме того, через 1 сут эксперимента все использованные соединения с учетом интенсивности их влияния на растения овсяницы можно распределить на три кластера в порядке снижения степени воздействия: 1) бутилацетат и бенз(а)пирен; 2) пентан и *o*-ксилол; 3) гексан и бензол. Через 3 сут после обработки наблюдались изменения в группировании вводимых соединений и образование двух кластеров: 1) бутилацетат, бенз(а)пирен и пентан; 2) гексан, *o*-ксилол и бензол. Представители первого кластера вызвали более интенсивное окисление липидов биологических мембран и накопление малонового диальдегида, представители второго – менее интенсивное.

Известно, что выбросы промышленных предприятий характеризуются наличием не одного техногенного элемента или соединения, а целого их спектра, иногда довольно значительно. Поэтому техногенные элементы и их соединения могут оказывать воздействие на растения в виде различных смесей.

Для оценки влияния смесей летучих органических соединений на интенсивность развития процессов ПОЛ проведен эксперимент по совместному воздействию на листовые пластинки овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. 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 эксперимента показали, что все используемые смеси способны вызывать более интенсивные процессы ПОЛ через 1 сут после обработки (табл. 7).

При совместной обработке листовых пластинок растений овсяницы пентаном и гексаном содержание малонового диальдегида увеличивалось только через 1 сут после обработки (в отличие от раздельного воздействия этих соединений); пентан с гексаном, напротив, способны были снижать действие бенз(а)пирена по сравнению с одиночным влиянием этого соединения, а бенз(а)пирен – усиливать воздействие пентана и гексана на активность ПОЛ только через 1 сут после обработки. Бутилацетат и *o*-ксилол усиливали действие друг друга во всех использованных дозах через 1 сут; кроме того, бутилацетат увеличивал эффект воздействия *o*-ксилола через 3 сут после введения, тогда как *o*-ксилол через 3 сут эксперимента снижал действие бутилацетата на накопление малонового диальдегида. Ксилол усиливал воздействие бензола в течение всего времени эксперимента; бензол проявлял себя в качестве синергиста по отношению к *o*-ксилолу через 1 сут после обработки максимальной дозой и через 3 сут – во всех экспериментальных дозах.

Достоверность различий между содержанием малонового диальдегида в листовых пластинках экспериментальных и контрольных растений овсяницы тростниковой оценивали с помощью дисперсионного анализа.

Сравнение комплексов дисперсий содержания малонового диальдегида через 1 и 3 сут в эксперименте позволило установить достоверность их различий после обработки без учета контрольных проб ($F_{\text{факт}} = 5,57-104,76$; $F_{\text{крит}}(4, 35) = 2,64$ при $p \leq 0,05$ при обработке соединениями по одному; $F_{\text{факт}} = 29,56-92,05$; $F_{\text{крит}}(1, 14) = 4,60$ при $p \leq 0,05$ при обработке соединениями в смеси). Исключение составило содержание малонового диальдегида после обработки смесью бензола и *o*-ксилола. Это свидетельствует о том, что изменение содержания малонового диальдегида, вызванное влиянием такой смеси, незначительно в течение 1–3 сут эксперимента и носит недостоверный характер. В остальных случаях воздействие использованных соединений по одному и в смесях достоверно проявлялось и различалось на протяжении 1 и 3 сут после обработки.

Результаты дисперсионного анализа комплексов, состоящих из малонового диальдегида, при каждой вводимой дозе углеводорода через 1 и 3 сут после обработки и контроля, свидетельствуют о том, что значение *F*-критерия превышает величину *F* критического для всех исследованных образцов во всех случаях после обработки одиночными соединениями и смесями ($F_{\text{факт}} = 6,31-989,25$; $F_{\text{крит}}(1, 6) = 5,98$ при $p \leq 0,05$ при обработке соединениями по одному; $F_{\text{факт}} = 22,59-2093,56$; $F_{\text{крит}}(1, 6) = 5,98$

Таблица 7. Содержание малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента после обработки смесями исследуемых соединений

Table 7. Content of malondialdehyde in plants of reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb. under experimental conditions after treatment with mixtures of the studied compounds

Вариант опыта	Содержание малонового диальдегида, нмоль/мг сырой массы	
	через 1 сут	через 3 сут
<i>Смесь бутилацетат + о-ксилол</i>		
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,01 мкг/мл + 0,02 мкг/мл	9,24±0,04*	6,89±0,01*
0,02 мкг/мл + 0,04 мкг/мл	10,16±0,01*	7,26±0,04*
<i>Смесь бензол + о-ксилол</i>		
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,01 мкг/мл + 0,02 мкг/мл	5,84±0,01*	3,13±0,01*
0,02 мкг/мл + 0,04 мкг/мл	7,51±0,06*	5,96±0,18*
<i>Смесь пентан + гексан</i>		
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,01 мг/мл + 0,006 мг/мл	7,30±0,05*	4,25±0,05*
0,02 мг/мл + 0,012 мг/мл	7,73±0,04*	4,73±0,05*
<i>Смесь пентан + гексан + бенз(а)пирен</i>		
Контроль	1,36±0,01	1,21±0,02
0,01 мг/мл + 0,006 мг/мл + 0,0005 нг/мл	7,96±0,01*	3,41±0,01*
0,02 мг/мл + 0,012 мг/мл + 0,001 нг/мл	9,54±0,01*	5,97±0,05*

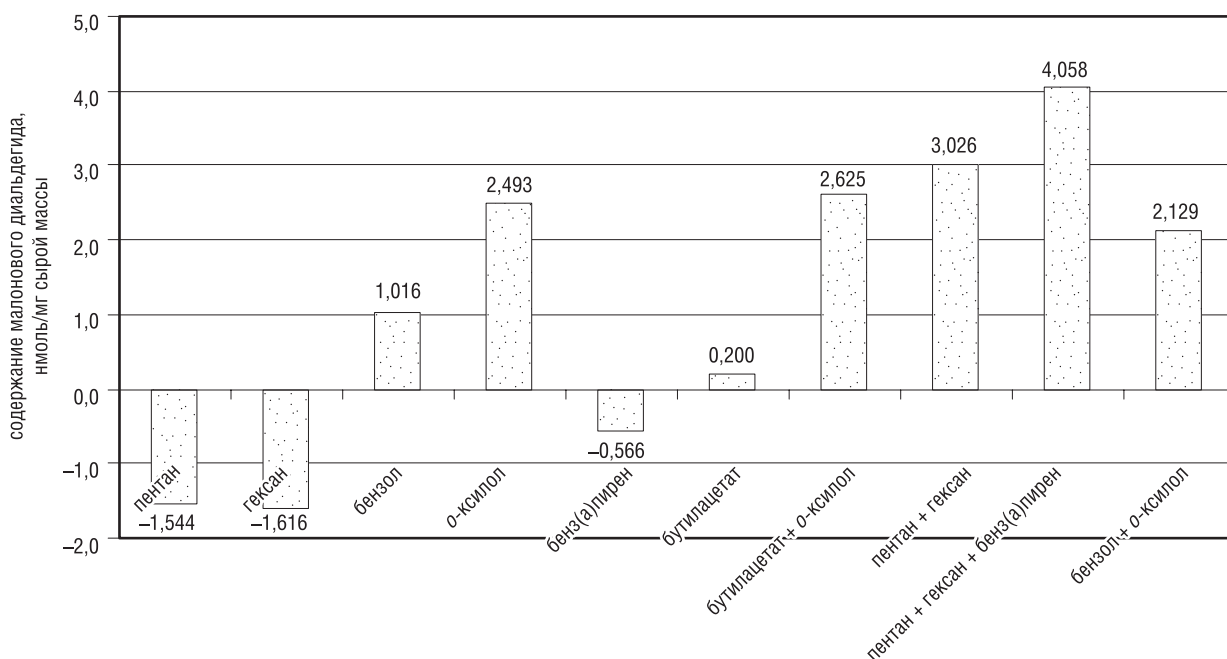


Рис. 3. Изменение содержания малонового диальдегида в растениях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в условиях эксперимента

Fig. 3. Change in malondialdehyde content in plants reed fescue *Festuca arundinacea* Schreb. in an experiment

при $p \leq 0,05$ при обработке соединениями в смеси). Исключение составили следующие недостоверные различия между контролем и экспериментальной пробой: через 1 сут – при обработке раствором гексана в концентрации 0,00 006 мг/мл; через 3 сут – при обработке раствором бензола в дозе 0,0001 мкг/мл и раствором гексана в концентрации 0,00 006 мг/мл. В случае использования смесей в эксперименте недостоверные различия не выявлены.

С учетом общей количественной оценки влияния использованных предельных ароматических углеводородов и сложного эфира на содержание малонового диальдегида в листьях овсяницы установлено, что через 3 сут после обработки пентаном, гексаном и бенз(а)пиреном содержание изучаемого показателя изменялось более интенсивно, чем в 1-е сутки, причем пентан и гексан вызывали более выраженные различия по сравнению с бенз(а)пиреном (рис. 3).

Влияние бензола, *o*-ксилола, бутилацетата и всех смесей вызывало более значительное усиление ПОЛ через 1 сут после обработки, чем после 3 сут эксперимента. При этом через 1 сут *o*-ксилол и смесь пентана, гексана и бенз(а)пирена влияли более интенсивно на процессы ПОЛ по сравнению с другими соединениями.

Закключение. Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок растений овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. летучими углеводородами и их смесями свидетельствуют о том, что обработка пентаном, гексаном, бензолом, *o*-ксилолом, бенз(а)пиреном, бутилацетатом и их смесями является причиной увеличения содержания малонового диальдегида в экспериментальных образцах по сравнению с контрольными пробами практически во всех используемых дозах, что свидетельствует об активации процессов ПОЛ. Исключением явилось воздействие минимальной дозы гексана (0,00 006 мг/мл) в процессе всего эксперимента и бензола (0,0001 мкг/мл) через 3 сут после обработки.

Максимальное увеличение количества малонового диальдегида по сравнению с контролем вызывало действие бутилацетата на протяжении всего эксперимента и смеси бутилацетата с *o*-ксилолом через 1 сут после обработки растений.

С учетом динамики содержания изучаемого показателя установлено, что влияние бензола, *o*-ксилола, бутилацетата и всех смесей вызывало более значительное усиление ПОЛ через 1 сут после обработки, чем после 3 сут эксперимента. При этом *o*-ксилол и смесь пентана, гексана и бенз(а)пирена оказывали наиболее сильное действие на активность ПОЛ по сравнению с другими соединениями. Через 3 сут количество малонового диальдегида изменялось более интенсивно по сравнению с 1-ми сутками после обработки листьев овсяницы пентаном, гексаном и бенз(а)пиреном, причем пентан и гексан вызывали более выраженные эффекты по сравнению с бенз(а)пиреном.

Список использованных источников

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь : стат. сб. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2018. – 227 с.
2. Михайлова, И. Д. Перекисное окисление липидов в растениях огурца и редиса при действии тяжелых металлов / И. Д. Михайлова, А. С. Лукаткин // Изв. Саратов. ун-та. Новая сер. Сер. Химия. Биология. Экология. – 2016. – Т. 16, вып. 2. – С. 206–210.
3. Ерофеева, Е. А. Многолетний сравнительный анализ устойчивости *Betula pendula* (Betulaceae, Fagales) и *Tilia cordata* (Malvaceae, Malvales) к автотранспортному загрязнению / Е. А. Ерофеева, К. В. Шаповалова // Поволж. экол. журн. – 2015. – № 4. – С. 390–399.
4. Неверова, О. А. Оценка интенсивности окислительных процессов у древесных растений в зоне действия промышленных выбросов / О. А. Неверова, О. М. Легощина, А. А. Быков // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 776–779.
5. Перекисное окисление липидов дикорастущих галофитов в условиях Приэльтона / В. Н. Нестеров [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 5. – С. 299–303.
6. Курганова, Л. Н. Перекисное окисление липидов – одна из возможных компонент быстрой реакции на стресс / Л. Н. Курганова // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. Сер. Биология. – 2001. – С. 74–76.
7. Попов, В. Н. Перекисное окисление липидов при низкотемпературной адаптации листьев и корней теплолюбивых растений табака / В. Н. Попов, О. В. Антипина, Т. И. Трунова // Физиология растений. – 2010. – Т. 57, № 1. – С. 153–156.
8. 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 М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 08.11.2016 г., № 113 [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2007. – 8/31467. – Режим доступа : http://pravo.by/upload/docs/op/W21631467p_1485896400.pdf. – Дата доступа : 22.08.2019.

References

1. *Environmental protection in the Republic of Belarus: statistical collection*. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2018. 227 p. (in Russian).
2. Mikhailova I. D., Lukatkin A. S. Lipid peroxidation in cucumber and radish seedlings affected by heavy metals. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya* [Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology], 2016, vol. 16, no. 2, pp. 206–210 (in Russian).
3. Erofeeva E. A., Shapovalova K. V. Long-term comparative analysis of the stability of *Betula pendula* (Betulaceae, Fagales) and *Tilia cordata* (Malvaceae, Malvales) to motor traffic pollution. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal* [Povolzhskii journal of ecology], 2015, no. 4, pp. 390–399 (in Russian).
4. Neverova O. A., Legoshchina O. M., Bykov A. A. Estimation of oxidative processes intensity at wood plants in the operative range of industrial emissions. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences], 2010, vol. 12, no. 1, pp. 776–779 (in Russian).
5. Nesterov V. N., Bogdanova E. S., Tabalenkova G. N., Rozentsvet O. A. Lipid peroxidation of wild-growing halophytes in the conditions of the prieltonye. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences], 2014, vol. 16, no. 5, pp. 299–303 (in Russian).
6. Kurganova L. N. Lipid peroxidation is one of the possible components of a quick response to stress. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo. Seriya Biologiya* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2001, pp. 74–76 (in Russian).
7. Popov V. N., Antipina O. V., Trunova T. I. Lipid peroxidation during low-temperature adaptation of cold-sensitive tobacco leaves and roots. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 144–147. <https://doi.org/10.1134/S102144371>
8. Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus “On the approval and implementation of standards for maximum allowable concentrations of pollutants in the atmospheric air and approximately safe levels of exposure to pollutants in the atmospheric air of settlements and places of mass recreation of the population” of 08.11.2016 No. 113. *National Center of Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: http://pravo.by/upload/docs/op/W21631467p_1485896400.pdf (accessed 22.08.2019) (in Russian).

Информация об авторах

Тюлькова Елена Григорьевна – канд. биол. наук, доцент. Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации (пр-т Октября, 50, 246029, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: tut-3@mail.ru

Кабашникова Людмила Федоровна – член-корреспондент, д-р биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kabashnikova@mail.ru

Information about the authors

Elena G. Tulkova – Ph. D. (Biol.), Assistant Professor. Belarusian Trade and Economic University of Consumer Cooperation (50, Oktyabr Ave., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: tut-3@mail.ru

Lyudmila F. Kabashnikova – Corresponding Member, D. Sc. (Biol.), Assistant Professor, Head of the Laboratory. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kabashnikova@mail.ru