

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА РАСТЕНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ДЕЙСТВИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Е. Г. Тюлькова¹⁾, Г. Е. Савченко,²⁾ Л. Ф. Кабашникова²⁾

¹⁾ Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, 24600, г. Гомель, Беларусь, tut-3@mail.ru

²⁾ Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, ул. Академическая, 27 220072, г. Минск, Беларусь, gesavchenko@gmail.com

На примере растений овсяницы тростниковой (*Festuca arundinacea* Schreb.) как неперменной составляющей травянистого покрова в городских ландшафтных насаждениях продемонстрирована эффективность исследований совокупности разных параметров фотосинтетического аппарата (содержания и степени деградации хлорофилловых пигментов, активности фотосистемы II и их корреляционных взаимоотношений) в листьях в качестве маркеров стрессового состояния при действии углеводородов техногенного происхождения.

Ключевые слова: овсяница тростниковая; фитольные и бесфитольные формы хлорофилла; скорость выделения и поглощения кислорода; параметры фотосинтетического аппарата.

INFORMATIVENESS OF RESEARCH ON PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF PLANTS WHEN MONITORING EFFECTS OF TECHNOGENIC HYDROCARBONS

E. G. Tyulkova¹⁾, G. E. Savchenko²⁾, L. F. Kabashnikova²⁾

¹⁾ Gomel State Medical University, Lange St. 5, 24600, Gomel, Belarus, tut-3@mail.ru

²⁾ Institute of Biophysics and Cellular Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Akademicheskaya str. 27, 220072, Minsk, Belarus, gesavchenko@gmail.com

Using the example of reed fescue plants (*Festuca arundinacea* Schreb.) as an indispensable component of the herbaceous cover in urban landscape plantings, the effectiveness of studies of a combination of different parameters of the photosynthetic apparatus (the content and degree of degradation of chlorophyll pigments, photosystem II activity and their correlational relationships) in leaves as markers of stress under the action of man-made hydrocarbons has been demonstrated.

Keywords: reed fescue; phytolic and phytoless forms of chlorophyll; rate of oxygen release and absorption; parameters of the photosynthetic apparatus.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-245-250>

Введение Экологическая направленность исследований фотосинтетического аппарата как одной из наиболее отзывчивых на любой стресс систем растительной клетки демонстрирует неослабевающий теоретический и практический интерес. Проблема мониторинга окружающей среды особенно в зонах, прилегающих к предприятиям, требует применения информативных и адекватных методов. Уровень современных знаний в области биохимии и биофизики фотосинтеза позволяет достичь определенных успехов в этой области. Идея настоящей работы связана с исследованием взаимосвязи между содержанием фотодинамически опасных продуктов деградации мембраносвязанных хлорофилловых пигментов, появляющихся при действии токсичных углеводородов техногенного происхождения, и активностью стрессочувствитель-

ной фотосистемы II, а также фотосинтеза и темнового дыхания в листьях овсяницы тростниковой (*Festuca arundinacea* Schreb.).

Объектом исследований служили растения одного из наиболее распространенных в городских условиях представителей многолетних травянистых растений – овсяницы тростниковой (*Festuca arundinacea* Schreb.). В работе использовали распыляемые воздушно-капельным путем водные растворы пентана, гексана, бензола, о-ксилола, бутилацетата и бенз(а)пирена, содержание углеводов в которых было эквивалентно установленным предельно допустимым концентрациям (ПДК) для каждого из них в атмосферном воздухе (1 пдк, 50 пдк, 100 пдк, 200 пдк, 300 пдк) [1]. В случае бутилацетата их диапазон составлял 0,0001 – 0,03 мкг/мл, для о-ксилола 0,0002 – 0,06 мкг/мл, для бенз(а)пирена – от 0,005 до 1,5 нг/л, для пентана – 0,0001 – 0,03 мг/мл, гексана – 0,00006 – 0,018 мг/мл, бензола – 0,0001 – 0,03 мкг/мл. Материал анализировали через одни и трое суток после обработки соответствующими растворами углеводов, контролем служили растения, обработанные дистиллированной водой. Для всех анализов брали идентичные отрезки листа.

В работе проводили разделение фитольных и бесфитольных форм хлорофиллов, основанное на их разной растворимости в гексане при соответствующих значениях pH. Содержание всех пигментов в итоге пересчитывали на сырую массу.

Фотохимическую активность фотосистемы II (ФС II) регистрировали с помощью измерительного комплекса «DUAL-PAM 100» (Heinz Walz, Германия). Для характеристики состояния фотосистемы использовали несколько основных и расчетных параметров PAM-флуориметрии. В адаптированных к свету листьях (актиничный свет 125 мкмоль квантов м⁻²с⁻¹, 635 нм) согласно программе PAM-флуориметра автоматически рассчитывался эффективный квантовый выход ФС II (Y_{II}) (формула 1), характеризующий соотношение числа квантов, используемых в фотохимических превращениях, к общему числу поглощенных, и коэффициенты фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения возбуждения молекул Хл а в антенных комплексах ФС II (формулы 2 и 3):

$$Y_{II} = \frac{F'_m - F}{F'_m}, \quad (1) \quad qP = \frac{F'_m - F}{F'_m - F'_0}, \quad (2) \quad qN = \frac{F_m - F'_m}{F_m - F_0}, \quad (3)$$

где F'_m – максимальный уровень флуоресценции после насыщающего импульса на фоне актиничного освещения, F – выход флуоресценции при сочетанном действии импульса насыщения и актиничного света на стадии равновесного состояния (не менее 4 мин после насыщающей вспышки); F'_0 – уровень флуоресценции, измеряемый при выключении актиничного освещения и быстром повторном окислении акцепторной стороны ФС II с помощью дальнего красного света, возбуждающего только ФС I; F_m – максимальная флуоресценция, инициированная насыщающим светом (10 000 мкмоль квантов м⁻²с⁻¹).

Активность темнового дыхания и фотосинтеза измеряли по скорости поглощения и выделения кислорода, соответственно, с помощью компьютеризированной системы PlantVital® 5030. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали программу Statistica 10.0 (StatSoft).

Результаты исследований и их обсуждение.

Ранее нами было установлено, что при действии на растения углеводов на фоне увеличения содержания малонового диальдегида как маркера оксидативного стресса разрушение хлорофилловых пигментов, содержащих фитол, осуществлялось как путем удаления магния (феофитинизации), так и посредством дефитолизаии.

На рис. 1 показано влияние отдельных углеводов (пентана, бензола и бутилацетата, которые характеризуются различной липофильностью) на содержание мембраносвязанного

пула хлорофилла и бесфитольных хлорофиллидов. Из данных рис. 1 видно, что содержание хлорофиллида при токсикации растёт, а изменение содержания хлорофилла и хлорофиллида имеет противоположную направленность. Несвязанные с мембраной бесфитольные пигменты рассматривают как возможные источники синглетного кислорода в хлоропластах (продукт окислительного стресса).

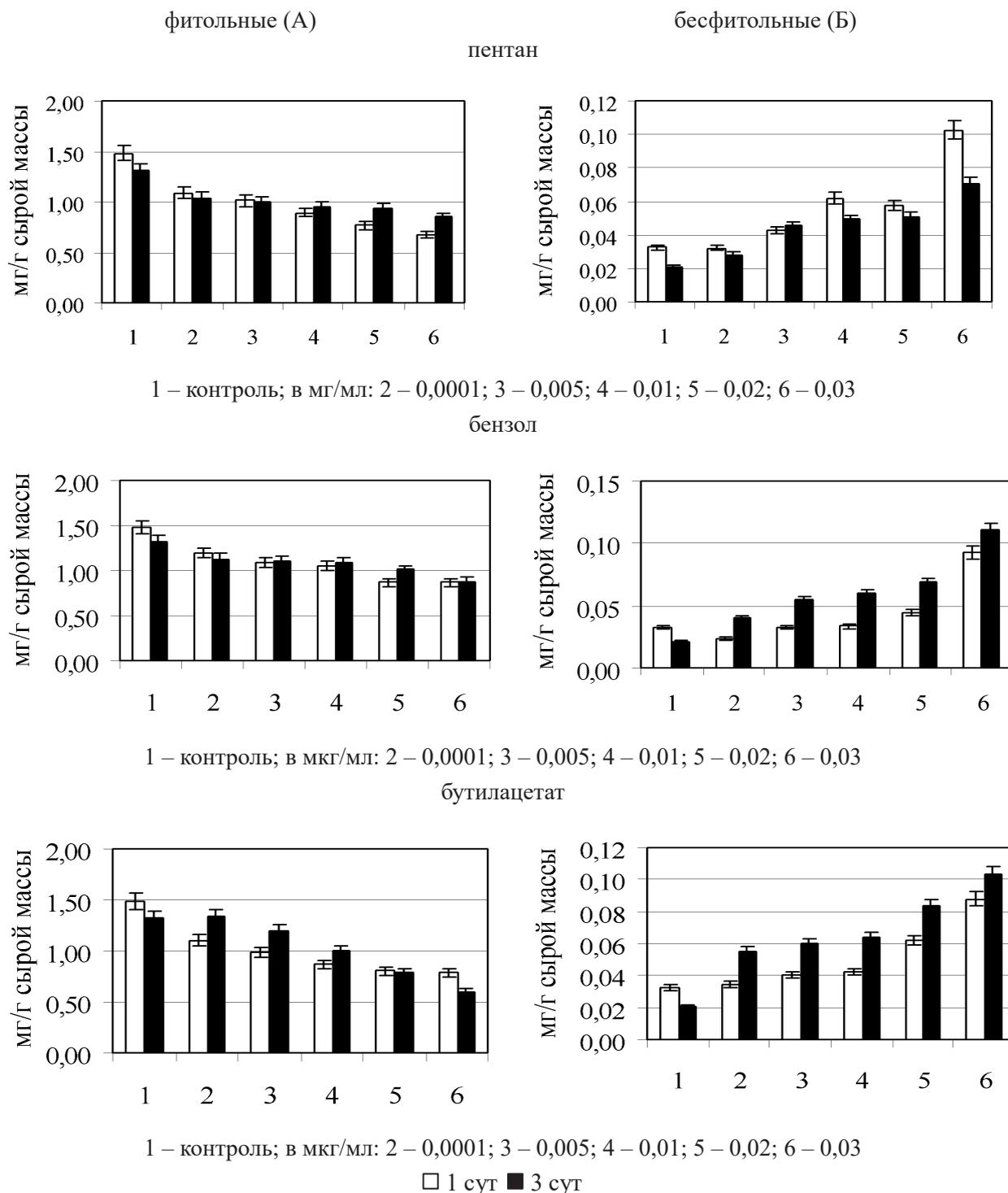


Рис. 1. Влияние летучих органических соединений на содержание фитольных (хлорофилл *a + b*) и бесфитольных (хлорофиллид *a + b*) форм хлорофилловых пигментов в листьях овсяницы тростниковой *F. arundinacea*

С помощью импульсно-модулированной флуоресцентной спектроскопии показано, что при действии токсичных углеводородов на растения под влиянием токсикантов снижался эффективный квантовый выход (Y) и фотохимическое тушение (qP) (на рис. 2 представлены результаты влияния пентана и бутилацетата, наиболее резко отличающихся по величине липофильности).

Уровень тепловой диссипации (нефотохимическое тушение, qN) избыточной энергии, поглощенной молекулами хлорофилла, которую рассматривают как один из механизмов защиты от стресса, при этом увеличивался пропорционально степени разрушения мембраносвязанных хлорофиллов.

Под влиянием токсикантов в пределах исследуемых доз скорость выделения и поглощения кислорода снижалась (табл. 1 на примере пентана, бензола и бутилацетата).

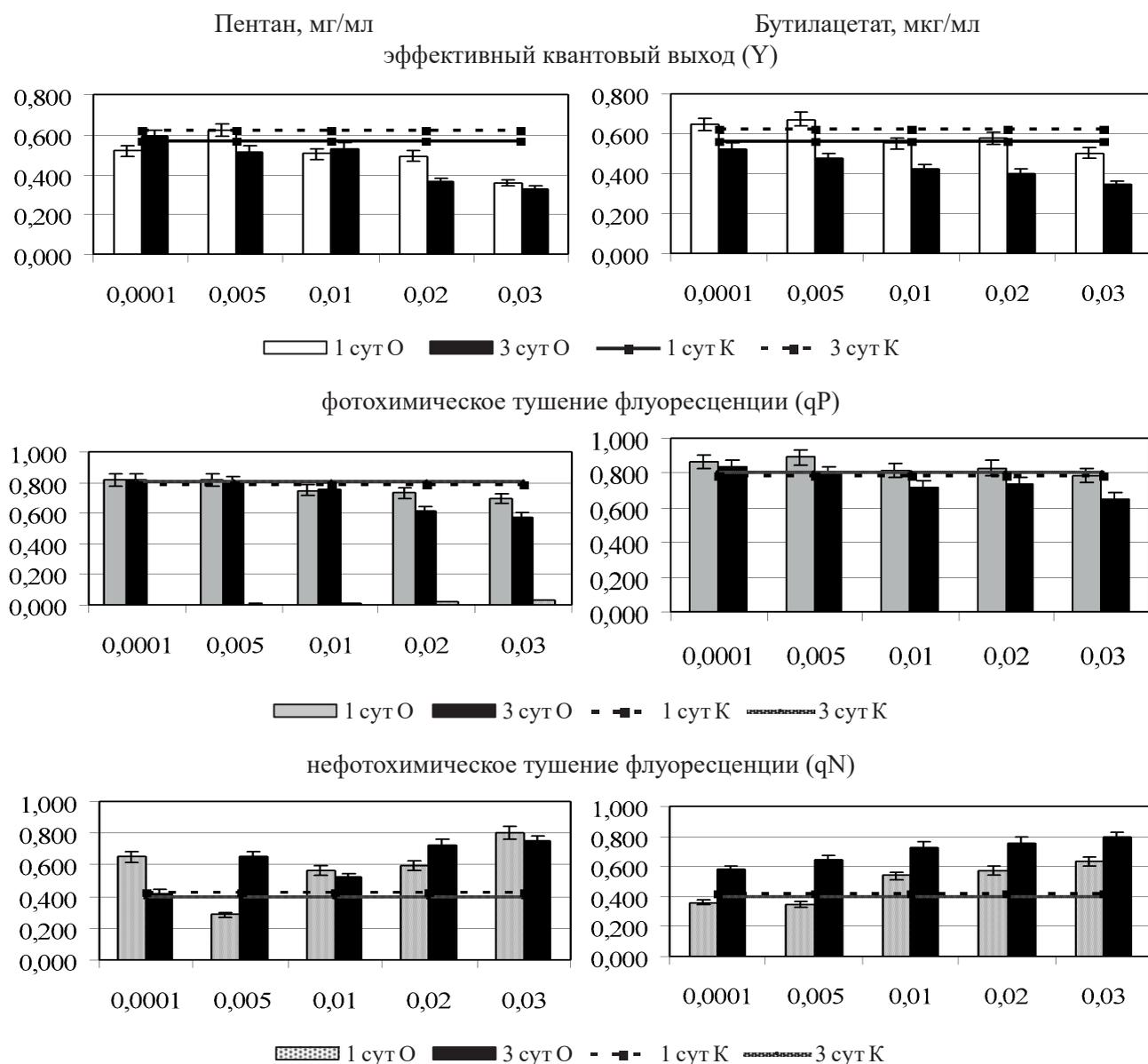


Рис. 2. Влияние различных концентраций летучих органических соединений (ось абсцисс) на эффективный квантовый выход (Y (II), отн. ед., ось ординат), фото- и нефотохимическое тушение флуоресценции (qP , qN , отн. ед., ось ординат) фотохимических реакций ФС II в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. (О – опыт, К – контроль)

**Значения параметров дыхания и фотосинтеза
под действием летучих органических соединений
в листьях овсяницы тростниковой *F. arundinacea***

Период исследований	Значения показателей дыхания и фотосинтеза			
	контроль	пентан	бензол	бутилацетат
1 сут, фотосинтез истинный (скорость выделения кислорода), мкмоль O ₂ ·с ⁻¹ ·м ⁻²				
1 пдк	0,402	0,573	0,351	0,283
100 пдк	0,402	0,403	0,225	0,226
300 пдк	0,402	0,342	0,176	0,202
3 сут, фотосинтез истинный (скорость выделения кислорода), мкмоль O ₂ ·с ⁻¹ ·м ⁻²				
1 пдк	0,358	0,367	0,307	0,249
100 пдк	0,358	0,336	0,304	0,240
300 пдк	0,358	0,320	0,273	0,216
1 сут, дыхание (скорость поглощения кислорода), мкмоль O ₂ ·с ⁻¹ ·м ⁻²				
1 пдк	-0,196	-0,290	-0,176	-0,127
100 пдк	-0,196	-0,226	-0,104	-0,135
300 пдк	-0,196	-0,177	-0,102	-0,081
3 сут, дыхание (скорость поглощения кислорода), мкмоль O ₂ ·с ⁻¹ ·м ⁻²				
1 пдк	-0,179	-0,278	-0,176	-0,158
100 пдк	-0,179	-0,191	-0,227	-0,152
300 пдк	-0,179	-0,219	-0,182	-0,158

В табл. 2 обобщены результаты определения уровня корреляционных взаимодействий между исследованными параметрами.

Приведенные данные указывают на тесную отрицательную корреляционную взаимосвязь между содержанием бесфитольных форм хлорофилла и скоростью фотосинтеза и положительная – между содержанием фитольных форм и скоростью фотосинтеза, а также бесфитольных форм и скоростью дыхания.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции (r) между содержанием разных форм
хлорофилловых пигментов и показателями интенсивности дыхания и фотосинтеза
(скорости процессов) в листьях овсяницы тростниковой *F. arundinacea***

Углеводород	Бесфитольные – дыхание		Бесфитольные – фотосинтез		Фитольные – дыхание		Фитольные – фотосинтез	
	1 сут	3 сут	1 сут	3 сут	1 сут	3 сут	1 сут	3 сут
Пентан	0,75*	0,62*	-0,47	0,15	-0,94*	-0,88*	0,99*	-0,53*
Гексан	0,94*	0,64*	-0,52*	-0,85*	-0,98*	-0,93*	0,88*	0,50*
Бензол	0,89*	0,42	-1,0*	-0,25	-0,82*	0,49*	0,99*	0,93*
о-Ксилол	0,98*	0,64*	-0,77*	-0,55*	-0,99*	-0,97*	0,87*	0,99*
Бенз(а)пирен	0,84*	-0,11	-0,61*	-0,57*	-0,90*	0,58*	0,51*	0,90*
Бутилацетат	0,80*	-0,34	-0,53*	-0,99*	-0,84*	0,30	0,46	0,99*

* Обозначены достоверные коэффициенты корреляции при $p < 0,05$.

Также выявлена высокая отрицательная корреляция между изменением qN и содержанием фитольных хлорофилловых пигментов (для пентана, гексана, бензола, о-ксилола, бенз(а)пирена и бутилацетата коэффициенты корреляции соответственно равны -0,62; -0,38; -0,73; -0,69; -0,59; -0,57), а также положительная корреляция между qN и содержанием хлорофиллида (для пентана, гексана, бензола, о-ксилола, бенз(а)пирена и бутилацетата коэффициенты корреляции соответственно равны 0,72; 0,66; 0,80; 0,76; 0,43; 0,87). Предполагается, что обнаруженные количественные различия в действии на растения исследованных углеводов связаны не с их водорастворимостью, а, скорее, с разным сродством к мембранным липидам (липофильностью). Полученные результаты свидетельствуют о высокой информативности исследования совокупности параметров фотосинтетической деятельности в качестве маркеров стрессового состояния растений для выявления влияния углеводов техногенного происхождения на окружающую среду.

Библиографические ссылки

1. 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]. URL: http://pravo.by_1485896400.pdf. (дата обращения: 22.02.2025).