

Сравнительный анализ структурно-функционального состояния фотосистемы II фотосинтеза в листьях различных видов растений при воздействии бенз(а)пирена

Е.Г. ТЮЛЬКОВА

В результате проведенного эксперимента с использованием метода ПАМ-флуориметрии получено, что бенз(а)пирен достоверно влияет на снижение корреляционных связей между параметрами активности фотосинтетического аппарата и является причиной их разнонаправленных изменений у разных видов растений по сравнению с контролем при увеличении концентрации действующего вещества. На основании полученных результатов возможна разработка метода оценки загрязнения воздуха бенз(а)пиреном с использованием параметров активности фотосинтетического аппарата травянистых и древесных растений.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, ПАМ-флуориметрия, овсяница тростниковая, древесные растения.

As a result of the experiment carried out using the PAM-fluorometry method, it was obtained that the benz(a)pyrene has a significant effect on the reduction of correlation links between the activity parameters of the photosynthetic apparatus and is the cause of their different-directional changes in different plant species compared to the control with an increase in the concentration of the active ingredient. Based on the obtained results, it is possible to develop a method of estimating air pollution of benz(a)pyrene using parameters of activity of photosynthetic apparatus of herbaceous and wood plants.

Keywords: benz(a)pyrene, PAM-fluorometry, reed fescue, woody plants.

Введение. Полициклические ароматические углеводороды и их производные относятся к числу приоритетных и наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. Их источником могут быть как техногенные, так и природные явления. Важная роль в детоксикации токсичных соединений в целом и полициклических ароматических углеводородов в частности в атмосферном воздухе принадлежит растениям. Однако, при этом растения сами подвергаются сильному стрессовому воздействию токсикантов, поскольку фотосинтетический аппарат является одной из наиболее уязвимых и чувствительных систем растительной клетки [1]–[6]. При этом в литературе недостаточно сведений о механизмах, путях и степени воздействия полиаренов на фотосинтетический аппарат различных видов растений, что привлекает интерес исследователей к этой проблеме. Поэтому нами был проведен сравнительный анализ характера и закономерностей изменений показателей активности фотосинтетического аппарата травянистых и древесных растений (на примере значений эффективного квантового выхода фотохимических реакций, нефото- и фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла *a* в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз бенз(а)пирена).

Материал и методы. Выбор овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в качестве исследуемых травянистых растений и саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth., клена остролистного *Acer platanoides* L., липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. в качестве древесных растений для эксперимента был обусловлен широкой и достаточно равномерной распространенностью этих представителей в городских условиях.

Листовые пластинки овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. и саженцев древесных растений обрабатывали водными растворами бенз(а)пирена. Размеры используемых доз рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ [7]. В соответствии с нормативами среднесуточная предельно допустимая концентрация бенз(а)пирена в атмосферном воздухе является $5,0 \text{ нг/м}^3$.

В качестве контроля использовали необработанные растения овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. и саженцев древесных растений; экспериментальными явились растения, обработанные водными растворами бенз(а)пирена в концентрациях от $0,000005$ до $0,0015 \text{ нг/мл}$. Обработка листовых пластинок осуществлялась путем опрыскивания водными растворами (по 50 мл водного раствора каждой дозы вводимого соединения).

Для оценки фотохимической активности фотосистемы II использовали метод импульсно-модулированной флуоресцентной спектроскопии (PAM, pulse-amplitude modulated fluorometry), позволяющий проводить прижизненную регистрацию кинетической кривой индукции флуоресценции хлорофилла *a*. Параметры флуоресценции хлорофилла *a* измеряли на флуориметре Dual-PAM 100 («Walz», Германия) по методам [8]. Листья предварительно адаптировали к темноте в течение 15 минут. Модулированный с низкой частотой (32 Гц) свет (650 нм) очень низкой интенсивности (0,04 мкмоль квантов/ м²с) возбуждал флуоресценцию до минимального уровня (F_0). Повышение выхода флуоресценции до уровня F_m инициировали включением света (665 нм) высокой интенсивности (3500 мкмоль квантов/ м²с). Параметры флуоресценции измеряли с использованием актиничного света (120 мкмоль квантов/ м²с) и рассчитывали по формулам 1–3:

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

где $Y(II)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; F_m и F_m' – максимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету, соответственно; F – выход флуоресценции на фоне действия модулированного и актиничного света; qP и qN – фотохимическое и нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* соответственно; F_0 и F_0' – минимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету, соответственно.

Параметры флуоресценции хлорофилла *a* оценивали через одни и трое суток после обработки бенз(а)пиреном.

Достоверность различий между параметрами флуоресценции хлорофилла *a* в экспериментальных и контрольных пробах оценивали с помощью дисперсионного анализа. Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью *M. Excel* и *Statistica*.

С целью проведения сравнительной количественной оценки изменений параметров флуоресценции хлорофилла *a* проводили вычисление среднего значения изменений изучаемых параметров в пределах всех доз бенз(а)пирена по сравнению с контролем в экспериментальных образцах.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения параметров индукции флуоресценции хлорофилла *a* в растениях овсяницы тростниковой свидетельствуют о том, что обработка бенз(а)пиреном экспериментальных образцов явилась причиной разнонаправленных изменений по сравнению с контрольными пробами (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	через одни сутки после обработки			через трое суток после обработки		
	$Y(II)$	qN	qP	$Y(II)$	qN	qP
контроль	0,565 ± 0,021	0,421 ± 0,021	0,785 ± 0,029	0,625 ± 0,022	0,395 ± 0,015	0,804 ± 0,025
0,000005	0,507 ± 0,024*	0,612 ± 0,030*	0,776 ± 0,038*	0,659 ± 0,033*	0,311 ± 0,015*	0,859 ± 0,042*
0,00025	0,515 ± 0,025*	0,587 ± 0,028*	0,769 ± 0,036*	0,565 ± 0,028*	0,490 ± 0,025*	0,809 ± 0,040*
0,0005	0,566 ± 0,027	0,377 ± 0,019*	0,765 ± 0,038*	0,586 ± 0,028*	0,384 ± 0,019*	0,789 ± 0,039*
0,001	0,496 ± 0,025*	0,589 ± 0,028*	0,745 ± 0,037*	0,553 ± 0,028*	0,456 ± 0,023*	0,786 ± 0,039*
0,0015	0,444 ± 0,022*	0,680 ± 0,034*	0,730 ± 0,037*	0,454 ± 0,023*	0,715 ± 0,035*	0,736 ± 0,037*

Здесь и далее в таблицах 2–4: $Y(II)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; qN и qP – нефотохимическое и фотохимическое тушение флуоресценции. Здесь и далее в таблицах 2–5: достоверные значения параметров флуоресценции хлорофилла *a* и коэффициентов корреляции при $p \leq 0,05$ обозначены *.

Следует отметить, что по мере увеличения концентрации растворов бенз(а)пирена наблюдалось постепенное снижение величины qP и не прослеживалось достаточно четкой тенденции снижения значений $Y(II)$ и роста qN по сравнению с контролем как через одни, так и через трое

суток после обработки растений овсяницы тростниковой. Возможно, это свидетельствует о наличии каких-либо пороговых значений воздействия стрессового фактора, до которого растение овсяницы тростниковой компенсирует снижение величины фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла *a* уменьшением преобразования световой энергии в тепло и ростом эффективного квантового выхода фотохимических реакций. В целом, бенз(а)пирен как одно из наиболее токсичных соединений не явился причиной очень существенных изменений параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. в пределах используемых доз в условиях проведенного эксперимента.

Результаты определения параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях древесных саженцев представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. и клена остролистного *Acer platanoides* L. после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	<i>Y</i> (II)	<i>qN</i>	<i>qP</i>	<i>Y</i> (II)	<i>qN</i>	<i>qP</i>
через одни сутки после обработки						
контроль	0,682 ± 0,030	0,226 ± 0,010	0,882 ± 0,030	0,590 ± 0,025	0,251 ± 0,009	0,817 ± 0,031
0,000005	0,663 ± 0,020*	0,329 ± 0,015*	0,889 ± 0,025*	0,449 ± 0,020*	0,578 ± 0,018*	0,691 ± 0,025*
0,00025	0,652 ± 0,014*	0,237 ± 0,012*	0,845 ± 0,024*	0,453 ± 0,013*	0,531 ± 0,017*	0,685 ± 0,024*
0,0005	0,656 ± 0,002*	0,212 ± 0,011*	0,832 ± 0,012*	0,470 ± 0,014*	0,460 ± 0,013*	0,677 ± 0,026*
0,001	0,604 ± 0,025*	0,388 ± 0,014*	0,807 ± 0,030*	0,384 ± 0,015*	0,597 ± 0,025*	0,623 ± 0,021*
0,0015	0,512 ± 0,015*	0,449 ± 0,012*	0,746 ± 0,027*	0,370 ± 0,018*	0,540 ± 0,018*	0,593 ± 0,025*
через трое суток после обработки						
контроль	0,652 ± 0,023	0,273 ± 0,010	0,875 ± 0,032	0,522 ± 0,016	0,298 ± 0,012	0,718 ± 0,026
0,000005	0,682 ± 0,021*	0,152 ± 0,007*	0,863 ± 0,025*	0,455 ± 0,013*	0,569 ± 0,018*	0,689 ± 0,030*
0,00025	0,567 ± 0,022*	0,348 ± 0,015*	0,788 ± 0,035*	0,401 ± 0,015*	0,623 ± 0,021*	0,629 ± 0,024*
0,0005	0,608 ± 0,028*	0,297 ± 0,012*	0,785 ± 0,034*	0,382 ± 0,011*	0,674 ± 0,024*	0,627 ± 0,028*
0,001	0,571 ± 0,016*	0,255 ± 0,010*	0,770 ± 0,035*	0,361 ± 0,017*	0,580 ± 0,018*	0,574 ± 0,015*
0,0015	0,571 ± 0,017*	0,424 ± 0,018*	0,769 ± 0,029*	0,302 ± 0,009*	0,724 ± 0,024*	0,544 ± 0,017*

Таблица 3 – Параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. и липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	тополь пирамидальный <i>Populus pyramidalis</i> Roz.			липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.		
	<i>Y</i> (II)	<i>qN</i>	<i>qP</i>	<i>Y</i> (II)	<i>qN</i>	<i>qP</i>
через одни сутки после обработки						
контроль	0,736 ± 0,025	0,127 ± 0,004	0,931 ± 0,037	0,709 ± 0,025	0,226 ± 0,009	0,898 ± 0,035
0,000005	0,713 ± 0,026*	0,181 ± 0,009*	0,910 ± 0,026*	0,521 ± 0,020*	0,501 ± 0,015*	0,742 ± 0,027*
0,00025	0,654 ± 0,023*	0,243 ± 0,012*	0,867 ± 0,025*	0,439 ± 0,012*	0,532 ± 0,017*	0,665 ± 0,023*
0,0005	0,565 ± 0,020*	0,620 ± 0,021*	0,823 ± 0,038*	0,284 ± 0,010*	0,673 ± 0,024*	0,498 ± 0,015*
0,001	0,388 ± 0,015*	0,611 ± 0,028*	0,645 ± 0,030*	0,257 ± 0,008*	0,708 ± 0,015*	0,442 ± 0,012*
0,0015	0,312 ± 0,012*	0,535 ± 0,025*	0,605 ± 0,025*	0,228 ± 0,005*	0,672 ± 0,024*	0,409 ± 0,015*
через трое суток после обработки						
контроль	0,742 ± 0,027	0,172 ± 0,008	0,934 ± 0,030	0,655 ± 0,030	0,416 ± 0,020	0,884 ± 0,034
0,000005	0,740 ± 0,024	0,155 ± 0,007*	0,928 ± 0,034*	0,568 ± 0,018*	0,391 ± 0,015*	0,846 ± 0,032*
0,00025	0,704 ± 0,015*	0,130 ± 0,006*	0,900 ± 0,025*	0,337 ± 0,015*	0,723 ± 0,026*	0,589 ± 0,019*
0,0005	0,702 ± 0,026*	0,168 ± 0,005*	0,899 ± 0,023*	0,289 ± 0,010*	0,717 ± 0,025*	0,491 ± 0,015*
0,001	0,678 ± 0,017*	0,326 ± 0,010*	0,855 ± 0,029*	0,254 ± 0,008*	0,653 ± 0,023*	0,453 ± 0,013*
0,0015	0,530 ± 0,018*	0,417 ± 0,018*	0,782 ± 0,030*	0,218 ± 0,007*	0,604 ± 0,025*	0,372 ± 0,014*

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что у березы повислой как и в случае с овсяницей тростниковой при увеличении концентрации растворов бенз(а)пирена не прослеживалось четкой тенденции постепенного снижения значений *Y* (II) и роста *qN* по сравнению с контролем через одни и трое суток после обработки, причем для значений *qN* это характерно в большей степени. У клена остролистного *Acer platanoides* L., имеющего более широкие ли-

стовые пластинки, все используемые дозы растворов бенз(а)пирена, начиная с минимальной, вызывали изменения флуоресцентных характеристик и заметные отличия от контрольных значений. Отсутствие четкой тенденции постепенного снижения значений $Y(II)$ и роста qN по сравнению с контролем по мере роста концентраций растворов бенз(а)пирена для клена остролистного также было отмечено в большинстве случаев, причем через одни сутки для значений qN это проявлялось в большей степени.

Тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz., как и в целом семейство ивовых, способен выявлять биодоступность элементов в почвах за счет широко распространенной корневой системы, высокого уровня потребления водных ресурсов и значимого показателя емкости поглощения микроэлементов. Кроме того, листья тополя являются токсикотолерантными, проявляют стойкость по отношению к почвенному загрязнению и устойчивость против дыма и газов. С другой стороны, тополь имеет плотные листья с сосудистой системой сетевой формы в виде одной доминирующей жилки, от которой отходят вторичные сосудистые пучки. Это позволяет эффективно улавливать и сохранять значительное количество частиц из атмосферы. В наших исследованиях для тополя пирамидального тенденция постепенного снижения значений $Y(II)$ и qP по сравнению с контролем по мере роста концентраций растворов бенз(а)пирена прослеживалась во всех случаях, а роста qN – в пределах первых трех доз через одни сутки и двух последних – через трое суток; у липы мелколистной значения $Y(II)$ и qP снижались равномерно при росте концентрации бенз(а)пирена, а qN – постепенно увеличивались только через одни сутки, кроме максимальной дозы, а через трое суток – с 0,0005 нг/мл постепенно снижались. В целом, в эксперименте с саженцами древесных растений максимальная доза бенз(а)пирена как одного из самых опасных токсикантов явилась причиной существенных изменений параметров флуоресценции хлорофилла a в листьях тополя пирамидального и липы мелколистной.

В результате анализа изменений параметров флуоресценции хлорофилла a с учетом влияния всех используемых доз бенз(а)пирена в опыте с овсяницей тростниковой получено, что через одни сутки после обработки наблюдались более значительные отклонения всех изучаемых параметров от контрольных величин (рисунок 1).

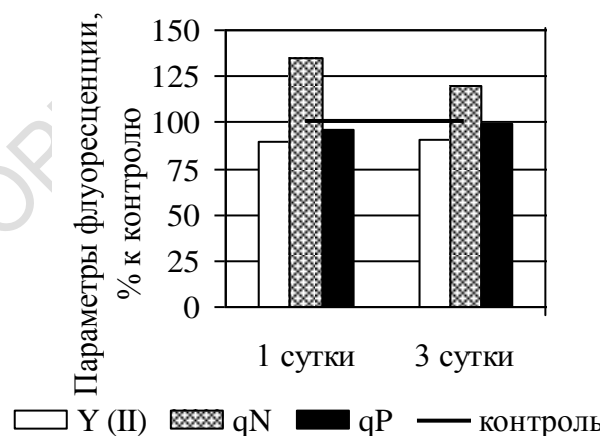


Рисунок 1 – Изменения параметров флуоресценции хлорофилла a в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. после обработки бенз(а)пиреном по сравнению с контролем (с учетом всех доз действующего вещества)

У березы повислой на раннем этапе эксперимента наибольшие изменения по сравнению с контролем были характерны для показателя qN , тогда как различия между величинами коэффициентов $Y(II)$ и qP под влиянием бенз(а)а были незначительными как через одни, так и через трое суток после обработки (рисунок 2А). Ответная реакция клена остролистного на воздействие бенз(а)пирена проявлялась в том, что на всех этапах эксперимента изменение параметров $Y(II)$ и qN по отношению к контролю было практически равным, а величина qP была более низкой через одни сутки (рисунок 2Б).

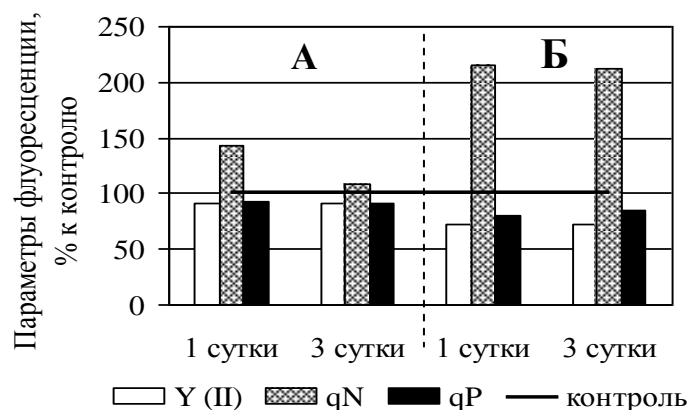


Рисунок 2 – Изменения параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. (А) и клена остролистного *Acer platanoides* L. (Б) после обработки бенз(а)пиреном по сравнению с контролем (с учетом всех доз действующего вещества)

Все изучаемые параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях тополя пирамидального наиболее сильно изменялись на раннем сроке после обработки, тогда как трое суток наблюдалось их резкое приближение к контрольным цифрам, особенно *qN* (рисунок 3А). Липа мелколистная среди всех изучаемых видов растений отреагировала на воздействие бенз(а)пирена наиболее сильным изменением флуоресцентных характеристик, особенно на начальных этапах эксперимента (рисунок 3Б). Через трое суток наблюдалось незначительное снижение влияния токсиканта на величины *Y(II)* и *qP* и почти вдвое снизилось значение *qN*.

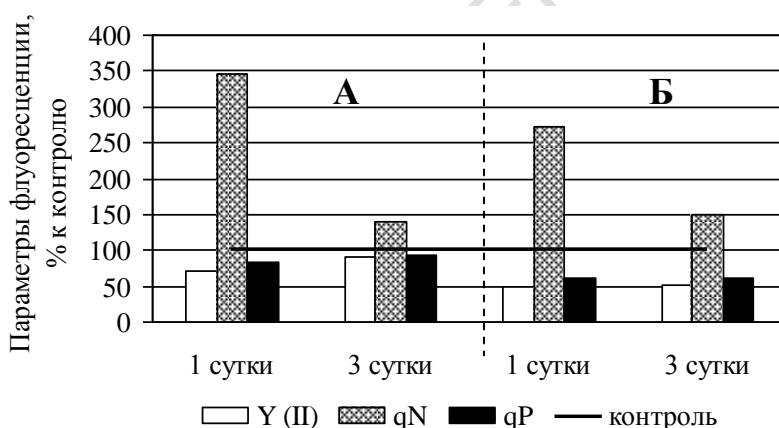


Рисунок 3 – Изменения параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. (А) и липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. (Б) после обработки бенз(а)пиреном по сравнению с контролем (с учетом всех доз действующего вещества)

В результате оценки степени и характера корреляционных связей между исследуемыми параметрами фотосинтетической активности выявлено, что в контрольных образцах всех видов растений коэффициенты корреляции были высокими (таблица 4).

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции между параметрами флуоресценции хлорофилла *a* в листьях исследуемых растений после обработки бенз(а)пиреном

Исследуемые растения	Коэффициенты корреляции		
	$Y(II) - qN$	$Y(II) - qP$	$qP - qN$
через одни сутки после обработки			
овсяница тростниковая	-1,0* / -0,93*	0,99* / 0,73*	-0,99* / -0,43
береза повислая	-1,0* / -0,72*	0,99* / 0,74*	-0,97* / -0,08
клен остролистный	-0,97* / -0,56*	0,99* / 0,95*	-0,96* / -0,27
липа мелколистная	-0,99* / -0,97*	1,0* / 1,0*	-0,99* / -0,96*
тополь пирамидальный	-0,96* / -0,77*	0,99* / 0,99*	-0,89* / -0,72*

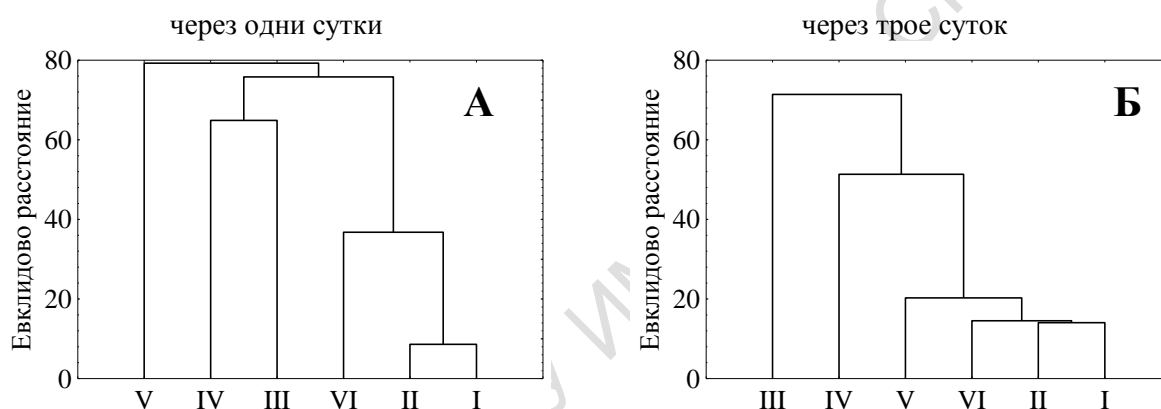
Окончание таблицы 4

через трое суток после обработки			
овсяница тростниковая	-0,99* / -0,97*	1,0* / 0,96*	-0,99* / -0,87*
береза повислая	-0,97* / -0,85*	0,99* / 0,97*	-0,99* / -0,69*
клен остролистный	-0,96* / -0,76*	0,97* / 0,97*	-0,95* / -0,60*
липа мелколистная	-0,98* / -0,78*	0,99* / 0,99*	-1,0* / -0,71*
тополь пирамидальный	-0,99* / -0,88*	1,0* / 0,97*	-1,0* / -0,95*

Примечание: в начале представлены коэффициенты корреляции в контроле, далее – в эксперименте.

Использование растворов бенз(а)пирена явилось причиной снижения величин коэффициентов корреляции, особенно у березы повислой и клена остролистного на ранних сроках эксперимента. Кроме того, у всех исследованных видов растений коэффициенты корреляции были снижены через одни сутки опыта и повышались на более позднем этапе, кроме липы мелколистной, у которой через трое суток, наоборот, происходило их снижение.

Для систематизации полученных результатов изменений параметров флуоресценции хлорофилла *a* по сравнению с контролем у различных видов растений нами был проведен кластерный анализ методом иерархической классификации (рисунок 4).



I – овсяница тростниковая *Festuca arundinacea* Schreb.; II – береза повислая *Betula pendula* Roth.;
 III – клен остролистный *Acer platanoides* L.; IV – липа мелколистная *Tilia cordata* Mill.;
 V – тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz.; VI – контроль

Рисунок 4 – Дендрограммы изменений параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* Schreb. и саженцев исследуемых древесных растений через одни сутки (А) и трое суток (Б) по сравнению с контролем

В результате получено, что кратковременное воздействие бенз(а)пирена привело к образованию кластера наиболее устойчивых видов овсяницы тростниковой и березы повислой (действие бенз(а)пирена на эти виды растений незначительно), а также кластера – липы мелколистной и клена остролистного, которые характеризуются средней устойчивостью (бенз(а)пирен оказал более сильное влияние) (рисунок 4А). Тополь пирамидальный оказался наиболее чувствительным видом к действию бенз(а)пирена по причине наиболее резких изменений параметров флуоресценции через одни сутки по сравнению с контролем и не вошел в состав полученных кластеров. Через трое суток ситуация изменилась, влияние бенз(а)пирена на тополь пирамидальный снизилось и один кластер образовали наиболее устойчивые виды – овсяница тростниковая, береза повислая и тополь пирамидальный (рисунок 4Б). Клен остролистный и липа мелколистная из-за более резких отличий параметров флуоресценции от контрольных значений были расположены за пределами полученного кластера и характеризовались чувствительностью к действию бенз(а)пирена.

Заключение. В результате проведенного эксперимента установлено, что наиболее устойчивыми видами к кратковременному воздействию бенз(а)пирена являются овсяница тростниковая *Festuca arundinacea* Schreb. и береза повислая *Betula pendula* Roth.; липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. и клен остролистный *Acer platanoides* L. характеризуются сред-

ней устойчивостью, а тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz. отличается высокой чувствительностью к влиянию бенз(а)пирена через одни сутки после обработки. На более позднем этапе воздействия кластер наиболее устойчивых видов формировали овсяница тростниковая, береза повислая и тополь пирамидальный; клен остролистный и липа мелколистная характеризовались чувствительностью к действию бенз(а)пирена.

На основании полученных результатов возможна разработка метода оценки загрязнения воздуха бенз(а)пиреном с использованием параметров активности фотосинтетического аппарата травянистых и древесных растений.

Литература

1. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода / В.С. Лысенко [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4. – С. 112–120.
2. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла древесных растений в условиях различной транспортной нагрузки / М.Ю. Алиева [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 1 (3). – С. 701–704.
3. Исследование фотосинтетической активности растений в зависимости от высотного градиента / Е.В. Пиняскина [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – № 3 (2). – С. 762–764.
4. Орехов, Д.И. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях древесных растений, растущих в условиях г. Москвы / Д.И. Орехов, Ю.П. Козлов // Вестник РУДН. – 2010. – № 4. – С. 23–28.
5. Пиняскина, Е.В. Изучение параметров фотосинтетической активности растений в зависимости от вертикальной поясности / Е.В. Пиняскина, А.Т. Мамаев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 1 (3). – С. 788–791.
6. Ланкин, А.В. Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / А.В. Ланкин ; Ин-т физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН. – М., 2016. – 22 с.
7. 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 от 08.11.2016 г., № 113 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2007. – 8/31467.
8. Krause, G.N. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Ann. Rev. / G.N. Krause, E. Wels // Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 1991. – V. 42. – P. 313–349.