

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ САЖЕНЦЕВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Е.Г. Тюлькова

Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет
потребительской кооперации»

В статье рассматриваются и анализируются в сравнительном аспекте закономерности изменения параметров фотосинтетической активности саженцев древесных растений в условиях воздействия различных концентраций растворов о-ксилола и бенз(а)пирена.

Цель исследования – изучение закономерностей изменения показателей эффективности деятельности фотосинтетического аппарата древесных растений (на примере саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz.) в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз о-ксилола и бенз(а)пирена. Используемые дозы действующих веществ (по пять для каждого соединения) в эксперименте рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций токсикантов и составили 0,0002–0,06 мкг/мл для о-ксилола и 0,000005–0,0015 нг/мл для бенз(а)пирена.

Материал и методы. Материал исследования – листовые пластинки одних из наиболее распространенных представителей древесных растений городской среды – березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. Параметры флуоресценции хлорофилла а измеряли на флуориметре Dual-PAM 100. Математическую обработку цифрового материала выполняли в Excel.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенного эксперимента с использованием метода PAM-флуориметрии с целью оценки воздействия на параметры активности фотосистемы II фотосинтеза саженцев двух видов древесных растений различных доз о-ксилола и бенз(а)пирена в условиях эксперимента установлено, что в случае воздействия растворов о-ксилола максимальные изменения параметров флуоресценции с учетом сравнения экспериментальных саженцев с контролем отмечены у тополя пирамидального через трое суток. Обработка бенз(а)пиреном обусловила максимальные изменения по сравнению с контрольными образцами у березы повислой через одни сутки. При сравнении количественных различий по отношению к контрольным образцам выявлено наиболее сильное влияние растворов о-ксилола в отличие от бенз(а)пирена.

В результате количественной оценки влияния изученных ароматических углеводородов через одни и трое суток получено, что после обработки о-ксилолом флуоресцентные показатели исследуемых саженцев снижались более интенсивно через трое суток эксперимента, тогда как влияние бенз(а)пирена у тополя пирамидального приводило к их снижению уже через одни сутки после воздействия, а у березы повислой – через трое суток. При этом наиболее существенные различия между параметрами, зарегистрированными через одни и трое суток, были характерны для тополя пирамидального, а среди двух использованных соединений наиболее длительно действующим в течение времени эксперимента явился о-ксилол.

Также в процессе исследований были выявлены отличительные особенности кривых кинетики фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения опытных и экспериментальных образцов.

Заключение. В результате проведенного эксперимента установлены не только количественные различия параметров флуоресценции хлорофилла а саженцев древесных растений двух видов по сравнению с контролем и с течением времени действия применяемых соединений, но и отличительные особенности кривых кинетики фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения опытных и контрольных образцов.

Ключевые слова: саженцы березы повислой *Betula pendula* Roth., саженцы тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz., о-ксилол, бенз(а)пирен, бутилацетат, хлорофилл а, PAM-флуориметрия.

STUDYING WOODY PLANT SEEDLING PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY PARAMETERS UNDER THE INFLUENCE OF AROMATIC HYDROCARBONS

E.G. Tyulkova

Educational Establishment “Belarusian Trade and Economic University of Consumer Cooperation”

The article discusses and analyzes in a comparative aspect the patterns of changing the parameters of woody plant seedling photosynthetic activity under the influence of o-xylol and benz(a)pyrene solutions of various concentrations.

The objective is to study the patterns of changes in the photochemical activity of woody plant photosynthetic apparatus (using the example of hanging birch *Betula pendula* Roth. and poplar pyramidal *Populus pyramidalis* Roz. seedlings) under specified experimental conditions when exposed

to *o*-xylol and benz(a)pyrene in various doses. The used doses of active substances (five for each compound) in the experiment were calculated based on the maximum permissible concentrations of toxicants established for atmospheric air and amounted to 0,0002–0,06 mcg/ml for *o*-xylol and 0,000005–0,0015 ng/ml for benz(a)pyrene.

Material and methods. The object of study is leaf blades of one of the most common representatives of urban environment woody plants – the hanging birch *Betula pendula* Roth. and poplar pyramidal *Populus pyramidalis* Roz. The parameters of chlorophyll *a* fluorescence were measured on a Dual-PAM 100 fluorimeter. The digital material was mathematically processed using Excel.

Findings and their discussion. As a result of the experiment using the method of PAM fluorimetry in order to assess the effect on the parameters of photosystem 2 photosynthesis of two species of woody plant seedlings of different doses of *o*-xylol and benz(a)pyrene under the experimental conditions, it was found out that, in the case of exposure to *o*-xylol solutions, the maximum changes in fluorescence parameters, taking into account the comparison of experimental seedlings with control, were noted in pyramidal poplar after three days. The treatment with benz(a)pyrene caused maximum changes in comparison with the control samples of *Betula pendula* Roth. after one day. When comparing quantitative differences with respect to control samples, the strongest effect of *o*-xylol solutions was revealed in contrast to benz(a)pyrene.

As a result of a quantitative assessment of the studied aromatic hydrocarbons effect after one and three days, it was obtained that after treatment with *o*-xylol, the fluorescence indices of the studied seedlings decreased more intensively after three days of the experiment, while the influence of benz(a)pyrene in pyramidal poplar led to their reduction after only one day after exposure, and in *Betula pendula* Roth. – after three days. In this case, the most significant differences between the parameters recorded after one and three days were characteristic of pyramidal poplar, and among the two compounds used, *o*-xylol was the most long-acting during the experiment time.

Also, in the process of research, distinctive features of the kinetics curves of photochemical (qP) and non-photochemical (qN) quenching of experimental and control samples were revealed.

Conclusion. The experiment revealed not only quantitative differences in the fluorescence parameters of chlorophyll *a* seedlings of two species of woody plants compared to the control and over time the action of the compounds used, but also the distinctive features of the kinetics curves of photochemical (qP) and non-photochemical (qN) quenching of experimental and control samples.

Key words: seedlings hanging birch *Betula pendula* Roth., seedlings of poplar pyramidal *Populus pyramidalis* Roz., *o*-xylol, benz(a)pyrene, butyl acetate, chlorophyll *a*, PAM fluorimetry.

В настоящее время представители группы неметановых летучих органических соединений и их производные относятся к числу одних из наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды. При этом важная роль в детоксикации летучих органических веществ в целом и ароматических углеводородов в частности в атмосферном воздухе принадлежит растениям. Однако растения сами подвергаются стрессовому воздействию таких соединений [1–8]. Известно, что фотосинтетический аппарат является одной из наиболее уязвимых и чувствительных систем растительной клетки [1; 4; 8]. Сегодня в литературе недостаточно сведений о механизмах и путях воздействия летучих органических соединений на фотосинтетический аппарат растений, что привлекает интерес исследователей к этой проблеме. Поэтому целью исследований явилось изучение закономерностей изменения показателей фотохимической активности фотосинтетического аппарата древесных растений (на примере саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz.) в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз *o*-ксилола и бенз(а)пирена.

Материал и методы. Выбор саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. и тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. связан с тем, что они являются одними из наиболее распространенных представителей растений в городских условиях. Использование *o*-ксилола обусловлено преобладающим количеством этого соединения в выбросах отдельных промышленных предприятий города 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 применение в эксперименте связано с высокой токсичностью, способностью в небольших количествах вызывать значительный эффект, недостаточной изученностью эффектов влияния и возможностью проведения сравнительной оценки влияния полициклического ароматического углеводорода и одноядерных ароматических углеводородов (*o*-ксилол) на растительные организмы.

Листовые пластинки древесных саженцев обрабатывали водными растворами углеводородов. Размеры используемых доз углеводородов рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ [9]. В соответствии с нормативами ПДК ксилолов в атмосферном воздухе находится 200 мкг/м³; бенз(а)пирена – 5,0 нг/м³. Для *o*-ксилола использовали величину максимальной разовой ПДК; для бенз(а)пирена – среднесуточную ПДК [9].

В качестве контроля применяли необработанные растения; экспериментальными явились растения, обработанные водными растворами исследуемых соединений в следующих концентрациях: 0,0002–0,06 мкг/мл *o*-ксилола; 0,000005–0,0015 нг/мл бенз(а)пирена.

Обработка листовых пластинок древесных саженцев 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 [10; 11]. 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, повышая ее минимальный уровень (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 1–6:

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{F_m - F_0}{F_m}, \quad (1)$$

$$F_v = F_m - F_0, \quad (2)$$

$$Y(II) = \frac{F'_m - F}{F'_m}, \quad (3)$$

$$qP = \frac{F'_m - F}{F'_m - F_0}, \quad (4)$$

$$qN = \frac{F_m - F'_m}{F_m - F_0}, \quad (5)$$

$$qL = qP \times \frac{F_0}{F}, \quad (6)$$

где F_0 и F'_0 – минимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету, соответственно; F_v – вариабельная флуоресценция хлорофилла *a*; 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, $\frac{F_v}{F_m}$ – потенциальный квантовый выход фотохи-

мических реакций фотосистемы II; $Y(III)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; qP и qN – фотохимическое и нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* соответственно; qL – параметр, отражающий степень открытости реакционных центров фотосистемы II.

Скорость нециклического электронного транспорта рассчитывали по формуле 7:

$$ETR = Y(II) \times PAR \times c \times 0,5, \quad (7)$$

где $Y(III)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; PAR – интенсивность света (мкмоль квантов/м² с); c – часть абсорбированного света (обычно 0,84); 0,5 – часть фотосинтетически активной радиации, приходящейся на фотосистему II [12].

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*.

С целью проведения сравнительной количественной оценки изменений параметров флуоресценции хлорофилла *a* древесных саженцев проводили вычисление среднего значения разности изучаемых параметров в начале и конце эксперимента в экспериментальных образцах при обработке каждым из использованных соединений, а также среднего значения разности изучаемых параметров в контрольных и экспериментальных образцах.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения параметров флуоресценции хлорофилла *a* древесных саженцев свидетельствуют о том, что обработка о-ксилолом и бенз(а)пиреном экспериментальных образцов явилась причиной разнонаправленных изменений по сравнению с контрольными пробами (табл. 1–4, рис. 1–2).

Параметры флуоресценции хлорофилла *a* саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth.
в условиях эксперимента после обработки о-ксилолом

Концентрация раствора о-ксилола, мкг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	$\frac{F_v}{F_m}$	$Y(II)$	$ETR(III)$	qN	qP	qL
через одни сутки после обработки						
контроль	0,609±0,025	0,682±0,030	19,5±0,8	0,226±0,010	0,882±0,030	0,629±0,021
0,0002	0,618±0,021*	0,630±0,021*	18,0±0,5*	0,396±0,014*	0,882±0,024	0,680±0,018*
0,01	0,631±0,012*	0,569±0,018*	16,2±0,6*	0,375±0,012*	0,829±0,031*	0,603±0,025*
0,02	0,653±0,030*	0,640±0,013*	18,3±0,4*	0,179±0,008*	0,826±0,021*	0,515±0,017*
0,04	0,671±0,014*	0,627±0,011*	17,9±0,7*	0,309±0,10*	0,815±0,030*	0,502±0,019*
0,06	0,665±0,022*	0,500±0,015*	14,3±0,5*	0,441±0,017*	0,725±0,015*	0,449±0,013*
через трое суток после обработки						
контроль	0,608±0,027	0,652±0,023	18,6±0,7	0,273±0,010	0,875±0,032	0,640±0,012
0,0002	0,639±0,030*	0,611±0,025*	17,5±0,8*	0,351±0,015*	0,822±0,031*	0,542±0,017*
0,01	0,717±0,025*	0,626±0,020*	17,9±0,7*	0,341±0,010*	0,809±0,030*	0,490±0,015*
0,02	0,684±0,028*	0,599±0,027*	17,1±0,5*	0,404±0,010*	0,795±0,025*	0,491±0,020*
0,04	0,627±0,015*	0,601±0,10*	17,2±0,4*	0,235±0,08*	0,785±0,024*	0,460±0,020*
0,06	0,677±0,031*	0,459±0,015*	13,1±0,4*	0,583±0,019*	0,676±0,024*	0,400±0,015*

Примечание. Здесь и далее в табл. 2–4: F_v / F_m – потенциальный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; $Y(II)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; $ETR(III)$ – скорость фотосинтетического электронного транспорта; qN и qP – нефотохимическое и фотохимическое тушение флуоресценции; qL – количество открытых реакционных центров.

Здесь и далее в табл. 2–4 достоверные значения параметров флуоресценции хлорофилла *a* при $p \leq 0,05$ обозначены *.

В настоящее время известно, что энергия солнечного света, поглощаемая фотосинтетическим аппаратом листа, расходуется в следующих направлениях: в процессе фотосинтеза (фотохимическое тушение qP), на нефотохимическое тушение (переход в тепло qN) и испускание в виде кванта света (флуоресценция F). Влияние неблагоприятных условий роста и развития может воздействовать на характеристики активности фотосистемы II фотосинтеза, и значение потенциального квантового выхода фотохимических реакций может снижаться в неблагоприятных условиях среды произрастания растения [1]. В наших исследованиях величина потенциального квантового выхода после обработки всеми дозами раствора о-ксилола саженцев березы повислой не снижалась, а наоборот, несколько увеличивалась в течение всего времени эксперимента по сравнению с контролем: в 1,01–1,09 раза через одни сутки после обработки и в 1,05–1,11 раза через трое суток (диапазон изменений определяли с учетом различий между минимальной дозой и контролем, а также максимальной дозой и контролем). У тополя пирамидального потенциальный квантовый выход фотохимических реакций снижался на протяжении периода эксперимента (табл. 2): в 1,03–1,14 раза через одни сутки и в 1,11–1,26 раза через трое суток, т.е. изменения этого параметра носили более резкий характер и различались у разных видов древесных растений.

Эффективный квантовый выход $Y(II)$, характеризующий активность фотосинтетического аппарата в реальных условиях, в отличие от потенциального квантового выхода снижался во всех вариантах у исследуемых саженцев: у березы повислой – в 1,08–1,37 раза через одни сутки после обработки и в 1,07–1,42 раза через трое суток. У тополя пирамидального снижение эффективного квантового выхода было более значительным и составило через 1 сутки 1,05–1,47 раза, а через трое суток – 1,12–1,62 раза. Направление изменения величины скорости фотохимического электронного транспорта $ETR(III)$ носило тот же характер, что и эффективного квантового выхода $Y(II)$: у березы повислой наблюдалось снижение в 1,09–1,37 раза через одни сутки после обработки и в 1,07–1,42 раза через трое суток; у тополя пирамидального – в 1,05–1,47 раза через одни сутки и в 1,12–1,63 раза через трое суток. Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* (qN) под влиянием о-ксилола возрастало практически во всех вариантах в течение эксперимента, причем наиболее резко у тополя пирамидального: в 1,47–3,74 раза через один сутки и в 3,31 раза через трое суток после обработки максимальной дозой. Фотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* (qP) и количество открытых реакционных центров (qL) снижались с закономерностью, аналогичной эффективному квантовому выходу $Y(II)$ и скорости фотохимического электронного транспорта $ETR(III)$. При этом через одни сутки после воздействия фотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* (qP) и количество

открытых реакционных центров (qL) в листьях березы повислой снижались менее интенсивно по сравнению с тополем пирамидальным, тогда как через трое суток влияние раствора о-ксилола в максимальной дозе на фотосинтетический аппарат березы повислой усилилось.

Таблица 2

Параметры флуоресценции хлорофилла a саженцев тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. в условиях эксперимента после обработки о-ксилолом

Концентрация раствора о-ксилола, мкг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла a					
	$\frac{F_v}{F_m}$	$Y(II)$	$ETR(II)$	qN	qP	qL
через одни сутки после обработки						
контроль	0,786±0,030	0,736±0,025	21,0±0,9	0,127±0,004	0,931±0,037	0,738±0,027
0,0002	0,764±0,025*	0,703±0,025*	20,1±0,8*	0,187±0,008*	0,894±0,035*	0,643±0,022*
0,01	0,647±0,014*	0,671±0,024*	19,2±0,7*	0,332±0,017*	0,881±0,034*	0,639±0,030*
0,02	0,693±0,018*	0,548±0,017*	15,7±0,6*	0,477±0,020*	0,779±0,029*	0,510±0,015*
0,04	0,694±0,026*	0,524±0,018*	15,0±0,5*	0,441±0,012*	0,750±0,028*	0,474±0,014*
0,06	0,689±0,027*	0,501±0,015*	14,3±0,4*	0,473±0,019*	0,716±0,029*	0,431±0,019*
через трое суток после обработки						
контроль	0,784±0,029	0,742±0,027	21,2±0,8	0,172±0,008	0,934±0,030	0,743±0,027
0,0002	0,710±0,025*	0,666±0,023*	19,0±0,7*	0,160±0,004*	0,865±0,025*	0,595±0,029*
0,01	0,744±0,027*	0,671±0,024*	19,2±0,6*	0,169±0,005*	0,861±0,033*	0,578±0,021*
0,02	0,714±0,030*	0,559±0,025*	16,0±0,7*	0,343±0,010*	0,772±0,027*	0,483±0,015*
0,04	0,754±0,028*	0,596±0,029*	17,0±0,8*	0,131±0,008*	0,762±0,029*	0,412±0,018*
0,06	0,621±0,021*	0,458±0,020*	13,1±0,5*	0,569±0,018*	0,735±0,028*	0,512±0,014*

Бенз(а)пирен в эксперименте с древесными саженцами явился причиной роста величины потенциального квантового выхода фотохимических реакций $\frac{F_v}{F_m}$ у березы повислой (в 1,02–1,06 раза через одни сутки и в 1,12–1,13 раза через трое суток), причем, несмотря на более высокую токсичность бенз(а)пирена, рост потенциального квантового выхода в количественном выражении был практически аналогичным влиянию о-ксилола (табл. 3).

Таблица 3

Параметры флуоресценции хлорофилла a саженцев березы повислой *Betula pendula* Roth. в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла a					
	$\frac{F_v}{F_m}$	$Y(II)$	$ETR(II)$	qN	qP	qL
через одни сутки после обработки						
контроль	0,609±0,025	0,682±0,030	19,5±0,8	0,226±0,010	0,882±0,030	0,629±0,021
0,000005	0,620±0,021*	0,663±0,020*	18,9±0,4*	0,329±0,015*	0,889±0,025*	0,670±0,024*
0,00025	0,656±0,023*	0,652±0,014*	18,6±0,7*	0,237±0,012*	0,845±0,024*	0,556±0,021*
0,0005	0,664±0,025*	0,656±0,002*	18,7±0,3*	0,212±0,011*	0,832±0,012*	0,511±0,015*
0,001	0,660±0,025*	0,604±0,025*	17,3±0,5*	0,388±0,014*	0,807±0,030*	0,512±0,024*
0,0015	0,648±0,012*	0,512±0,015*	14,6±0,6*	0,449±0,012*	0,746±0,027*	0,480±0,017*
через трое суток после обработки						
контроль	0,608±0,027	0,652±0,023	18,6±0,7	0,273±0,010	0,875±0,032	0,640±0,012
0,000005	0,681±0,012*	0,682±0,021*	19,5±0,8*	0,152±0,007*	0,863±0,025*	0,570±0,025*
0,00025	0,665±0,023*	0,567±0,022*	16,2±0,4*	0,348±0,015*	0,788±0,035*	0,512±0,014*
0,0005	0,705±0,024*	0,608±0,028*	17,4±0,6*	0,297±0,012*	0,785±0,034*	0,453±0,016*
0,001	0,636±0,028*	0,571±0,016*	16,3±0,8*	0,255±0,010*	0,770±0,035*	0,466±0,013*
0,0015	0,688±0,024*	0,571±0,017*	16,3±0,6*	0,424±0,018*	0,769±0,029*	0,462±0,018*

У тополя пирамидального потенциальный квантовый выход фотохимических реакций снижался на протяжении периода эксперимента (табл. 4): в 1,05–1,51 раза через одни сутки и в 1,19 раза через трое суток в максимальной дозе, т.е. через одни сутки после обработки снижение было более интенсивным по сравнению с о-ксилолом.

Таблица 4

Параметры флуоресценции хлорофилла *a* саженцев тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	$\frac{F_v}{F_m}$	$Y (II)$	$ETR (II)$	qN	qP	qL
через одни сутки после обработки						
контроль	0,786±0,030	0,736±0,025	21,0±0,9	0,127±0,004	0,931±0,037	0,738±0,027
0,000005	0,747±0,025*	0,713±0,026*	20,4±0,7*	0,181±0,009*	0,910±0,026*	0,687±0,015*
0,00025	0,722±0,018*	0,654±0,023*	18,7±0,5*	0,243±0,012*	0,867±0,025*	0,615±0,016*
0,0005	0,742±0,027*	0,565±0,020*	31,1±0,6*	0,620±0,021*	0,823±0,038*	0,593±0,025*
0,001	0,600±0,021*	0,388±0,015*	11,1±0,4*	0,611±0,028*	0,645±0,030*	0,421±0,015*
0,0015	0,519±0,010*	0,312±0,012*	8,9±0,3*	0,535±0,025*	0,605±0,025*	0,426±0,017*
через трое суток после обработки						
контроль	0,784±0,029	0,742±0,027	21,2±0,8	0,172±0,008	0,934±0,030	0,743±0,027
0,000005	0,786±0,035*	0,740±0,024*	21,1±0,9	0,155±0,007*	0,928±0,034*	0,725±0,026*
0,00025	0,755±0,028*	0,704±0,015*	20,1±0,8*	0,130±0,006*	0,900±0,025*	0,664±0,030*
0,0005	0,734±0,026*	0,702±0,026*	20,1±0,7*	0,168±0,005*	0,899±0,023*	0,663±0,024*
0,001	0,705±0,015*	0,678±0,017*	19,4±0,5*	0,326±0,010*	0,855±0,029*	0,549±0,020*
0,0015	0,657±0,023*	0,530±0,018*	15,2±0,7*	0,417±0,018*	0,782±0,030*	0,536±0,018*

Эффективный квантовый выход фотохимических реакций $Y (II)$ и скорость электронного транспорта $ETR (II)$ в эксперименте с саженцами березы повислой за исключением минимальной дозы воздействия бенз(а)пирена через трое суток характеризовались равным снижением величин по сравнению с контролем; в опыте с тополем пирамидальным – также снижением значений, однако более активным по сравнению с березой повислой: у березы повислой – в 1,03–1,33 раза через одни сутки, в 1,14 раза – через трое суток; у тополя пирамидального – в 1,03–2,37 раза через одни сутки, в 1,40 раза – через трое суток.

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* (qN) под влиянием бенз(а)пирена возрастало практически во всех вариантах в течение эксперимента, за исключением минимальной дозы воздействия, причем наиболее резко у тополя пирамидального: в 1,43–4,23 раза через одни сутки и в 2,42 раза через трое суток после обработки максимальной дозой; у березы повислой – в 1,46–1,99 раза через одни сутки, в 1,55 раза – через трое суток.

Фотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* (qP) и количество открытых реакционных центров (qL) у тополя пирамидального снижались более сильно по сравнению с березой повислой через одни сутки (кроме минимальной дозы у березы повислой): в 1,18–1,31 раза (береза повислая), в 1,54–1,73 раза (тополь пирамидальный); через трое суток – в 1,12–1,38 раза (береза повислая), в 1,19–1,39 раза (тополь пирамидальный), т.е. у березы повислой снижение этих параметров усилилось, а у тополя пирамидального влияние бенз(а)пирена было выражено слабее.

Достоверность различий между параметрами флуоресценции хлорофилла *a* листовых пластинок экспериментальных и контрольных саженцев древесных растений оценивали с помощью дисперсионного анализа.

Результаты дисперсионного анализа комплексов, включающих параметры флуоресценции хлорофилла *a* при каждой вводимой дозе углеводорода через 1 и 3 суток после обработки и контроля, позволили установить достоверность их изменений ($F_{\text{факт.}} = 22,15 \div 256,91$ для березы повислой; $F_{\text{факт.}} = 11,36 \div 521,18$ для тополя пирамидального; $F_{\text{критич.}} (1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$). Исключение составили следующие недостоверные различия изученных параметров между контролем и экспериментальной пробой: через одни сутки фотохимическое тушение флуоресценции qP при обработке 0,0002 мкг/мл раствором о-ксилола саженцев березы повислой; скорость электронного транспорта $ETR (II)$ при обработке 0,000005 нг/мл бенз(а)пиреном саженцев тополя пирамидального через трое суток.

Сравнение комплексов дисперсий параметров флуоресценции хлорофилла *a* через 1 и 3 суток в эксперименте позволило установить достоверность их изменений с течением времени действия органических соединений без учета контрольных проб ($F_{\text{фактич.}} = 6,73 \div 257,15$ для березы повислой; $F_{\text{фактич.}} = 7,32 \div 418,82$ для тополя пирамидального; $F_{\text{критич.}} (1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$). Исключение составил у березы повислой эффективный квантовый выход $Y (II)$ при обработке растворами бенз(а)пирена 0,000005 нг/мл и 0,0005 нг/мл через одни и трое суток, скорость электронного транспорта $ETR (II)$ при обработке раствором бенз(а)пирена 0,0005 нг/мл через одни и трое суток; у тополя пирамидального – эффективный квантовый выход $Y (II)$ и скорость электронного транспорта $ETR (II)$ при обработке раствором о-ксилола 0,01 мкг/мл через одни и трое суток, изменение которых в течение времени эксперимента носило недостоверный характер.

С целью проведения количественной оценки влияния использованных ароматических углеводов нами был проведен расчет различий параметров флуоресценции в листьях саженцев древесных растений между контрольными и экспериментальными значениями, а также между пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки.

В результате количественной оценки влияния всех доз изученных ароматических углеводов на параметры флуоресценции хлорофилла *a* экспериментальных саженцев древесных растений по сравнению с контролем получено, что после обработки раствором о-ксилола исследуемые флуоресцентные показатели листовых пластинок березы повислой в целом снижались более интенсивно через одни сутки после воздействия, а тополя пирамидального – через трое суток (рис. 1). При этом максимальные изменения по сравнению с контрольными образцами были характерны для тополя пирамидального через трое суток эксперимента с о-ксилолом.

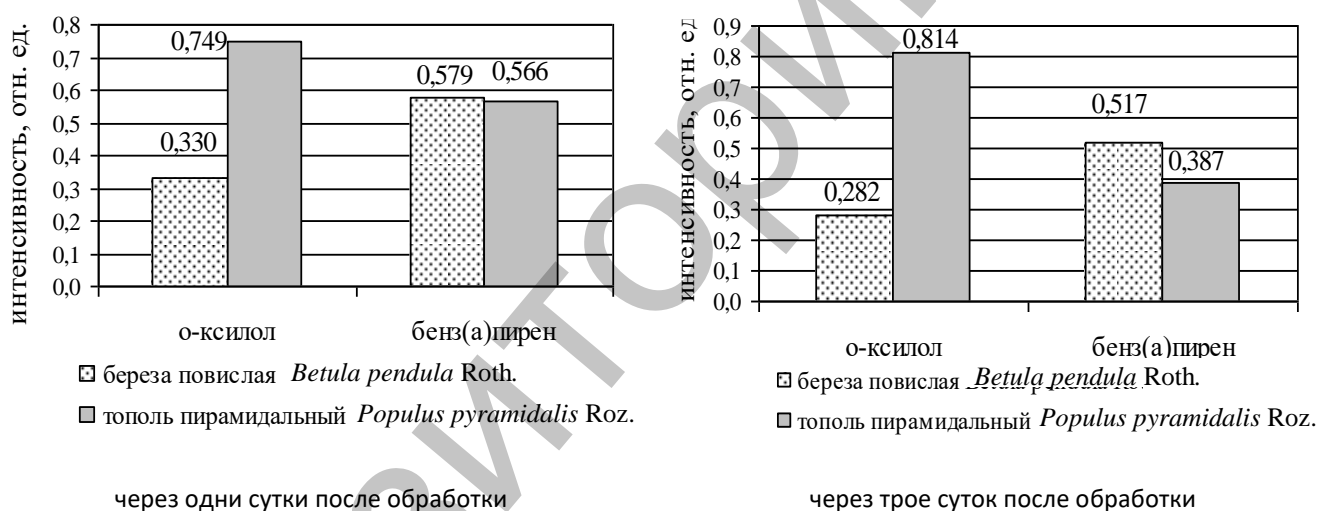


Рис. 1. Изменение параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений по сравнению с контролем

Применение раствора бенз(а)пирена привело к тому, что флуоресцентные показатели в листовых пластинках березы повислой и тополя пирамидального в целом снижались более интенсивно по сравнению с контрольными пробами через одни сутки после воздействия, тогда как через трое суток опыта воздействие бенз(а)пирена ослабевало, причем у тополя пирамидального более интенсивно по сравнению с березой повислой. Максимальные изменения по сравнению с контрольными образцами при воздействии бенз(а)пирена были характерны для березы повислой через одни сутки. В целом с учетом сравнения экспериментальных саженцев древесных растений, обработанных о-ксилолом и бенз(а)пиреном, с контролем максимальные изменения параметров флуоресценции отмечены для растворов о-ксилола.

В результате количественной оценки влияния изученных ароматических углеводов на параметры флуоресценции хлорофилла *a* экспериментальных саженцев древесных растений через одни и трое суток получено, что после обработки о-ксилолом флуоресцентные показатели исследуемых саженцев снижались более интенсивно через трое суток эксперимента, тогда как влияние бенз(а)пирена у тополя пирамидального приводило к их снижению уже через одни сутки после воздействия, а у березы повислой – через трое суток (рис. 2).

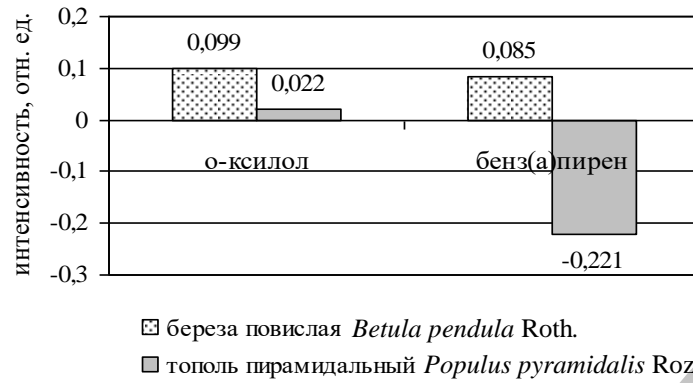


Рис. 2. Изменение параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений за период эксперимента (одни–трое суток)

При этом наиболее существенные различия между параметрами, зарегистрированными через одни и трое суток, были характерны для тополя пирамидального. В целом с учетом сравнения экспериментальных саженцев древесных растений в течение времени опыта максимальные изменения параметров флуоресценции отмечены в случае использования растворов бенз(а)пирена.

Широко применяемыми параметрами для анализа особенностей функционирования фотосистемы II фотосинтеза являются фотохимическое (*qP*) и нефотохимическое (*qN*) тушения флуоресценции хлорофилла *a*. В этой связи интерес представляют графики кинетики параметров *qP* и *qN* при импульсной модуляции освещения у контрольных саженцев и образцов, подвергнутых обработке (рис. 3).

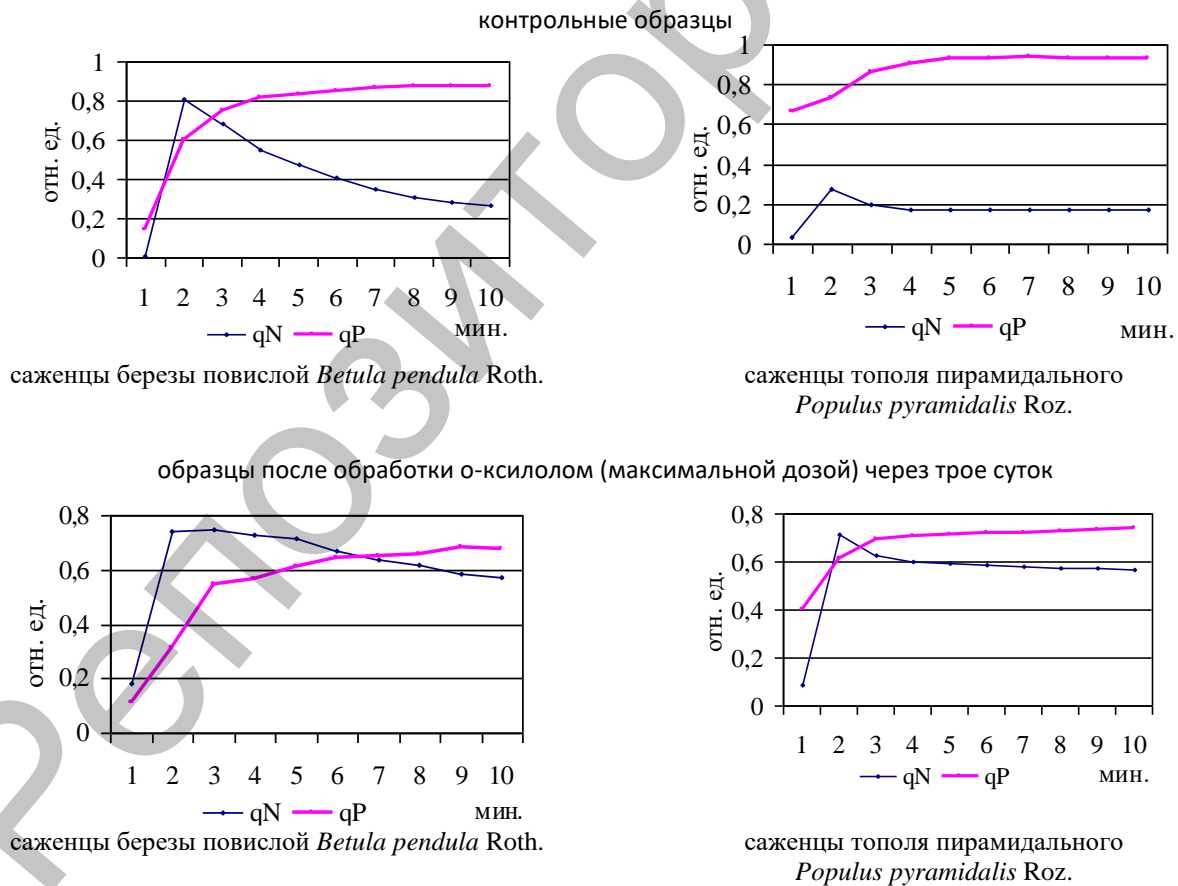


Рис. 3. Кинетика фотохимического (*qP*) и нефотохимического (*qN*) тушения флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений (контрольных и после обработки максимальной дозой o-ксилола через трое суток)

Характер кривых фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения флуоресценции хлорофилла a в листьях саженцев, несмотря на сходные тенденции изменения количественных параметров в условиях опыта по сравнению с контролем, различался у березы повислой и тополя пирамидального. Это проявлялось в том, что у березы повислой в контроле величина qP возрастала, а значение qN снижалось достаточно быстро при освещении листовых пластинок после их пребывания в темноте, тогда как в опытных образцах кинетика изменения параметров фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения флуоресценции была более медленной по сравнению с контролем. Ответная реакция тополя пирамидального как в контрольных, так и в опытных образцах имела другой вид. Это выражалось в отсутствии точек пересечения кривых qP и qN в контроле, тогда как в опыте на начальных этапах освещения листовых пластинок после темноты наблюдались достаточно быстрое достижение qP и qN определенных уровней и дальнейшее их стремление к итоговым величинам, при нахождении в течение оставшегося времени в области этих уровней. Также отмечались различия между характером кривых фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения флуоресценции хлорофилла a в листьях саженцев в случае с растворами бенз(а)пирена. Следует отметить, что поскольку расход поглощенной световой энергии в процессе фотосинтеза предусматривает кроме этих двух параметров еще испускание ее в виде кванта света (флуоресценция F), то в дальнейших исследованиях нами будет проведен сравнительный анализ кинетики кривых минимальной и максимальной флуоресценции хлорофилла a у различных видов древесных саженцев.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента были выявлены не только количественные различия параметров флуоресценции хлорофилла a саженцев древесных растений двух видов по сравнению с контролем и с течением времени действия используемых соединений, но и отличительные особенности кривых кинетики фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения опытных и контрольных образцов.

Заключение. В результате проведенного эксперимента с применением метода РАМ-флуориметрии с целью оценки воздействия на параметры активности фотосистемы II фотосинтеза саженцев двух видов древесных растений различных доз о-ксилола и бенз(а)пирена в условиях эксперимента установлено, что в случае воздействия растворов о-ксилола максимальные изменения параметров флуоресценции с учетом сравнения экспериментальных саженцев с контролем отмечены у тополя пирамидального через трое суток. Обработка бенз(а)пиреном обусловила максимальные изменения по сравнению с контрольными образцами у березы повислой через одни сутки. При сравнении количественных различий по отношению к контрольным образцам выявлено наиболее сильное влияние растворов о-ксилола в отличие от бенз(а)пирена.

В результате количественной оценки влияния изученных ароматических углеводородов через одни и трое суток получено, что после обработки о-ксилолом флуоресцентные показатели исследуемых саженцев снижались более интенсивно через трое суток эксперимента, тогда как влияние бенз(а)пирена у тополя пирамидального приводило к их снижению уже через одни сутки после воздействия, а у березы повислой – через трое суток. При этом наиболее существенные различия между параметрами, зарегистрированными через одни и трое суток, были характерны для тополя пирамидального, а среди двух использованных соединений наиболее длительно действующим в течение времени эксперимента явился о-ксилол.

Также в процессе исследований установлены отличительные особенности кривых кинетики фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения опытных и контрольных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабашникова, Л.Ф. Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков / Л.Ф. Кабашникова. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 327 с.
2. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Н.С. Касимов [и др.]. – М.: ИП Филимонов М.В., 2014. – 560 с.
3. Сергейчик, С.А. Влияние формальдегида (НСНО) на флуоресценцию хлорофилла, содержание фотосинтетических пигментов, белков и активность пероксидазы древесных растений / С.А. Сергейчик // Экологический вестник. – 2012. – № 1. – С. 16–24.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь «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» от 08.11.2016 № 113.
10. Krause, G.N. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Ann. Rev. / G.N. Krause, E. Wels // Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 1991. – Vol. 42. – P. 313–349.

11. Rochacek, K. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters and some application / K. Rochacek, M. Bartak // *Photosynthetica*. – 1999. – Vol. 37. – P. 339–363.
12. Korneev, D.Ju. Informacionnie vozmozhnosti metoda indukcii fluorescencii (Information capabilities of the fluorescence induction method) / D.Ju. Korneev. – Kiev: «Albatros», 2002. – 188 p.

REFERENCES

1. Kabashnikova L.F. *Fotosinteticheski apparat i potentsial produktivnosti khlebnykh zlakov* [Photosynthetic Apparatus and the Productivity Potential of Cereals], Minsk, Belarus. navuka, 2011, 327 p.
2. Kasimov N.S. *Regiony i goroda Rossii: integralnaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Regions and Cities of Russia: an Integrated Assessment of the Ecological State], M.: IP Filimonov M.V., 2014, 560 p.
3. Sergeychik S.A. *Ekologicheski vestnik* [Ecological Bulletin], 2012, 1, pp. 16–24.
4. Aliyeva M.Yu. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, 1(3), pp. 701–704.
5. Pinyaskina E.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, 3(2), pp. 762–764.
6. Orekhov D.I., Kozlov Yu.P. *Vestnik RUDN* [Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University], 2010, 4, pp. 23–28.
7. Pinyaskina E.V., Mamayev A.T. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, 1(3), pp. 788–791.
8. Lankin A.V. *Mekhanizmy toksicheskogo deistviya politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov na fotosinteticheski apparat: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk: 03.01.05* [Mechanisms of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Toxic Effect on the Photosynthetic Apparatus: PhD (Biology) Dissertation Abstract], Institute of Plant Physiology of RAS, Moscow, 2016, 22 p.
9. *Postanovleniye Ministerstva zdravoohraneniya Respubliki Belarus "Ob utverzhdenii i vvedenii v deistviye normativov predelno dopustimyykh kontsnratsii zagriazniayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh e i orientirovochno bezopasnykh urovnei vozdeistviya zagriazniayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh e naseleennykh punktov i mest massovogo otdykha naseleniya" ot 08.11.2016 № 113* [Decree of the Republic of Belarus Health Ministry "On the Approval and Enactment of Standards for Maximum Permissible Concentrations of Pollutants in the Air and Tentatively Safe Levels of Exposure to Pollutants in the Air of Settlements and Places of Public Recreation" of 08.11.2016 № 113].
10. Krause, G.N. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Ann. Rev. / G.N. Krause, E. Wels // Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* – 1991. – Vol. 42. – P. 313–349.
11. Rochacek, K. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters and some application / K. Rochacek, M. Bartak // *Photosynthetica*. – 1999. – Vol. 37. – P. 339–363.
12. Korneev, D.Ju. Informacionnie vozmozhnosti metoda indukcii fluorescencii (Information capabilities of the fluorescence induction method) / D.Ju. Korneev. – Kiev: "Albatros", 2002. – 188 p.

Поступила в редакцию 02.09.2019

Адрес для корреспонденции: e-mail: tut-3@mail.ru – Тюлькова Е.Г.