

УДК 574.24

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Е. Г. ТЮЛКОВА¹⁾

¹⁾Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации,
пр. Октября, 50, 246029, г. Гомель, Беларусь

Исследуются направления адаптивных реакций наиболее распространенных древесных растений г. Гомеля трех возрастных групп при их произрастании в техногенных условиях. Получено, что береза повислая *Betula pendula* Roth. и клен остролистный *Acer platanoides* L. при более высокой концентрации пигментов в техногенных условиях у всех возрастных групп характеризуются менее эффективным функционированием фотосинтетического аппарата. Липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. демонстрирует тенденцию снижения концентрации пигментов фотосинтеза в техногенной среде, уменьшения здесь величины фотохимического тушения флуоресценции и роста тепловой диссипации энергии, что может негативно сказаться на выживаемости растений под влиянием выбросов промышленных предприятий. Тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz. в исследуемых возрастных категориях характеризуется различными изменениями в функционировании фотосинтетического аппарата, поэтому на данном этапе какой-либо однозначной тенденции адаптивной стратегии выявить не удалось.

Ключевые слова: береза повислая *Betula pendula* Roth.; клен остролистный *Acer platanoides* L.; тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz.; липа мелколистная *Tilia cordata* Mill.; фотосинтетические пигменты; активность фотосинтеза.

FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF WOODY PLANTS PHOTOSYNTHETIC SYSTEM IN TECHNOGENIC CONDITIONS

E. G. TULKOVA^a

^aBelarusian Trade and Economics University of Consumer Cooperatives
50 Akciabra Avenue, Gomel 264029, Belarus

The article investigates the adaptive reactions of the most common Gomel city woody plants of three age groups in their technogenic conditions growth. The silver birch *Betula pendula* Roth. and maple acuminate *Acer platanoides* L. in all age groups is characterized by less effective functioning of the photosynthetic apparatus at a higher pigments concentration under the technogenic conditions. Small-leaved linden *Tilia cordata* Mill. demonstrates a tendency to reduce the photosynthesis pigments concentration in technogenic environment, to reduce here the magnitude of fluorescence photochemical quenching and the growth of thermal energy dissipation, which can adversely affect the survival of plants under the industrial emissions influence. Lombardy poplar *Populus pyramidalis* Roz. in the studied age categories is characterized by various changes in the photosynthetic apparatus functioning, so at this stage any unambiguous trend of adaptive strategy could not be identified.

Key words: birch hanging *Betula pendula* Roth.; norway maple *Acer platanoides* L.; lombardy poplar *Populus pyramidalis* Roz.; small-leaved linden *Tilia cordata* Mill.; photosynthetic pigments; photosynthesis activity.

Образец цитирования:

Тюлькова Е. Г. Функциональные особенности фотосинтетической системы древесных растений в техногенных условиях // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2019. № 1. С. 32–39.

For citation:

Tulkova E. G. Functional characteristics of woody plants photosynthetic system in technogenic conditions. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2019. No. 1. P. 32–39 (in Russ.).

Автор:

Елена Григорьевна Тюлькова – кандидат биологических наук, доцент кафедры товароведения.

Author:

Elena G. Tulkova, PhD(biology), associate professor at the department of commodity research.
tut-3@mail.ru

Введение

За последние годы в Республике Беларусь на фоне снижения общего объема выбросов наблюдается рост количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников [1]. Кроме того, за 2011–2017 гг. на Гомельскую обл. приходится рост среднегодовых концентраций диоксида серы, оксида углерода, оксида азота, углеводов, что впоследствии может негативно сказаться на процессе роста и развития растительности [2–6].

Одной из важнейших проблем фотосинтетических исследований на современном этапе является изучение механизмов адаптации фотосинтетического аппарата растений при развитии в стрессовых условиях. В этом смысле древесные растения различных возрастных групп, произрастающие в окружении крупных промышленных предприятий г. Гомеля, являются удобным объектом.

Цель исследования – оценка эффективности функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений различных возрастных групп при их произрастании в техногенных и фоновых условиях на основе сравнительного количественного изучения состава пигментов и параметров активности фотосинтеза.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – листья местных древесных растений, разделенных на три возрастные группы (до 20 лет; 20–30 лет; более 30 лет): береза повислая *Betula pendula* Roth., клен остролистный *Acer platanoides* L., тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz., липа мелколистная *Tilia cordata* Mill.

Пробы листьев отбирали в окружении наиболее крупных промышленных предприятий Гомеля: ОАО «Гомельский химический завод» и ОАО «Гомельстекло». Фоновыми условиями явилась часть территории национального парка «Припятский» (Хобненское лесничество), максимально приближенная к Гомелю и свободная от влияния промышленной деятельности и интенсивного транспорта.

Отбор листьев проводили в течение вегетационного периода (июль 2018 г.) с отдельно стоящих деревьев (не менее 3–5 в каждой точке), находящихся в примерно сходных климатических условиях произрастания, с высоты 1,5 м.

Среднюю концентрацию хлорофилла a , b и каротиноидов (использовали по 3 параллельных определения) вычисляли по формулам 1–4 в вытяжках из навески сырых листьев массой 100–150 мг в 100%-ном ацетоне:

$$C_a = 9,784D_{662} - 0,99D_{644}, \quad (1)$$

$$C_b = 21,426D_{644} - 4,650D_{662}, \quad (2)$$

$$C_a + C_b = 5,134D_{662} + 20,436D_{644}, \quad (3)$$

$$C_k = 4,695D_{440,5} - 0,268C_{a+b}, \quad (4)$$

где C_a , C_b , C_k – средняя концентрация хлорофилла a , b и каротиноидов в вытяжке сырых листьев объектов исследования (мг/дм³); $D_{440,5}$, D_{644} , D_{662} – оптическая плотность при длинах волн 440,5 нм, 644 нм и 662 нм.

Параметры активности функционирования фотосинтетического аппарата определяли с помощью РАМ-флуориметра. Использование такого оборудования позволяет определить выход флуоресценции путем модуляции амплитуды измеряющего светового пучка в микросекундном диапазоне импульсов с параллельным обнаружением возбуждаемой флуоресценции в присутствии рассеянного света. Для оценки активности функционирования фотосинтетического аппарата оценивали базовую флуоресценцию F_0 ; максимальную флуоресценцию F_m ; потенциальные квантовые выходы фотохимических реакций второй фотосистемы F_v / F_m , F_v / F_0 ; эффективный квантовый выход фотохимических реакций второй фотосистемы $Y(II)$; скорость фотосинтетического электронного транспорта $ETR(II)$; нефотохимическое и фотохимическое тушение флуоресценции qN и qP ; количество открытых реакционных центров qL .

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка функционального состояния фотосинтетического аппарата исследуемых древесных растений в условиях влияния техногенных элементов выбросов промышленных предприятий невозможна без количественного анализа состава фотосинтетических пигментов.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что концентрация хлорофилла в листьях березы повислой *Betula pendula* Roth. и клена остролистного *Acer platanoides* L. всех изучаемых возрастных групп в фоновых условиях меньше по сравнению с пробами деревьев, произрастающих в окружении ОАО «Гомельский химический завод» и ОАО «Гомельстекло». Возможно, что в этом случае техногенное влияние выбросов

промышленных предприятий явилось причиной увеличения концентрации пигментов фотосинтеза в качестве ответной реакции фотосинтетической системы древесных растений на стрессовое воздействие.

Тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz. и липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. с учетом возрастных групп по-разному демонстрируют адаптивные реакции к произрастанию в техногенных условиях. Так, липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. характеризуется снижением концентрации хлорофилла в пробах из промышленных зон по сравнению с фоновыми условиями. Вероятно, что на эффективность функционирования ассимиляционного аппарата могут оказывать влияние индивидуальные особенности организма. Следует отметить, липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. является достаточно чувствительным видом к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды.

Таблица 1

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений

Table 1

Content of photosynthetic pigments in woody plants leaves

Исследуемые древесные растения	Возраст древесных растений, лет	Место отбора проб								
		ОАО «Гомельский химический завод»			ОАО «Гомельстекло»			национальный парк «Припятский» (фоновые условия)		
		концентрация фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы								
		Хл a	Хл b	Car	Хл a	Хл b	Car	Хл a	Хл b	Car
Береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.	более 30	0,924± 0,0003	0,226± 0,0001	0,600± 0,0001	1,076± 0,0002	0,401± 0,0001	0,627± 0,0005	0,775± 0,0005	0,146± 0,0002	0,741± 0,0005
	20–30	0,878± 0,0002	0,198± 0,0001	0,623± 0,0002	1,326± 0,0002	0,536± 0,0002	0,771± 0,0006	0,456± 0,0004	0,070± 0,0003	0,481± 0,0003
	до 20	0,534± 0,0001	0,113± 0,0002	0,476± 0,0001	1,060± 0,0004	0,321± 0,0001	0,595± 0,0002	0,345± 0,0003	0,078± 0,0004	0,375± 0,0002
Клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.	более 30	1,406± 0,0005	0,428± 0,0004	0,762± 0,0003	1,666± 0,0001	0,668± 0,0002	1,056± 0,0001	0,924± 0,0007	0,295± 0,0005	0,598± 0,0004
	20–30	1,872± 0,0002	0,787± 0,0005	1,041± 0,0001	2,324± 0,0005	0,927± 0,0005	1,484± 0,0001	1,046± 0,0008	0,271± 0,0006	0,720± 0,0002
	до 20	1,977± 0,0001	0,796± 0,0004	1,037± 0,0002	2,458± 0,0004	1,001± 0,0008	1,424± 0,0002	1,290± 0,0008	0,526± 0,0004	0,772± 0,0002
Тополь пирамидальный <i>Populus pyramidalis</i> Roz.	более 30	0,391± 0,0002	0,134± 0,0001	0,319± 0,0004	0,164± 0,0001	0,073± 0,0001	0,114± 0,0002	0,346± 0,0001	0,102± 0,0001	0,312± 0,0001
	20–30	0,293± 0,0002	0,106± 0,0004	0,207± 0,0002	образцы отсутствуют			0,338± 0,0004	0,121± 0,0001	0,276± 0,0003
	до 20	образцы отсутствуют						0,292± 0,0001	0,112± 0,0002	0,220± 0,0004
Липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.	более 30	0,718± 0,0003	0,220± 0,0005	0,387± 0,0001	1,538± 0,0008	0,752± 0,0002	0,848± 0,0002	1,861± 0,0007	2,530± 0,0008	0,890± 0,0002
	20–30	0,327± 0,0004	0,126± 0,0006	0,227± 0,0002	1,520± 0,0007	0,705± 0,0003	0,775± 0,0005	0,621± 0,0004	0,174± 0,0001	0,364± 0,0001
	до 20	0,688± 0,0004	0,186± 0,0003	0,349± 0,0001	1,218± 0,0008	0,568± 0,0004	0,619± 0,0006	1,287± 0,0008	0,496± 0,0002	0,650± 0,0003

Тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz. с учетом места отбора проб и возраста растений характеризуется неоднозначной тенденцией изменения содержания хлорофилла.

У представителей более старшей возрастной группы (более 30 лет) отмечалось повышенное содержание пигментов в пробах с территории ОАО «Гомельский химический завод» и пониженное – с территории ОАО «Гомельстекло», тогда как в пробах растений возраста 20–30 лет концентрация пигментов в техногенной зоне была ниже по сравнению с фоновыми условиями.

Согласно литературным данным, в стрессовых условиях процесс фотосинтеза протекает наиболее интенсивно: увеличивается концентрация хлорофиллов а и b и каротиноидов.

В наших исследованиях такая закономерность характерна для березы повислой *Betula pendula* Roth. и клена остролистного *Acer platanoides* L. всех изучаемых возрастных групп, тогда как для липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. отмечалось снижение концентрации каротиноидов в техногенной среде

аналогично уменьшению содержания хлорофилла. У тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. наблюдалось как незначительное снижение концентрации каротиноидов в фоновых условиях (возрастная группа – более 30 лет), так и ее рост (возрастная группа – 20–30 лет).

Следует отметить, что содержание фотосинтетических пигментов в пределах одного вида несколько различается как в фоновых условиях, так и при произрастании в окружении промышленных предприятий у представителей различных возрастных групп.

При этом все исследуемые растения, за исключением клена остролистного *Acer platanoides* L., в большинстве случаев демонстрируют тенденцию роста концентрации хлорофилла и каротиноидов по мере увеличения возраста растения. Возможно, это происходит при формировании у растений более выраженных и интенсивных защитных механизмов, связанных с возрастом.

Результаты анализа дисперсионных комплексов, включающих концентрацию хлорофилла и каротиноидов проб древесных растений, произрастающих на территориях с техногенной нагрузкой и в фоновых условиях, свидетельствуют о том, что значение F-критерия превышает F-критическое для всех исследованных образцов во всех случаях (для березы повислой *Betula pendula* Roth. $F_{\text{факт.}} = 15,23$; клена остролистного *Acer platanoides* L. – 18,99; тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. – 34,06; липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. – 2,76; $F_{\text{критич.}}(11, 24) = 2,22$ при $p \leq 0,05$). Таким образом, концентрация пигментов фотосинтеза древесных растений статистически достоверно различается при действии техногенного загрязнения и в фоновых условиях.

Использование оптических методов для исследования активности процесса фотосинтеза растений характеризуется рядом преимуществ, поскольку они являются неразрушающими, достаточно информативными и позволяют в течение короткого времени получать данные о состоянии фотосинтетического аппарата растений.

В таблицах 2–5 представлены результаты определения параметров эффективности процесса фотосинтеза листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* Roth., клена остролистного *Acer platanoides* L., тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz. и липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. различных возрастных групп.

Таблица 2

Параметры активности фотосинтетического аппарата березы повислой *Betula pendula* Roth.

Table 2

Parameters of photosynthetic apparatus activity of birches hanging *Betula pendula* Roth.

Место отбора проб	Параметры активности фотосинтетического аппарата								
	F_0	F_m	F_v/F_m	F_v/F_0	$Y(II)$	ETR (II)	qN	qP	qL
до 20 лет									
1	0,703	3,214	0,781	3,572	0,466	26,0	0,686	0,723	0,474
2	0,730	3,024	0,759	3,142	0,473	26,0	0,657	0,717	0,463
3	0,657	3,765	0,825	4,731	0,473	31,1	0,580	0,801	0,540
20–30 лет									
1	0,802	3,856	0,792	3,808	0,461	25,3	0,645	0,685	0,415
2	0,810	4,580	0,823	4,654	0,469	25,8	0,686	0,716	0,466
3	0,622	2,511	0,752	3,037	0,524	28,8	0,598	0,752	0,480
более 30 лет									
1	0,705	2,828	0,751	3,011	0,478	26,3	0,657	0,722	0,468
2	0,727	2,889	0,748	2,974	0,584	32,1	0,515	0,818	0,562
3	0,653	3,084	0,788	3,723	0,515	28,4	0,622	0,758	0,501

Примечания. Здесь и далее в табл. 2–4: F_0 – базовая флуоресценция; F_m – максимальная флуоресценция; F_v/F_m , F_v/F_0 – потенциальный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы 2; $Y(II)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы 2; ETR (II) – скорость фотосинтетического электронного транспорта; qN и qP – нефотохимическое и фотохимическое тушение флуоресценции; qL – количество открытых реакционных центров; 1 – ОАО «Гомельский химический завод»; 2 – ОАО «Гомельстекло»; 3 – фоновые условия.

Результаты определения величины базовой флуоресценции хлорофилла F_0 листьев исследуемых древесных растений, регистрируемой РАМ флуориметром на слабом свете, свидетельствуют о том, что в половине случаев интенсивность базовой флуоресценции пигментов ниже в листовых пластинках в фоновых условиях, чем в техногенных. При этом в большей степени такая тенденция характерна для березы

повислой *Betula pendula* Roth. и липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. (табл. 2 и 5). Начальная величина квантового выхода флуоресценции хлорофилла F_0 характеризует базовую интенсивность флуоресценции хлорофилла при действии на него слабого света после периода адаптации листа в темноте. В наших исследованиях техногенное влияние выбросов промышленных предприятий способствовало росту начального значения флуоресценции хлорофилла в половине рассматриваемых случаев.

Максимальная интенсивность флуоресценции, достигаемая при высокой интенсивности воздействующего света, отражает динамическое равновесие процесса восстановления первичного акцептора электронов фотосистемы 2 и последующего его окисления следующими переносчиками электрона. В результате исследований установлено, что максимальная флуоресценция F_m большинства отобранных образцов фоновых условий превышает аналогичное значение в техногенной зоне, что характеризует более интенсивное восстановление первичного акцептора электронов фотосистемы 2 и снижение потока электронов.

Таблица 3

Параметры активности фотосинтетического аппарата клена остролистного *Acer platanoides* L.

Table 3

Parameters of photosynthetic apparatus activity of maple holly *Acer platanoides* L.

Место отбора проб	Параметры активности фотосинтетического аппарата								
	F_0	F_m	F_v / F_m	F_v / F_0	Y (II)	ETR (II)	qN	qP	qL
до 20 лет									
1	0,767	1,864	0,589	1,430	0,340	18,7	0,744	0,588	0,375
2	0,919	2,861	0,679	2,113	0,284	15,7	0,685	0,456	0,239
3	0,878	2,348	0,626	1,674	0,467	25,7	0,620	0,747	0,526
20–30 лет									
1	1,014	4,764	0,787	3,698	0,354	25,0	0,742	0,672	0,443
2	1,094	4,334	0,748	2,962	0,334	18,4	0,699	0,558	0,337
3	0,695	1,392	0,501	1,003	0,456	19,6	0,590	0,696	0,491
более 30 лет									
1	0,849	2,506	0,661	1,952	0,421	23,2	0,605	0,640	0,378
2	0,924	3,095	0,701	2,350	0,265	14,6	0,659	0,416	0,205
3	0,993	4,415	0,775	3,446	0,458	25,2	0,622	0,736	0,509

Данные таблиц 2–5 свидетельствуют о том, что изменения значения потенциальных квантовых выходов фотохимических реакций второй фотосистемы F_v / F_m , F_v / F_0 листовых пластинок исследуемых древесных представителей характеризовались следующими тенденциями: в одной половине случаев величины потенциальных квантовых выходов фотохимических реакций в фоновых условиях превышали данные показатели у образцов из техногенной зоны; в другой половине – наоборот, были ниже в фоновых условиях по сравнению с техногенной средой. Следует отметить, что понятие квантового выхода было введено в фотохимии с целью характеристики соотношения количества прореагировавших молекул вещества к общему количеству поглощенных квантов света.

Таблица 4

Параметры активности фотосинтетического аппарата тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz.

Table 4

Parameters of photosynthetic apparatus activity of lombardy poplar *Populus pyramidalis* Roz.

Место отбора проб	Параметры активности фотосинтетического аппарата								
	F_0	F_m	F_v / F_m	F_v / F_0	Y (II)	ETR (II)	qN	qP	qL
до 20 лет									
3	0,723	2,952	0,755	3,083	0,418	23,0	0,603	0,605	0,322
20–30 лет									
1	0,602	3,718	0,838	5,176	0,652	35,9	0,285	0,816	0,471
3	0,686	3,850	0,822	4,612	0,565	31,1	0,620	0,823	0,593
более 30 лет									
1	0,632	3,385	0,813	4,356	0,223	16,3	0,429	0,554	0,345
2	0,962	4,725	0,796	3,912	0,335	18,4	0,727	0,555	0,331
3	0,632	3,980	0,841	5,297	0,413	34,3	0,315	0,780	0,416

Из научных источников известно, что значение потенциального квантового выхода фотохимических реакций пропорционально доле активных реакционных центров фотосистемы 2 и может снижаться в неблагоприятных условиях среды произрастания растения [2; 6]. В наших исследованиях только у липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. (возрастная группа до 20 лет) отмечалось увеличение потенциального квантового выхода в техногенной среде при росте количества активных реакционных центров. В остальных вариантах повышенный потенциальный квантовый выход не сопровождался увеличением открытых реакционных центров, что возможно объясняется снижением общего количества поглощаемой энергии молекулами хлорофилла или фотохимического реакционного центра по причине их деформации.

Таблица 5

Параметры активности фотосинтетического аппарата липы мелколистной *Tilia cordata* Mill.

Table 5

Parameters of photosynthetic apparatus activity of small-leaved linden *Tilia cordata* Mill.

Место отбора проб	Параметры активности фотосинтетического аппарата								
	F ₀	F _m	F _v / F _m	F _v / F ₀	Y (II)	ETR (II)	qN	qP	qL
до 20 лет									
1	0,855	3,950	0,784	3,620	0,584	32,1	0,426	0,828	0,586
2	0,690	3,784	0,818	4,484	0,412	22,6	0,617	0,606	0,330
3	0,827	3,341	0,752	3,040	0,460	25,3	0,535	0,670	0,389
20–30 лет									
1	0,793	3,265	0,757	3,117	0,393	21,5	0,586	0,576	0,305
2	0,856	4,513	0,810	4,272	0,409	22,5	0,606	0,607	0,336
3	0,835	3,331	0,749	2,989	0,525	28,9	0,501	0,752	0,479
более 30 лет									
1	0,783	2,404	0,674	2,070	0,476	26,2	0,566	0,728	0,480
2	0,860	4,366	0,803	4,077	0,428	23,6	0,608	0,648	0,383
3	0,481	1,310	0,633	1,723	0,706	38,8	0,187	0,921	0,731

Что касается значения эффективного квантового выхода фотохимических реакций фотосистемы 2, то только в двух исследуемых вариантах (тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz., возрастная группа 20–30 лет; липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., возрастная группа до 20 лет) этот показатель был ниже в фоновых условиях по сравнению с техногенной средой, что указывает на отрицательное влияние техногенных элементов и соединений промышленных эмиссий на функционирование фотосинтетического аппарата растений.

В настоящее время известно, что при попадании и поглощении квантов света молекулы хлорофилла переходят в возбужденное состояние, при этом энергия возбуждения молекул кроме флуоресценции, может использоваться на фотохимические преобразования (фотохимическое тушение) или испускаться в виде тепла (нефотохимическое тушение). Поэтому фотосинтез, тепло и флуоресценция являются конкурентными процессами, а оценка эффективности функционирования фотосинтетического аппарата растений, учитывая комплекс этих показателей, необходима и может быть использована с целью исследования адаптивных механизмов растений к произрастанию в стрессовых условиях.

В результате сравнительной оценки значений фотохимического и нефотохимического тушения поглощенной энергии в листьях древесных растений установлено, что при произрастании в фоновых условиях фотохимическое тушение больше при сниженном рассеивании энергии в виде тепла, тогда как в техногенной среде – фотохимическое преобразование энергии понижено при повышении теплового преобразования квантов поглощенной энергии света. Исключение составили клен остролистый *Acer platanoides* L. (возрастная группа – более 30 лет) в случае нефотохимического тушения (табл. 3); тополь пирамидальный *Populus pyramidalis* Roz. (возрастная группа – 20–30 лет) по аналогичному параметру (табл. 4) и липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. (возрастная группа – до 20 лет) с учетом значений фото- и нефотохимического тушения (табл. 5). Таким образом, стрессовые условия среды произрастания оказали угнетающее влияние на функционирование фотосинтетического аппарата исследуемых древесных растений.

На рис. 1 представлена сравнительная кинетика процессов фотохимического и нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла листовых пластинок древесных растений, произрастающих в техногенных и фоновых условиях (на примере березы повислой *Betula pendula* Roth. и клена остролистного *Acer platanoides* L.).

Анализ результатов кинетики параметров qP и qN свидетельствует о наличии различий между ними при произрастании растений в различных условиях.

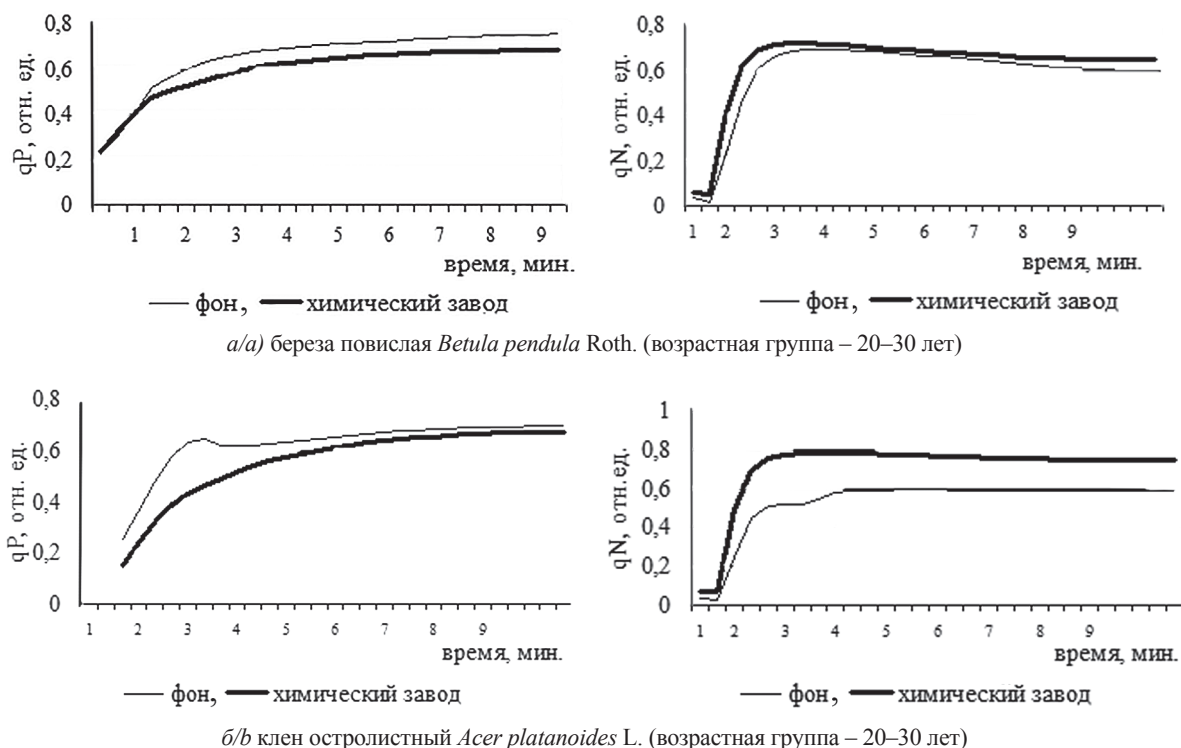


Рис. 1. Кинетика фотохимического (qP) и нефотохимического (qN) тушения флуоресценции хлорофилла в листьях а) березы повислой *Betula pendula* Roth. и б) клена остролистного *Acer platanoides* L.

Fig. 1. Kinetics of photochemical (qP) and nonphotochemical (qN) quenching chlorophyll fluorescence in the a) leaves of birch *Betula pendula* Roth. and b) maple leaf of *Acer platanoides* L.

По полученным в настоящее время данным исследований известно, что снижение показателя фотохимического преобразования энергии может происходить по причине уменьшения скорости транспорта электронов в электрон-транспортной цепи. На основе результатов исследований автора можно сделать вывод о том, что в результате произрастания в техногенных условиях в реакционных центрах растений происходят изменения, которые отрицательно сказываются на скорости передвижения электронов и интенсивности протекания фотохимических реакций.

Если сопоставить параметры активности фотосинтетического аппарата растений с концентрацией молекул хлорофилла, то получается, что у березы повислой *Betula pendula* Roth. и клена остролистного *Acer platanoides* L. при более высокой концентрации пигментов фотосинтеза в техногенных условиях у всех возрастных групп фотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла происходит менее эффективно, тогда как тепловое рассеивание энергии поглощенного света повышается. При этом скорость фотосинтетического электронного транспорта между фотосистемой 1 и 2 практически во всех случаях была выше в фоновых условиях. Таким образом, на снижение эффективности использования световой энергии на фотосинтез у березы повислой *Betula pendula* Roth. и клена остролистного *Acer platanoides* L. оказало влияние снижение скорости электронного транспорта между фотосистемами, а также возможная деформация молекул хлорофилла в условиях техногенного влияния.

Липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. в возрастных группах от 20 до 30 лет и более 30 лет демонстрирует противоположную тенденцию увеличения концентрации пигментов фотосинтеза в фоновых условиях и увеличения здесь фотохимического тушения флуоресценции, что достаточно логично для роста и развития растения в благоприятных условиях среды обитания. По тополи пирамидальному *Populus pyramidalis* Roz. необходимы более детальные исследования, возможно с привлечением других площадок для исследования, так как в возрастной категории 20–30 лет при повышенной концентрации хлорофилла в фоновых условиях наблюдали увеличение величины qP , qN и снижение $ETR(II)$. Представители группы более 30 лет при пониженном содержании хлорофилла в фоновых условиях характеризовались ростом значения qP и $ETR(II)$ и уменьшением qN . Поэтому на данном этапе какую-либо однозначную

тенденцию адаптивной стратегии с учетом изменений в функционировании фотосинтетического аппарата в стрессовых условиях выделить не представляется возможным.

Заключение

В результате оценки эффективности функционирования фотосинтетического аппарата наиболее распространенных древесных растений Гомеля трех возрастных групп выявлено два направления адаптивных механизмов при их произрастании в техногенных условиях. Береза повислая *Betula pendula* Roth. и клен остролистный *Acer platanoides* L. при более высокой концентрации хлорофилла и каротиноидов в техногенных условиях у всех возрастных групп характеризуются менее эффективным фотохимическим тушением флуоресценции хлорофилла, снижением скорости фотосинтетического электронного транспорта между фотосистемой 1 и 2 при повышении теплового рассеивания энергии поглощенного света.

Липа мелколистная *Tilia cordata* Mill. в двух возрастных группах демонстрирует противоположную тенденцию снижения концентрации пигментов фотосинтеза в техногенной среде, уменьшения здесь величины фотохимического тушения флуоресценции и роста тепловой диссипации энергии, что может негативно сказаться на выживаемости растений под влиянием выбросов промышленных предприятий.

Что касается тополя пирамидального *Populus pyramidalis* Roz., то в возрастной категории 20–30 лет при повышенной концентрации хлорофилла в фоновых условиях наблюдается увеличение величины фото- и нефотохимического тушения флуоресценции и снижение скорости электронного транспорта. Представители группы более 30 лет при пониженном содержании хлорофилла в фоновых условиях характеризовались ростом значения фотохимического тушения и скорости электронного транспорта и уменьшением рассеивания энергии в виде тепла. Поэтому на данном этапе какой-либо однозначной тенденции адаптивной стратегии выявить не удалось.

Библиографические ссылки

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь : стат. сб. Минск, 2018.
2. Кабашишникова Л. Ф. Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков. Минск, 2011.
3. Легощина О. М. Адаптивные реакции и фитоиндикационная способность древесных растений в условиях техногенного загрязнения : автореф. ... канд. биол. наук : 03.02.16. Томск, 2018.
4. Фатеева Н. Л. Дистанционная диагностика состояния растений на основе метода лазерно-индуцированной флуоресценции : автореф. ... канд. ф.-м. наук : 01.04.05. Новосибирск, 2007.
5. Лысенко В. С., Вардуни Т. В., Соьер В. Г. и др. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // Фундаментальные исследования. 2013. № 4. С. 112–120.
6. Сергейчик С. А. Влияние формальдегида (HCHO) на флуоресценцию хлорофилла, содержание фотосинтетических пигментов, белков и активность пероксидазы древесных растений // Экологический вестник. 2012. № 1. С. 16–24.

References

1. [Environmental protection in Belarus Republic : stat. comp.]. Minsk, 2018 (in Russ.).
2. Kabashnikova L. F. [The photosynthetic apparatus and cereals productivity potential]. Minsk, 2011 (in Russ.).
3. Legoshina O. M. [Adaptive response and phytoindicational ability drevtion of plants in the conditions of technogenic pollution] : author. ... kand. biol. sciences : 03.02.16. Tomsk, 2018 (in Russ.).
4. Fateeva N. L. [Remote diagnostics of plant state on the basis of laser-induced fluorescence method] : author. ... kand. f.-m. sciences : 01.04.05. Novosibirsk, 2007 (in Russ.).
5. Lysenko V. S., Varduni T. V., Sawyer V. G., at. al. [Fluorescence of plant chlorophyll as an indicator of environmental stress: theoretical basis of the method]. *Fundamental research*. 2013. No 4. P. 112–120 (in Russ.).
6. Sergeichik S. A. [Effect of formaldehyde (HCHO) on the chlorophyll fluorescence, the content of photosynthetic pigments, protein and activity of peroxidase in woody plants]. *Ecological Bulletin*. 2012. No 1. P. 16–24 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.01.2019.
Received by editorial board 09.01.2019.