

УДК 574.24

Е.Г. ТЮЛЬКОВА, канд. биол. наук, доцент
Белорусский торгово-экономический университет
потребительской кооперации,
г. Гомель, Республика Беларусь

Статья поступила 2 апреля 2019г.

АКТИВНОСТЬ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В последние годы в Республике Беларусь наблюдается рост объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников, что может негативно сказаться на росте и развитии растительности. В статье представлены результаты исследования сезонных изменений активности фотосинтетического аппарата древесных растений, произрастающих под влиянием техногенных элементов выбросов промышленных предприятий.

Ключевые слова: *техногенез, береза повислая *Betula pendula* Roth., липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., активность фотосинтетического аппарата, площадь листовой пластинки.*

TSIULKOVA Elena. G., Cand. of Biol. Sc., Assistant Professor,
Belarusian University of Trade and Economics Consumer Cooperation,
Gomel, Republic of Belarus

THE ACTIVITY OF THE WOOD PLANTS PHOTOSYNTHETIC APPARATUS IN TECHNOGENIC CONDITIONS

In recent years, the Republic of Belarus has seen an increase in emissions of pollutants into the atmosphere from stationary sources, which can adversely affect the growth and development of vegetation. The article presents the results of the seasonal changes study in the woody plants photosynthetic apparatus activity growing under the influence of industrial enterprises emissions technogenic elements.

Keywords: *technogenesis, hanging birch *Betula pendula* Roth., small-leaved linden *Tilia cordata* Mill., the photosynthetic apparatus activity, the leaf blade area.*

Введение. Зеленым насаждениям принадлежит важнейшая роль в решении приоритетных задач охраны окружающей среды, так как они выполняют фундаментальные средостабилизирующие, почвозащитные и санитарно-гигиенические функции.

Актуальными задачами современной экологической физиологии растений являются оценка устойчивости различных видов древесных растений к действию химических загрязнителей приземного слоя воздуха и изучение механизмов адаптации растений с це-

лью подбора устойчивого ассортимента растений для озеленения городов и промышленных центров [1 – 4].

В настоящее время известно, что одной из наиболее уязвимых систем растительной клетки при действии различных стрессовых факторов, в том числе техногенных элементов и соединений, является фотосинтетический аппарат. Под влиянием стрессовых факторов наблюдается угнетение активности фотосинтеза растений [5 – 9] и, как следствие, изменение морфометрических параметров

листовой пластинки [1 – 3, 10], однако мало внимания уделяется изучению особенностей функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений с учетом возрастных групп на протяжении периода вегетации, что представляет теоретический и практический интерес.

Поэтому целью работы явилось изучение параметров фотосинтетической активности наиболее распространенных видов древесных растений различных возрастных групп, произрастающих под влиянием выбросов промышленных предприятий, в течение периода вегетации.

Методика и объекты исследования. В качестве объектов для оценки активности фотосинтетического аппарата листовых пластинок были выбраны листья наиболее распространенных средообразующих представителей лиственных древесных растений – березы повислой *Betula pendula Roth.* и липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* Дополнительно исследовался один из морфометрических параметров листовой пластинки – ее площадь. Исследуемые представители были разделены на следующие возрастные группы: до 20 лет; 20 – 30 лет; более 30 лет. Возраст деревьев оценивали путем определения диаметра ствола, который делили на среднегодовой прирост.

Пробы листьев отбирали в окружении наиболее крупных промышленных предприятий г. Гомеля: ОАО «Гомельский химический завод» и ОАО «Гомельстекло». В составе выбросов этих предприятий в атмосферный воздух содержится аммиак, бензин, сероуглерод, толуол, углеводороды, а также ацетон, бензол, дихлорэтан, сероводород, этилацетат, серная кислота, альдегиды, спирты [11].

Контрольными (фоновыми) условиями явилась часть территории национального парка Припятский (Хобненское лесничество), максимально приближенная к городу Гомелю и свободная от влияния промышленной деятельности и интенсивного транспорта.

Сбор листьев проводили в течение вегетационного периода (июль – сентябрь 2018 г.) с

отдельно стоящих деревьев каждой исследуемой возрастной группы (не менее 3 – 5 в каждой точке), находящихся в примерно сходных климатических условиях произрастания, с высоты 1,5 м.

Параметры активности функционирования фотосинтетического аппарата определяли с помощью РАМ-флуориметра. Для оценки активности фотосинтеза определяли 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 .

Для определения площади листовой пластинки изображения отсканированных листьев обрабатывались с помощью *CorelDRAW X6*. Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью программы *M. Excel*.

Результаты их обсуждения. Листовой аппарат растений в силу своих морфологических особенностей (наличие воска на поверхности, шероховатость поверхности, пассивная диффузия загрязнителей через устьица и др.) может выступать в качестве своеобразного природного планшета, аккумулирующего техногенное загрязнение и отражающего интенсивность техногенного воздействия на него. Поэтому с помощью «листового анализа» достаточно эффективно можно различать степень загрязнения воздуха, почв, выделять источники загрязнения, определять зоны их действия, идентифицировать загрязняющие ингредиенты.

В таблицах 1 – 2 представлены результаты определения параметров эффективности процесса фотосинтеза листовых пластинок березы повислой *Betula pendula Roth.* и липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* различных возрастных групп.

Таблица 1 – Параметры активности фотосинтетического аппарата березы повислой *Betula pendula Roth.*

Место отбора проб	Время 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	июль	0,729± 0,0008	3,908± 0,0218	0,811± 0,0009	4,345± 0,0242	0,473± 0,0001	26,0± 0,0021	0,686± 0,0001	0,723± 0,0001	0,474± 0,0001
	сент.	0,611± 0,0010	3,040± 0,0235	0,794± 0,0014	3,946± 0,0304	0,574± 0,0001	31,6± 0,0036	0,535± 0,0001	0,799± 0,0001	0,527± 0,0001
2	июль	0,621± 0,0002	1,524± 0,0011	0,593± 0,0002	1,455± 0,0010	0,460± 0,0001	25,3± 0,0072	0,550± 0,0002	0,695± 0,0001	0,435± 0,0001
	сент.	0,657± 0,0001	3,792± 0,0033	0,827± 0,0001	4,768± 0,0042	0,366± 0,0001	31,1± 0,0021	0,580± 0,0001	0,800± 0,0001	0,540± 0,0001
3	июль	0,766± 0,0011	3,840± 0,0256	0,796± 0,0012	3,993± 0,0267	0,473± 0,0001	26,0± 0,0036	0,657± 0,0001	0,717± 0,0001	0,463± 0,0001
	сент.	0,675± 0,0004	1,001± 0,0009	0,325± 0,0002	0,482± 0,0005	0,521± 0,0001	28,7± 0,0055	0,469± 0,0002	0,766± 0,0001	0,513± 0,0001
20 – 30 лет										
1	июль	0,821± 0,0007	4,427± 0,0180	0,813± 0,0007	4,385± 0,0178	0,523± 0,0001	28,8± 0,0021	0,598± 0,0001	0,752± 0,0001	0,480± 0,0001
	сент.	0,702± 0,0004	3,779± 0,0101	0,814± 0,0004	4,381± 0,0118	0,647± 0,0001	35,6± 0,0021	0,391± 0,0001	0,854± 0,0001	0,586± 0,0001
2	июль	0,658± 0,0011	3,313± 0,0251	0,796± 0,0014	4,011± 0,0305	0,461± 0,0001	25,3± 0,0021	0,645± 0,0001	0,685± 0,0001	0,415± 0,0001
	сент.	0,555± 0,0009	1,330± 0,0051	0,581± 0,0009	1,393± 0,0054	0,513± 0,0001	28,2± 0,0072	0,579± 0,0002	0,778± 0,0001	0,545± 0,0001
3	июль	0,802± 0,0005	4,352± 0,0131	0,815± 0,0005	4,425± 0,0134	0,469± 0,0001	25,8± 0,0036	0,686± 0,0001	0,716± 0,0001	0,466± 0,0001
	сент.	0,744± 0,0010	3,935± 0,0255	0,807± 0,0011	4,268± 0,0276	0,434± 0,0001	23,9± 0,0055	0,617± 0,0001	0,623± 0,0001	0,334± 0,0001
более 30 лет										
1	июль	0,704± 0,0009	2,571± 0,0114	0,724 0,0009	2,645 0,0118	0,584± 0,0001	32,1± 0,0021	0,515± 0,0001	0,818± 0,0001	0,562± 0,0001
	сент.	0,625± 0,0016	1,687± 0,0123	0,624± 0,0016	1,684± 0,0123	0,564± 0,0001	31,1± 0,0021	0,356± 0,0001	0,835± 0,0001	0,620± 0,0001
2	июль	0,644± 0,0020	2,123± 0,0227	0,685± 0,0021	2,260± 0,0241	0,478± 0,0001	26,3± 0,0001	0,657± 0,0001	0,722± 0,0001	0,468± 0,0001
	сент.	0,838± 0,0011	4,060± 0,0251	0,790± 0,0011	3,827± 0,0237	0,556± 0,0001	30,6± 0,0036	0,487± 0,0001	0,772± 0,0001	0,487± 0,0001
3	июль	0,646± 0,0014	3,040± 0,0281	0,780 0,0017	3,669 0,0340	0,515± 0,0001	28,4± 0,0055	0,622± 0,0001	0,758± 0,0001	0,501± 0,0001
	сент.	0,640± 0,0017	2,039± 0,0168	0,679± 0,0017	2,163± 0,0178	0,470± 0,0001	25,8± 0,0091	0,691± 0,0001	0,752± 0,0001	0,532± 0,0001

Примечание – Здесь и далее в таблице 2: 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 – контрольные (фоновые) условия; 2 – ОАО «Гомельский химический завод»; 3 – ОАО «Гомельстекло».

Достоверность различий между параметрами активности фотосинтетического аппарата древесных растений, произрастающих вблизи химического завода ОАО «Гомельстекло», и контрольных условиях оценивалась с помощью дисперсионного анализа.

Результаты анализа дисперсионных комплексов, включающих значения параметров флуориметрии листовых пластинок древесных растений исследуемых возрастных групп, произрастающих на территориях с техногенной нагрузкой и контрольных условиях, свидетельствуют о том, что значение F-критерия превышают F-критическое для всех исследованных образцов во всех случаях (для березы повислой *Betula pendula Roth.* $F_{\text{факт.}}(8, 99) = 504,65 - 1454,70$; $F_{\text{крит.}}(8, 99) = 2,03$ при $p \leq 0,05$; для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* $F_{\text{факт.}}(8, 99) = 29,80 - 279,55$; $F_{\text{крит.}}(8, 99) = 2,03$ при $p \leq 0,05$). Таким образом, параметры фотосинтетической активности древесных растений статистически достоверно различаются при действии техно-

генного загрязнения и в контрольных условиях.

Начальная величина квантового выхода флуоресценции хлорофилла F_0 характеризует базовую интенсивность флуоресценции хлорофилла при открытых реакционных центрах при возбуждении тестирующим светом, не приводящим к изменению состояния фотосинтетического аппарата, после периода длительной адаптации листа в темноте. В наших исследованиях влияние выбросов промышленных предприятий способствовало росту начального значения флуоресценции хлорофилла F_0 в техногенной зоне по сравнению с контрольной территорией в половине рассматриваемых случаев на протяжении периода исследований и проявлялось наиболее часто по окончании вегетационного периода в сентябре. При этом для березы повислой *Betula pendula Roth.* эта тенденция наиболее характерна в возрастной группе до 20 лет, для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* – в возрастной группе более 30 лет (таблицы 1 – 2).

Таблица 2 – Параметры активности фотосинтетического аппарата липы мелколистной *Tilia cordata Mill.*

Место отбора проб	Время 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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
до 20 лет										
1	июль	0,860± 0,0010	4,001± 0,0207	0,782± 0,0009	3,639± 0,0188	0,460± 0,0001	25,3± 0,0021	0,535± 0,0001	0,670± 0,0001	0,389± 0,0001
	сент.	1,157± 0,0003	2,692± 0,0019	0,570± 0,0002	1,327± 0,0009	0,325± 0,0001	17,9± 0,0021	0,542± 0,0001	0,730± 0,0001	0,600± 0,0001
2	июль	0,821± 0,0020	3,433± 0,0298	0,753± 0,0018	3,148± 0,0273	0,584± 0,0001	32,1± 0,0036	0,426± 0,0001	0,828± 0,0001	0,586± 0,0001
	сент.	0,789± 0,0019	2,816± 0,0209	0,714± 0,0017	2,547± 0,0188	0,334± 0,0001	18,4± 0,0021	0,614± 0,0001	0,566± 0,0001	0,349± 0,0001
3	июль	0,671± 0,0011	3,364± 0,0251	0,795± 0,0013	3,985± 0,0298	0,412± 0,0002	22,6± 0,0091	0,617± 0,0001	0,606± 0,0002	0,330± 0,0002
	сент.	0,426± 0,0011	1,009± 0,0066	0,573± 0,0015	1,357± 0,0089	0,533± 0,0001	29,3± 0,0036	0,400± 0,0001	0,842± 0,0001	0,661± 0,0001
20 – 30 лет										
1	июль	0,869± 0,0011	3,981± 0,0204	0,779± 0,0009	3,570± 0,0182	0,525± 0,0001	28,90± 0,0072	0,501± 0,0002	0,752± 0,0001	0,479± 0,0001
	сент.	0,639± 0,0007	1,707± 0,0053	0,625± 0,0007	1,669± 0,0051	0,485± 0,0001	26,7± 0,0036	0,522± 0,0001	0,764± 0,0001	0,542± 0,0001
2	июль	0,827± 0,0011	3,995± 0,0229	0,790± 0,0010	3,814± 0,0219	0,391± 0,0001	21,5± 0,0036	0,586± 0,0001	0,577± 0,0001	0,305± 0,0001
	сент.	0,762± 0,0003	2,013± 0,0019	0,622± 0,0002	1,643± 0,0016	0,092± 0,0001	5,1± 0,0001	0,409± 0,0001	0,172± 0,0001	0,088± 0,0001

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	июль	0,839± 0,0009	4,135± 0,0209	0,795± 0,0009	3,915± 0,0198	0,409± 0,0001	22,5± 0,0036	0,606± 0,0001	0,607± 0,0001	0,336± 0,0001
	сент.	0,696± 0,0001	2,114± 0,0007	0,671± 0,0001	2,038± 0,0006	0,229± 0,0001	12,6± 0,0001	0,633± 0,0001	0,377± 0,0001	0,192± 0,0001
более 30 лет										
1	июль	0,466± 0,0005	1,210± 0,0031	0,614± 0,0006	1,593± 0,0041	0,706± 0,0001	38,8± 0,0021	0,187± 0,0001	0,921± 0,0001	0,731± 0,0001
	сент.	0,482± 0,0006	1,521± 0,0059	0,681± 0,0009	2,148± 0,0082	0,645± 0,0001	35,5± 0,0021	0,191± 0,0001	0,882± 0,0001	0,667± 0,0001
2	июль	0,747± 0,0012	2,112± 0,0095	0,644± 0,0010	1,819± 0,0082	0,476± 0,0001	26,2± 0,0072	0,566± 0,0001	0,727± 0,0001	0,480± 0,0001
	сент.	0,953± 0,0003	2,257± 0,0019	0,578± 0,0002	1,368± 0,0012	0,015± 0,0001	0,8± 0,0001	0,045± 0,0001	0,027± 0,0001	0,012± 0,0001
3	июль	0,837± 0,0014	3,908± 0,0267	0,781± 0,0013	3,648± 0,0249	0,428± 0,0001	23,6± 0,0091	0,608± 0,0001	0,648± 0,0002	0,383± 0,0001
	сент.	0,955± 0,0003	4,313± 0,0053	0,779± 0,0002	3,517± 0,0043	0,455± 0,0001	25,0± 0,0036	0,493± 0,0001	0,668± 0,0001	0,392± 0,0001

Максимальная интенсивность флуоресценции хлорофилла F_m , достигаемая при высокой интенсивности воздействующего света, приводит к полному закрытию реакционных центров после длительной адаптации пробы в темноте. В результате исследований установлено, что максимальная флуоресценция F_m большинства отобранных образцов в контрольных условиях превышает аналогичное значение в техногенной зоне. Эта тенденция наиболее выражена у березы повислой *Betula pendula Roth.* (возрастная группа до 20 лет и от 20 до 30 лет) в течение периода вегетации, тогда как для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.*, наоборот, во всех исследуемых возрастных группах наблюдается более высокое значение максимальной интенсивности флуоресценции F_m в техногенной зоне по сравнению с фоновыми условиями.

Для интерпретации полученных результатов следует отметить, что энергия солнечного света, диссипация которой происходит в фотосинтетическом аппарате, расходуется в следующих направлениях: в процессе фотосинтеза (фотохимическое тушение), на нефотохимическое тушение (переход в тепло) и испускание в виде кванта света (флуоресценция). Максимальная интенсивность флуоресценции F_m , достигаемая при высокой интенсивности воздействующего света, отражает динамическое равновесие процесса восстановления первичного акцептора электронов фотосистемы 2 и последующего его окисления следующими переносчиками электронов.

Как уже отмечалось, в наших исследованиях у березы повислой *Betula pendula Roth.* установлено превышение максимальной флуоресценции F_m пигментов фотосинтеза образцов из контрольных условий по сравнению с техногенной зоной, что характеризует, с одной стороны, более интенсивное восстановление первичного акцептора электронов фотосистемы 2 и снижение потока электронов. С другой стороны, увеличение интенсивности пигментной максимальной флуоресценции листовых пластинок свидетельствует о росте излучательной диссипации световой энергии, что может снижать эффективность использования световой энергии в процессе фотосинтеза в другом направлении – на фотохимическое тушение флуоресценции.

Неблагоприятные условия произрастания оказывают влияние и на другие характеристики активности фотосинтетического аппарата растений, такие как потенциальные квантовые выходы фотохимических реакций второй фотосистемы F_v / F_m , F_v / F_o . В настоящее время установлено, что значение потенциального квантового выхода фотохимических реакций пропорционально доле активных реакционных центров фотосистемы 2 и может снижаться в неблагоприятных условиях среды произрастания растения [8, 9].

Данные таблиц 1 – 2 свидетельствуют о наличии видоспецифичной тенденции изменения значений потенциальных квантовых выходов фотохимических реакций второй фотосистемы F_v / F_m , F_v / F_o листовых пла-

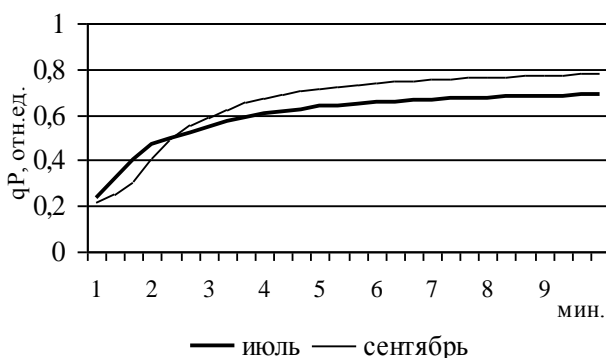
стинок исследуемых древесных представителей. Это проявляется в том, что у березы повислой *Betula pendula Roth.* в большинстве случаев на протяжении периода вегетации величины потенциальных квантовых выходов фотохимических реакций в контрольных условиях превышали значения образцов из техногенной зоны. У липы мелколистной *Tilia cordata Mill.*, наоборот, потенциальные квантовые выходы F_v / F_m , F_v / F_o были ниже в контрольных условиях по сравнению с техногенной средой, что не согласуется с представлением об их снижении в неблагоприятных условиях произрастания. Что касается количества активных реакционных центров фотосистемы 2, то в наших исследованиях лишь в трех случаях отмечается превышение этой величины в техногенной зоне по сравнению с контрольной территорией. 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. В этой связи следует подчеркнуть необходимость комплексного исследования активности фотосинтетического аппарата растений и концентрации пигментов фотосинтеза.

Относительно величины $Y (II)$ эффективного квантового выхода фотохимических реакций фотосистемы 2 выявлено, что только в трех случаях у липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* (возрастная группа до 20 лет) этот показатель был ниже в контрольных условиях по сравнению с техногенной средой, что указывает на отрицательное влияние техногенных элементов и соединений про-

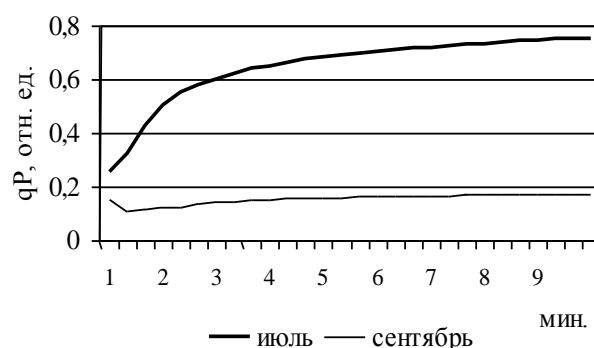
мышленных эмиссий на функционирование фотосинтетического аппарата растений.

Наличие неоднозначных данных результатов исследований изменения активности фотосинтетического аппарата различных видов растений в процессе их адаптации к произрастанию под влиянием техногенных элементов обуславливает проведение разносторонних и глубоких исследований, в том числе лабораторных экспериментов в этом направлении. В результате проведенной нами сравнительной оценки значений фотохимического и нефотохимического тушения поглощенной энергии в листьях древесных растений установлено, что в возрастной группе до 20 лет у березы повислой *Betula pendula Roth.* и липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* в июле и сентябре наблюдается более высокое значение фотохимического преобразования поглощенной световой энергии и пониженное тепловое рассеивание при произрастании вблизи химического завода и ОАО «Гомельстекло» по сравнению с контрольными условиями. В остальных исследуемых вариантах стрессовые условия среды произрастания оказали угнетающее влияние в виде снижения количества энергии, используемой на процесс фотосинтеза, и роста доли энергии, рассеиваемой в виде тепла.

Результаты изучения сезонной специфики активности фотосинтетического аппарата древесных растений свидетельствуют о том, что для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* всех возрастных групп в большей степени характерно затухание интенсивности фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла в сентябре при произрастании, главным образом, в техногенных условиях (рисунок).



береза повислая *Betula pendula Roth.*



липа мелколистная *Tilia cordata Mill.*

Рисунок – Сезонная кинетика фотохимического (qP) тушения флуоресценции хлорофилла в листьях древесных растений (возрастная группа – 20 – 30 лет, ОАО «Гомельский химический завод»)

Береза повислая *Betula pendula Roth.* по мере завершения периода вегетации демонстрирует увеличение фотохимического преобразования энергии и снижение теплового рассеивания на всех исследуемых территориях и возрастных группах.

Поскольку в результате фотосинтеза растения образуют различные органические соединения, необходимые для обеспечения их роста и развития, нами был проведен сравнительный анализ одного из морфометрических параметров листовой пластинки древесных растений – ее площади (таблица 3).

Достоверность различий между площадью листовых пластинок древесных растений, произрастающих в окружении промышленных предприятий и контрольных (фоновых) условиях, оценивалась с помощью дисперсионного анализа.

Результаты анализа дисперсионных комплексов, включающих значение площади листьев древесных растений исследуемых возрастных групп, произрастающих на территориях с техногенной нагрузкой и контрольных условиях, свидетельствуют о том, что значение F-критерия превышают F-критическое для всех исследованных образцов практически во всех случаях (для березы повислой *Betula pendula Roth.* $F_{\text{фактич.}}(1, 198) = 7,87 - 420,03$; $F_{\text{критич.}}(1, 198) = 3,89$ при $p \leq 0,05$; для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* $F_{\text{фактич.}}(1, 198) = 37,19 - 236,43$; $F_{\text{критич.}}(1, 198) = 3,89$ при $p \leq 0,05$).

(1, 198) = 37,19 – 236,43; $F_{\text{критич.}}(1, 198) = 3,89$ при $p \leq 0,05$). Исключение составили значения площади листовой пластинки березы повислой *Betula pendula Roth.* в возрастной группе до 20 лет вблизи ОАО «Гомельстекло». Таким образом, площадь листа древесных растений статистически достоверно различается при действии техногенного загрязнения и в контрольных условиях.

Достоверность различий между площадью листовых пластинок древесных растений, произрастающих в окружении промышленных предприятий и контрольных (фоновых) условиях, оценивалась с помощью дисперсионного анализа.

Результаты анализа дисперсионных комплексов, включающих значение площади листьев древесных растений исследуемых возрастных групп, произрастающих на территориях с техногенной нагрузкой и контрольных условиях, свидетельствуют о том, что значение F-критерия превышают F-критическое для всех исследованных образцов практически во всех случаях (для березы повислой *Betula pendula Roth.* $F_{\text{фактич.}}(1, 198) = 7,87 - 420,03$; $F_{\text{критич.}}(1, 198) = 3,89$ при $p \leq 0,05$; для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* $F_{\text{фактич.}}(1, 198) = 37,19 - 236,43$; $F_{\text{критич.}}(1, 198) = 3,89$ при $p \leq 0,05$).

Таблица 3 – Площадь листовой пластинки исследуемых древесных растений

Исследуемые древесные растения	Возраст древесных растений, лет	Площадь листовой пластинки, мм ²		
		ОАО «Гомельский химический завод»	ОАО «Гомельстекло»	контрольные условия
береза повислая <i>Betula pendula Roth.</i>	до 20	$\frac{1035,78 \pm 1,092}{174,15}$	$\frac{1426,40 \pm 1,329^*}{211,90}$	$\frac{1435,97 \pm 1,296}{206,42}$
	20 – 30	$\frac{1096,45 \pm 1,097}{174,97}$	$\frac{1409,38 \pm 1,746}{278,47}$	$\frac{1517,93 \pm 1,312}{209,25}$
	более 30	$\frac{1509,28 \pm 1,661}{264,89}$	$\frac{1152,92 \pm 0,905}{144,35}$	$\frac{1783,66 \pm 1,684}{268,56}$
липа мелколистная <i>Tilia cordata Mill.</i>	до 20	$\frac{3398,51 \pm 4,209}{571,21}$	$\frac{3061,46 \pm 2,910}{463,99}$	$\frac{4158,04 \pm 3,862}{615,81}$
	20 – 30	$\frac{2997,20 \pm 3,531}{563,14}$	$\frac{3405,97 \pm 3,502}{558,53}$	$\frac{4242,15 \pm 3,648}{581,73}$
	более 30	$\frac{2588,0 \pm 3,325}{530,19}$	$\frac{3336,13 \pm 3,882}{619,15}$	$\frac{3879,62 \pm 4,097}{653,41}$

Примечание – В числителе представлены средние значения площади листа, в знаменателе – величина стандартного отклонения параметра; * обозначены недостоверные различия.

Исключение составили значения площади листовой пластинки березы повислой *Betula pendula Roth.* в возрастной группе до 20 лет вблизи ОАО «Гомельстекло». Таким образом, площадь листа древесных растений статистически достоверно различается при действии техногенного загрязнения и в контрольных условиях.

Известно, что под влиянием выбросов техногенных элементов морфометрические параметры листа снижаются, однако есть мнение о стимулирующем влиянии на рост листовой пластинки отдельных элементов, содержащихся в выбросах промышленных предприятий [1 – 4].

Согласно полученным данным в результате собственных исследований, площадь листовой пластинки достоверно ниже в техногенных условиях произрастания, что является результатом угнетения фотохимического преобразования энергии солнечного света. Кроме того, негативное влияние стрессовых условий способствовали тому, что стандартное отклонение площади листовой пластинки липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* характеризуется тенденцией увеличения от древесных растений, произрастающих в зоне влияния промышленных предприятий, к контрольной территории (таблица 3). Это указывает на то, что на территории предприятий на формирование площади листовой пластинки действует стабилизирующий отбор, вызванный экологическим напряжением и обеспечивающий накопление частот рассматриваемого параметра в области средних величин. Для березы повислой *Betula pendula Roth.* такая закономерность проявляется только на территории ОАО «Гомельский химический завод», который входит в группу предприятий с максимальным объемом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Выводы. Выбросы промышленных предприятий оказывают специфическое влияние на активность фотосинтетического аппарата древесных растений. У березы повислой *Betula pendula Roth.* установлено превышение максимальной флуоресценции F_m пигментов фотосинтеза образцов из контрольных условий по сравнению с техногенной зоной, что свидетельствует о росте излучательной диссипации световой энергии и может снижать эффективность использования световой энергии в процессе фотосинтеза. В возрастной группе до 20 лет у березы повислой *Betula pendula Roth.* и липы мелколистной

Tilia cordata Mill. в июле и сентябре наблюдается более высокое значение фотохимического преобразования поглощенной световой энергии и пониженное тепловое рассеивание при произрастании вблизи промышленных предприятий по сравнению с контрольными условиями.

По мере завершения вегетационного периода для липы мелколистной *Tilia cordata Mill.* всех возрастных групп в большей степени характерно затухание интенсивности фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла в сентябре при произрастании, главным образом, в техногенных условиях. Береза повислая *Betula pendula Roth.* по мере завершения периода вегетации демонстрирует увеличение фотохимического преобразования энергии и снижение теплового рассеивания на всех исследуемых территориях и возрастных группах, при этом в контрольной зоне указанные изменения происходят более резко.

Результатом угнетения фотохимического преобразования энергии солнечного света явилось достоверное снижение величины площади листовой пластинки исследуемых древесных представителей.

Полученные результаты вносят вклад в понимание механизмов токсического действия техногенных элементов на функционирование фотосинтетического аппарата древесных растений различных возрастных групп в течение периода вегетации.

Список литературы

1. Савинцева, Л. С. Экологический анализ адаптивных механизмов растений в урбанизированной среде : автореф. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Л.С. Савинцева ; Вят. гос. с.-х. акад. – Петрозаводск, 2015. – 23 с.
2. Легощина, О. М. Адаптивные реакции и фитоиндикационная способность древесных растений в условиях техногенного загрязнения : автореф. ... канд. биол. наук : 03.02.16 / О. М. Легощина ; Алтайский гос. ун-т. – Томск, 2018. – 24 с.
3. Луцишин, Е.Г. Видовая специфичность адаптации древесных растений техногенно трансформированных урбоэдафотопов / Е.Г. Луцишин, И.К. Тесленко // Ecology and noospherology. – 2015. – Вып. 26. – С. 42–61.
4. Глибовицкая, Н. И. Липа сердцелистная (*Tilia cordata L.*) как биоиндикатор состо-

- яния загрязнения урбанизированных территорий тяжелыми металлами / Н. И. Глибовицкая, В. И. Парпан // *Ecology and noospherology*. – 2013. – Вып. 24. – С. 89–96.
5. Фатеева, Н. Л. Дистанционная диагностика состояния растений на основе метода лазерно-индуцированной флуоресценции : автореф. ... канд. ф.-м. наук : 01.04.05 / Н. Л. Фатеева ; Ин-т оптики атмосферы им. В. Е. Зуева, Сибир. отд-ние РАН. – Новосибирск, 2007. – 19 с.
6. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода / В.С. Лысенко [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №4. – С. 112–120.
7. 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.
8. Кабашникова, Л. Ф. Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков / Л. Ф. Кабашникова. – Минск, Беларус. навука, 2011. – 327 с.
9. Сергейчик, С. А. Эколого-физиологический мониторинг устойчивости ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в техногенной среде / С. А. Сергейчик // *Экологический вестник*. – 2013. – №1. – С. 89–97.
10. Хикматуллина, Г. Р. Сравнительный анализ морфологических параметров листьев древесных растений в условиях урбанизированной среды : автореф. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Г. Р. Хикматуллина ; Удмурт. гос. ун-т. – Казань, 2013. – 22 с.
11. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Н.С. Касимов [и др.]. – М. : ИП Филимонов М.В., 2014. – 560 с.
- zagraznenia [Adaptive response and phytoindicational ability of woody plants under technogenic pollution conditions]. Tomsk, 2018, 24 p. (In Russian)
3. Lutsishin E.G. Vidovaya spechifichnost adaptatsii drevesnich rastenii tehnogenno transformirovannich urboedafotopov [Species specificity of woody plants adaptation technologically transformed areas]. *Ekologia i noosferologia* [Ecology and noospherology]. Dnepropetrovsk, 2015, vol. 26, pp. 42–61. (In Russian)
4. Glebovitskaya N.I. Lipa serdchelistsnaya (*Tilia cordata* L.) kak bioindicator sostoyania zagraznenia urbanizirovannich territorii tyazhelimi metallami [Linden heart (*Tilia cordata* L.) as bioindicator of the urban territories pollution state with heavy metals]. *Ekologia i noosferologia* [Ecology and noospherology]. Dnepropetrovsk, 2013, vol. 24, pp. 89–96. (In Russian)
5. Fateeva N.L. *Dstantsionnaya diagnostika sostoyaniya rastenii na osnove metoda lazerno-indutsirovannoi fluorestentii* [Remote diagnostics of plant state on the laser-induced fluorescence method basis]. Novosibirsk, 2007, 19 p. (In Russian)
6. Lysenko V.S. [et al.] Fluorestentia chlorofilla rastenii kak pokazatel ekologicheskogo stressa [Plants chlorophyll fluorescence as an indicator of environmental stress]. *Fundamentalnie issledovania* [Fundamental research]. Moscow, 2013, vol. 4, pp. 112–120. (In Russian)
7. Sergeichik S.A. Vliyanie formaldegida (НСНО) na fluorestentiu chlorofilla, sodержanie fotosinteticheskikh pigmentov, belkov i aktivnost peroksidazi drevesnich rastenii [Formaldehyde (NSNO) effect on the chlorophyll fluorescence, the photosynthetic pigments content, protein and activity of peroxidase in woody plants]. *Ecologicheskii vestnik* [Ecological bulletin]. Minsk, 2012, vol. №1, pp. 16–24. (In Russian)
8. Kabashnikova L.F. *Fotosinteticheskii apparat i ponetchial produktivnosti hlebnih zlakov* [Photosynthetic apparatus and the productivity potential of cereals]. Minsk, 2011, 327 p. (In Russian)
9. Sergeichik S.A. Ekologo-fiziologicheskii monitoring ustoichivosti assimilatsionnogo apparata sosni obiknovennoy (*Pinus sylvestris* L.) v tehnogennoi srede [Ecological and physiological monitoring of the stability of the assimilation apparatus in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under anthropogenic

References

1. Savintseva L.S. *Ecologicheski analiz adaptivnikh mekhanizmov rastenii v urbanizirovannoi srede* [Ecological analysis of plants adaptive mechanisms in urban environment]. Petrozavodsk, 2015, 23 p. (In Russian)
2. Legoschina O.M. *Adaptivnie reakchii i fitoindikatornaya sposobnost drevesnich rastenii v usloviach tehnogenogo*

- environment]. *Ecologicheskii vestnik* [Ecological bulletin]. Minsk, 2013, vol. 1, pp. 89–97. (In Russian)
10. Hikmatullina G.R. *Sravnitelni analiz morfologicheskikh parametrov listev drevesnih rastenii v usloviakh urbanizirivannoi sredi* [Comparative analysis of leaves woody plants morphological parameters in urban environment]. *Ecologicheskii vestnik* [Ecological bulletin]. Minsk, 2013, vol. 1, pp. 89–97. (In Russian)
11. Kasimov N.S. [et al.] *Regioni i goroda Rossii: integralnaya otsenka ekologicheskogo sostoyania* [Regions and cities of Russia: ecological status integrated assessment]. Moscow, 2014, 560 p. (In Russian)

Received 2 April 2019