
ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 630.18:630.425:582

РЕАКЦИЯ ПИГМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА ГАЗОПЫЛЕВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Е. А. САМУСИК¹⁾, С. Е. ГОЛОВАТЫЙ²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

²⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

В исследовании приведены результаты оценки функционального состояния древесных растений, произрастающих в зоне влияния предприятия по производству строительных материалов. Показано, что газопылевые выбросы предприятия по производству строительных материалов (ОАО «Красносельскстройматериалы») вызывают перестройку функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений.

Установлено, что осаждение газопылевых веществ на поверхности листового аппарата древесных растений приводит к разнонаправленному изменению функционирования пигментной системы (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) растений. В исследованиях установлено значительное снижение соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в листьях березы повислой на 51–68,6 % и на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении – на 48,2 %.

Образец цитирования:

Самусик ЕА, Головатый СЕ. Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:78–86.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-78-86>

For citation:

Samusik EA, Golovaty SE. Reaction of the pigment system woody plants for gas and dust pollution. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:78–86. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-78-86>

Авторы:

Елена Андреевна Самусик – старший преподаватель кафедры экологии.
Сергей Ефимович Головатый – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

Authors:

Elena A. Samusik, senior lecturer at the department of ecology.
e.samusik@mail.ru
Sergei E. Golovaty, doctor of science (agriculture), full professor; head of the department of environmental monitoring and management.
ssience@yandex.ru

Для сосны обыкновенной отмечена противоположная направленность: увеличение соотношения хлорофиллов $a+b$ / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-восточном направлении на 21,1 %, а также на расстоянии 1 и 6,5 км в северо-восточном направлении на 28,5–29,5 %.

Выявлено, что преобладающее направление ветра оказывает значительное влияние лишь на активность фотосинтетической системы сосны обыкновенной. При этом степень влияния на содержание хлорофилла a составила 28,9 %, на содержание хлорофилла b – 26,8 %; каротиноидов – 29,4 %.

Высокая степень изменения соотношения хлорофиллов $a + b$ / каротиноиды может являться диагностическим признаком устойчивости древесных растений к техногенным воздействиям.

Ключевые слова: техногенное загрязнение; газопылевые выбросы; предприятие по производству строительных материалов; древесные растения; хлорофилл a ; хлорофилл b ; каротиноиды.

REACTION OF THE PIGMENT SYSTEM WOODY PLANTS FOR GAS AND DUST POLLUTION

E. A. SAMUSIK^a, S. E. GOLOVATYI^b

^a*Yanka Kupala State University of Grodno,
22 Azheshka Street, Grodno 230023, Belarus*

^b*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: E. Samusik (e.samusik@mail.ru)*

The article presents the results of assessing the functional state of woody plants growing in the zone of influence of an enterprise for the production of building materials. It has been shown that gas and dust emissions from the enterprise for the production of building materials (JSC Krasnoselskstroyaterialy) cause a restructuring of the functioning of the photosynthetic apparatus of woody plants.

It has been established that the deposition of gas and dust substances on the surface of the leaf apparatus of woody plants leads to multidirectional changes in the functioning of the pigment system (chlorophyll a and b , carotenoids) of plants. The studies found a significant decrease in the ratio of chlorophylls $a + b$ / carotenoids within a radius of 1 km from the source of pollution in the leaves of silver birch by 51–68,6 % and at a distance of 6.5 km in the northeast direction – by 48.2 %.

For Scots pine, the opposite direction was noted: an increase in the ratio of chlorophylls $a + b$ / carotenoids within a radius of 1 km from the source of pollution in a southeast direction by 21.1 %, and also at a distance of 1 and 6.5 km in a northeast direction by 28.5–29.5 %.

It was revealed that the prevailing wind direction has a significant impact only on the activity of the photosynthetic system of Scots pine. At the same time, the degree of influence on the content of chlorophyll a was 28.9 %, on the content of chlorophyll b – 26.8 %; for the content of carotenoids – 29.4 %.

A high degree of change in the ratio of chlorophylls $a + b$ / carotenoids can be a diagnostic sign of the resistance of woody plants to technogenic impacts.

Keywords: technogenic pollution; gas and dust emissions; enterprise for the production of building materials; woody plants; chlorophyll a ; chlorophyll b ; carotenoids.

Введение

Для экологической оценки качества окружающей среды используются различные биоиндикационные методы исследования, позволяющие охарактеризовать стабильность развития растений при разных условиях техногенного загрязнения.

Древесная растительность является диагностическим индикатором загрязнения промышленными выбросами окружающей среды, так как именно она благодаря высокой чувствительности первой принимает на себя техногенное воздействие.

Исследования, проведенные авторами [1–3], показывают, что разнообразие реакций растений, произрастающих в условиях загрязнения, определяется прежде всего спецификой воздействия факторов, а также степенью устойчивости разных видов растений [4].

Фотосинтез – неотъемлемый процесс жизнедеятельности растений. Основными фотосинтетическими пигментами растений являются хлорофилл a , хлорофилл b и каротиноиды. Преобладающий пигмент – хлорофилл a , выполняющий следующие важные функции: избирательное поглощение энергии света, запасание полученной энергии и преобразование ее фотохимическим путем в химическую энергию пер-

вичных фотовосстановленных и фотоокисленных соединений. Хлорофилл *b* и каротиноиды являются вспомогательными фотосинтетическими пигментами, поскольку выполняют защитную функцию [5].

Установлено, что пигментный аппарат растений довольно активно реагирует на различные изменения, происходящие в окружающей среде, в частности на техногенное загрязнение [6].

В связи с этим актуальным является оценка изменений содержания пластидных пигментов в листьях древесных растений, произрастающих в условиях длительного воздействия предприятия по производству строительных материалов, в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в зоне влияния ОАО «Красносельскстройматериалы» (г. п. Красносельский, Волковысский р-н, Гродненская обл., Беларусь). Данное предприятие является одним из крупнейших в Беларуси предприятий, специализирующихся на производстве строительных материалов – цемента, асбестоцементных изделий и известковых материалов. В настоящее время в состав ОАО «Красносельскстройматериалы» входят четыре производственные площадки: филиал 1 «Цементный завод»; филиал 2 «Завод асбестоцементных изделий»; филиал 3 «Известковый завод»; филиал 4 «Карьероуправление» (рис. 1).

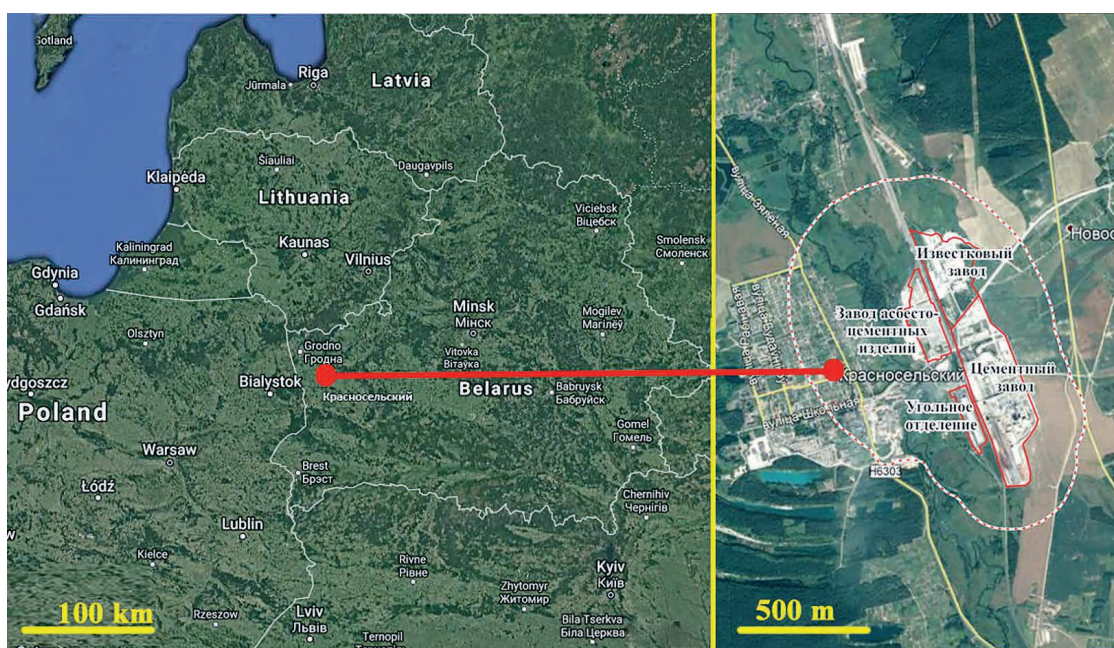


Рис. 1. Карта-схема размещения производственных площадок филиалов

Fig. 1. Map of the production sites of branches

Объектом исследования являлись доминирующие породы древесных растений на данной территории – *Betula pendula* Roth. (береза повислая) и *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная).

Предприятие по производству строительных материалов является источником не только твердых, но и газообразных загрязняющих веществ (NO_x , CO , SO_2), оказывая влияние на состояние окружающей среды.

Климатические условия территории, прилегающей к предприятию по производству строительных материалов, оценивали по метеорологическим показателям Волковысской метеорологической станции. Преобладающими потоками воздушных масс для летнего периода являются ветры с западной составляющей (СЗ, З, ЮЗ), представленные на розе-ветров (рис. 2).

В качестве диагностического органа выбрана хвоя сосны второго года жизни [7] и листья березы, так как загрязняющие вещества в первую очередь воздействуют на листовой аппарат.

Отбор растительных образцов (листьев, хвои) проводили в период с мая по июль 2020 года в соответствии с методикой¹ в градиенте расстояния от источника загрязнения (1 км, 1,5; 2,0; 3,5; 6,5; 8,0; 15,0 км) и с учетом направления (СЗ, ЮЗ, СВ, ЮВ). Использовали средневозрастные генеративные древесные растения [7]. Отбор контрольных (фоновых) растительных образцов был осуществлен на расстоянии 15 км от источника загрязнения.

¹Руководство по методам и критериям согласованного отбора проб, оценки, мониторинга и анализа влияния загрязнения воздуха на леса. Экономическая Комиссия Объединенных Наций для Европы. URL: <http://www.icp-forests.org/pdf/Rmanual1.pdf>. (дата обращения: 11.10.2022 г.).

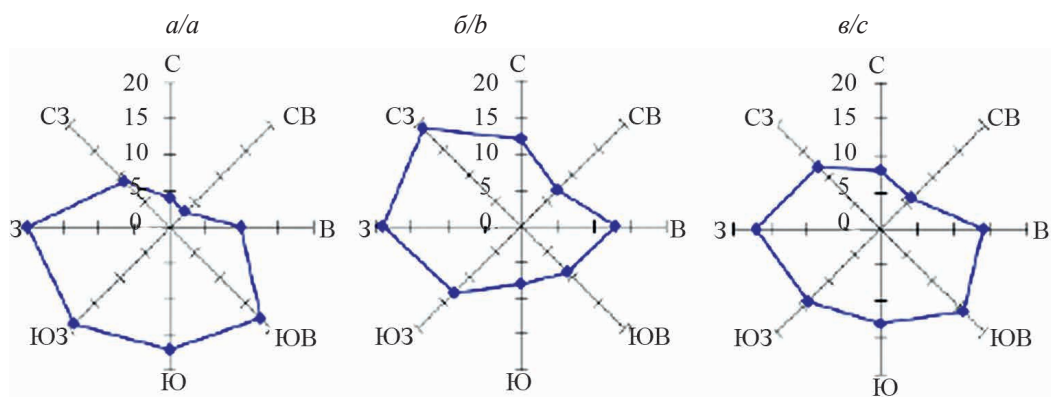


Рис. 2. Роза ветров в отдельные периоды наблюдений (а – январь, б – июль, в – год)

Fig. 2. The wind rose in certain observation periods (a – January, b – July, c – year)

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) определяли спектрофотометрическим методом в листьях древесных растений (в 80%-м этаноле) и рассчитывали мг/100 г сырого образца [8].

Содержание каротиноидов оценивали спектрофотометрическим методом при длине волны 440,5 нм в трехкратной повторности и рассчитывали в мг/100 г образца [9].

Полученные данные подвергались статистическому анализу с использованием программы STATISTICA 10.0.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования свидетельствуют о наличии ответной реакции пигментной системы ассимиляционного аппарата древесных растений на газопылевое загрязнение. При этом отмечено, что максимальное содержание пигментов приходится на конец июля.

В связи с ежегодным обновлением листьев березы, данный орган реагирует на различные неблагоприятные факторы окружающей среды только в течение вегетационного периода. Поэтому наиболее высокая степень изменения (снижение на 40 % и более) количественного содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) в сравнении с контрольными насаждениями отмечается в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-западном и юго-восточном направлениях, а также в радиусе 1 км и 6,5 км – в северо-восточном направлении (табл. 1).

Таблица 1

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *B. pendula* Roth, произрастающей в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям (мг/100 г)

Table 1

The content of photosynthetic pigments in the needles of *B. pendula* Roth growing in a distance gradient from the pollution source and in directions (mg/100 g)

Пигменты	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км						Контроль
		1	1,5	2	3,5	6,5	8	
Хлорофилл <i>a</i>	ЮЗ	2,24 ± 0,007	—*	3,47 ± 0,09	—	3,46 ± 0,03	—	3,48 ± 0,04
	ЮВ	2,76 ± 0,04	—	3,52 ± 0,007	3,49 ± 0,05	—	3,46 ± 0,05	3,47 ± 0,05
	СЗ	—	3,09 ± 0,03	3,11 ± 0,005	3,46 ± 0,05	3,29 ± 0,06	3,25 ± 0,07	3,45 ± 0,02
	СВ	3,11 ± 0,12	—	3,22 ± 0,007	3,30 ± 0,23	3,11 ± 0,04	—	3,50 ± 0,03
Хлорофилл <i>b</i>	ЮЗ	0,65 ± 0,007	—*	1,44 ± 0,11	—	1,51 ± 0,007	—	1,73 ± 0,08
	ЮВ	0,79 ± 0,01	—	1,67 ± 0,01	1,63 ± 0,11	—	1,68 ± 0,10	1,67 ± 0,32
	СЗ	—	1,05 ± 0,08	1,06 ± 0,07	1,64 ± 0,09	1,45 ± 0,007	1,69 ± 0,06	1,60 ± 0,16
	СВ	1,02 ± 0,07	—	1,22 ± 0,007	1,42 ± 0,54	1,04 ± 0,05	—	1,75 ± 0,25
Каротиноиды	ЮЗ	0,60 ± 0,01	—*	0,41 ± 0,04	—	0,43 ± 0,01	—	0,34 ± 0,03
	ЮВ	0,63 ± 0,11	—	0,44 ± 0,01	0,40 ± 0,007	—	0,43 ± 0,13	0,41 ± 0,01
	СЗ	—	0,56 ± 0,06	0,40 ± 0,04	0,39 ± 0,007	0,38 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,43 ± 0,04
	СВ	0,61 ± 0,01	—	0,47 ± 0,03	0,45 ± 0,16	0,58 ± 0,02	—	0,38 ± 0,01

Примечание. * – отсутствие возможности отбора растительных образцов.

Полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований по выявлению зоны максимального влияния газопылевых выбросов предприятия на реакцию почвенной среды [10; 11]. Нами также установлено, что на этот процесс влияет перенос пылевидных частиц в результате добычи и транспортировки (особенно) природного сырья из мелового карьера (находится на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении от производственной площадки предприятия). В этом случае, процесс транспортировки меловых отложений в определенной степени служит дополнительным источником загрязнения окружающей среды.

Отметим, что загрязняющие вещества, особенно в виде пылевидных частиц, которые оседают на листовую пластинку березы повислой, способствуют уменьшению содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) в сравнении с фоновыми условиями. При этом содержание хлорофилла *b* уменьшается в большей степени, чем хлорофилла *a*. Так, содержание этого пигмента в растениях, произрастающих в северо-восточном направлении, было ниже на 40,5 %, в юго-восточном и юго-западном направлениях – на 52,8–62,7 % по сравнению с контролем (табл. 1).

Ряд авторов [5; 12; 13], утверждают, что уменьшение содержания фотосинтетических пигментов в листьях растений свидетельствует об их разрушении под воздействием поллютантов.

В отличие от зеленых пигментов, количество каротиноидов по мере приближения к источнику загрязнения имеет тенденцию к увеличению. Содержание желтых пигментов в листьях березы повислой в радиусе 1 км от источника загрязнения соответствовало 0,60–0,63 мг/100 г, что в 1,4–1,8 раз больше, чем в листьях контрольного варианта (табл. 1).

Можно предположить, что в данном случае каротиноиды выполняют функцию дополнительных светопоглопителей и участвуют в качестве окислителей токсических веществ, поступающих в листовую аппарат растения. Тем самым они выполняют важную роль в защитно-приспособительных реакциях.

Следует отметить, что не выявлено статистически достоверных различий в содержании фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой, произрастающей в разных направлениях от источника загрязнения. Таким образом, данный результат обусловлен коротким вегетационным периодом растения, а также постоянной сменой направления ветра в летний период.

В табл. 2 представлены данные по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в хвое сосны обыкновенной, произрастающей в градиенте расстояния и по различным направлениям от источника загрязнения. Из полученных данных следует, что в условиях газопылевого загрязнения происходят значительные изменения в количестве пластидных пигментов в хвое. Наблюдается увеличение хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов (в 1,4–3,3 раза) в хвое растений, произрастающих в северо-западном направлении – в радиусе 2 км от источника загрязнения, северо-восточном – в радиусе 1 км и на расстоянии 6,5 км; юго-восточном направлении – в радиусе 3,5 км от источника загрязнения.

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *P. sylvestris* L., произрастающей в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям (мг/100 г)

Table 2

The content of photosynthetic pigments in the needles of *P. sylvestris* L. growing in a distance gradient from the pollution source and in directions (mg/100 g)

Пигменты	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км						Контроль
		1	1,5	2	3,5	6,5	8	
Хлорофилл <i>a</i>	ЮЗ	1,00 ± 0,002	–	1,00 ± 0,10	–	1,00 ± 0,05	–	1,06 ± 0,24
	ЮВ	2,10 ± 0,13	–	1,75 ± 0,20	1,77 ± 0,32	–	1,17 ± 0,14	1,07 ± 0,05
	СЗ	–	2,02 ± 0,09	1,95 ± 0,04	1,17 ± 0,01	1,06 ± 0,14	1,04 ± 0,14	1,09 ± 0,08
	СВ	1,74 ± 0,11	–	0,90 ± 0,05	0,97 ± 0,10	1,51 ± 0,24	–	0,99 ± 0,11
Хлорофилл <i>b</i>	ЮЗ	0,25 ± 0,02	–	0,25 ± 0,001	–	0,25 ± 0,04	–	0,20 ± 0,01
	ЮВ	0,65 ± 0,02	–	0,41 ± 0,02	0,51 ± 0,11	–	0,24 ± 0,02	0,20 ± 0,03
	СЗ	–	0,33 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,20 ± 0,002	0,28 ± 0,05	0,16 ± 0,03
	СВ	0,41 ± 0,06	–	0,30 ± 0,04	0,18 ± 0,03	0,38 ± 0,08	–	0,22 ± 0,07
Каротиноиды	ЮЗ	0,32 ± 0,03	–	0,33 ± 0,02	–	0,33 ± 0,01	–	0,35 ± 0,08
	ЮВ	0,59 ± 0,05	–	0,57 ± 0,05	0,53 ± 0,12	–	0,38 ± 0,06	0,33 ± 0,07
	СЗ	–	0,62 ± 0,04	0,61 ± 0,01	0,35 ± 0,004	0,35 ± 0,001	0,38 ± 0,05	0,32 ± 0,007
	СВ	0,47 ± 0,03	–	0,32 ± 0,003	0,31 ± 0,002	0,41 ± 0,06	–	0,34 ± 0,01

Следует отметить, что загрязняющие вещества в газопылевом виде способствуют ускорению процессов накопления хлорофилла *b* в хвое в большей степени, чем хлорофилла *a* и каротиноидов. Так, в юго-восточном направлении от источника загрязнения содержание хлорофилла *b* в хвое сосны возрастает в 2,0–3,3 раза в сравнении с контролем.

Высокое содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов свидетельствует об активации защитных механизмов, направленные на снижение негативного воздействия загрязнения, что подтверждается в ряде других работ [5; 12; 13].

Диаграммы размаха средних значений содержания хлорофилла *a* в хвое сосны обыкновенной свидетельствуют о статистически достоверных различиях содержания этого фотосинтетического пигмента в растениях, произрастающих в юго-западным и юго-восточным направлениями ($p = 0,012$); в содержании каротиноидов – между растениями, произрастающих в юго- и северо-восточных направлениях ($p = 0,028$), юго-западном и юго-восточном направлениях ($p = 0,026$), что обусловлено преобладанием ветров западной составляющей. Таким образом, сосна обыкновенная, произрастающая в юго-восточном направлении в радиусе 3,5 км от предприятия, в наибольшей степени подвергается техногенному загрязнению в связи с достоверными изменениями в пигментном комплексе.

Известно, что стресс приводит к избыточному накоплению активных форм кислорода, которые могут инициировать деструктивные окислительные процессы. Следовательно, устойчивость к окислительному стрессу, вызываемому стрессовыми факторами среды, является одним из важных параметров, характеризующих состояние фотосинтетического аппарата. Источником активных форм кислорода являются хлоропласты. Это связано с перевозбуждением и перевосстановлением антенных комплексов в результате дисбаланса между поглощением квантов света и возможностью реализации ее в процессе фотосинтеза².

К числу основных активных форм кислорода относят пероксид водорода. В норме равновесное состояние поддерживается между генерацией АФК и их дезактивацией низкомолекулярными соединениями и антиоксидантными ферментами. АФК могут одновременно выполнять двойственную функцию: выступать в роли деструктивных агентов или сигнальных молекул. Выявлено, что в условиях газопылевого загрязнения активность ферментативной антиоксидантной системы (каталазы, пероксидазы) в листьях древесных растений снижается, что подтверждается ранее проведенными исследованиями [14]. Соответственно пигментный аппарат растения принимает активное участие в формировании приспособленности к стрессовому воздействию, изменяя тем самым содержание пластидных пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов).

Устойчивость растительных организмов к стрессовым воздействиям можно оценить по отношению содержания суммы хлорофиллов к сумме каротиноидов [12]. У высших растений данное отношение изменяется в широких пределах и свидетельствует о перестройке светособирающих комплексов фотосистем.

В табл. 3 представлены данные по соотношению количества хлорофиллов и каротиноидов в листьях древесных растений, произрастающих в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям.

Отмечено значительное снижение соотношения хлорофиллов $a + b$ / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в листьях березы повислой на 51–68,6 % и на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении – на 48,2 %. Для сосны обыкновенной отмечена противоположная направленность: увеличение соотношения хлорофиллов $a + b$ / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-восточном направлении на 21,1 %, а также на расстоянии 1 и 6,5 км в северо-восточном направлении на 28,5–29,5 % (табл. 3). Это свидетельствует о том, что газопылевые выбросы предприятия инициируют окислительное повреждение пигментной системы растения, вследствие чего снижается устойчивость древесных растений к стрессовым воздействиям.

Обобщение данных о фотосинтетической активности листьев березы повислой и хвои сосны позволяет констатировать, что осаждение газопылевых веществ на поверхности листового аппарата древесных растений приводит к разнонаправленному изменению функционирования пигментной системы (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) растений. Это возможно объясняется тем, что листья *B. pendula* Roth ежегодно обновляются, а хвоя *P. sylvestris* L. подвержена постоянному (хроническому) газопылевому загрязнению.

В частности, результаты дисперсионного анализа показали, что преобладающее направление потока воздушных масс оказывает значительное влияние лишь только на активность фотосинтетической системы сосны обыкновенной. При этом степень влияния на содержание хлорофилла *a* составила 28,9 %, хлорофилла *b* – 26,8 %; каротиноидов – 29,4 % (табл. 4).

²Динамика содержания фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в условиях г. Барнаула. URL: <http://elibrary.asu.ru/xmlui/bitstream/handle/asu/9354/vkr.pdf> (дата обращения: 01.03.2023 г.).

Таблица 3

Соотношение суммы хлорофиллов *a* и *b* к каротиноидам в листьях древесных растений, произрастающей в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям

Table 3

The ratio of the sum of chlorophylls *a* and *b* to carotenoids in the leaves of woody plants growing in a gradient of distance from the source of pollution and in the directions

Пигменты		Направление	Расстояние от источника загрязнения, км						Контроль
			1	1,5	2	3,5	6,5	8	
Хл. <i>a</i> + <i>b</i> / каротиноиды	береза	ЮЗ	4,82	–	11,98	–	11,56	–	15,32
		ЮВ	5,63	–	11,8	12,80	–	11,95	12,54
		СЗ	–	7,39	10,43	13,08	12,47	12,35	11,74
		СВ	6,77	–	9,45	10,49	7,16	–	13,82
	сосна	ЮЗ	3,91	–	3,79	–	3,79	–	3,60
		ЮВ	4,66	–	3,79	4,30	–	3,71	3,85
		СЗ	–	3,79	3,72	4,03	3,60	3,47	3,91
		СВ	4,57	–	3,75	3,71	4,61	–	3,56

Таблица 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа влияния направления ветра на содержание фотосинтетических пигментов в хвое сосны обыкновенной

Table 4

The results of one-factor analysis of variance of the influence of the direction of wind direction on the content of photosynthetic pigments in Scots pine needles

Пигменты	Статистические показатели	Доля влияния фактора, %
Хлорофилл <i>a</i>	η_2 , %	28,9
	F	4,63
	p	0,008
Хлорофилл <i>b</i>	η_2 , %	26,8
	F	4,15
	p	0,013
Каротиноиды	η_2 , %	29,4
	F	4,72
	p	0,007

Примечание. * – жирным шрифтом выделены значения при $p < 0,05$.

Ранее проведенные нами исследования [14] показали взаимосвязь между уровнями окислительного стресса и антиоксидантной ферментативной активностью в листьях древесных растений, что позволило расширить область исследований по влиянию пылевого загрязнения на фотосинтетический аппарат древесных растений.

По результатам корреляционного анализа, представленным в табл. 5, отмечается разнонаправленное изменение фотосинтетической активности в листьях древесных растений, что свидетельствует об особенностях реакции ассимиляционного аппарата растения на длительное газопылевое загрязнение.

Положительно значимые корреляции между концентрацией МДА и неферментативными антиоксидантами (каротиноиды) позволяет предположить, что эти соединения играют жизненно важную роль в детоксикации образующихся активных форм кислорода в древесных растениях, что также подтверждается многими исследованиями [15]. Следует отметить, что высокая степень взаимосвязи между анализируемыми

показателями отмечена для древесных растений, произрастающих в юго-восточном направлении, поскольку основной поток воздушных масс осуществляется с северо-западного направления.

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа изменения концентрации МДА и фотосинтетической активности в листьях березы повислой и хвое сосны обыкновенной ($p < 0,05$)

Table 5

The results of the correlation analysis of changes in the concentration of MDA and photosynthetic activity in the leaves of the hanging birch and pine needles ($p < 0.05$)

Показатель		Направление	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Каротиноиды
Концентрация МДА	береза	Юго-запад	-0,54	-0,32	0,21
		Юго-восток	-0,63	-0,67	0,59
		Северо-запад	-0,51	-0,73	0,41
		Северо-восток	-0,71	-0,62	0,63
	сосна	Юго-запад	–*	0,22	–*
		Юго-восток	0,64	0,59	0,57
		Северо-запад	0,41	–*	0,29
		Северо-восток	0,26	0,43	0,54

Примечание. * – не обнаружена статистически достоверная взаимосвязь

Заключение

Газопылевые выбросы предприятия по производству строительных материалов (ОАО «Красносельскстройматериалы») вызывают перестройку функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений. Отмечается разнонаправленное изменение фотосинтетической активности в листьях древесных растений, что свидетельствует об особенностях реакции ассимиляционного аппарата растения на длительное газопылевое загрязнение. Соответственно, пигментный аппарат растения принимает одно из главных участков в формировании защитно-приспособительных механизмов к стрессовому воздействию, изменяя тем самым содержание пластидных пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов).

Высокая степень изменения соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды может являться диагностическим признаком слабой степени устойчивости древесных растений к техногенным воздействиям, поскольку отмечено значительное снижение соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в листьях березы повислой на 51–68,6 % и на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении – на 48,2 %. Для сосны обыкновенной отмечена противоположная направленность: увеличение соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-восточном направлении на 21,1 %, а также на расстоянии 1 и 6,5 км в северо-восточном направлении на 28,5–29,5 %. Процесс транспортировки меловых отложений (на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении от источника загрязнения) в определенной степени служит дополнительным источником загрязнения окружающей среды.

Выявлено, что преобладающее направление ветра оказывает значительное влияние лишь только на активность фотосинтетической системы сосны обыкновенной. При этом степень влияния на содержание хлорофилла *a* составила 28,9 %, хлорофилла *b* – 26,8 %; каротиноидов – 29,4 %. Это, возможно, объясняется тем, что листья *B. pendula* L. ежегодно обновляются, а хвоя *P. sylvestris* подвержена постоянному (хроническому) газопылевому загрязнению.

Библиографические ссылки

1. Симонова ЗА, Тихомирова ЕИ, Шайденко ИС. Роль железосодержащих оксидаз в адаптации древесных растений к факторам городской среды (на примере города Саратова). *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Общая биология*. 2016;2(3):801–805.
2. Тужилкина ВВ. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение. *Экология*. 2009;4:243–248.
3. Чупахина ГН и др. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2012;2(18):171–185.

4. Самусик ЕА, Марчик ТП, Головатый СЕ. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения. *Социально-экологические технологии*. 2022;12(4):418–438.
5. Соколова ГГ. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях города Барнаула. *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2020;19(1):223–228.
6. Титова МС, Розломий НГ. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной на техногенное загрязнение на территории исторически значимых объектов г. Уссурийска. *Вестник КрасГАУ*. 2014;4:170–173.
7. Федорова АИ, Никольская АН. *Практикум по экологии и охране окружающей среды*. Москва: ВЛАДОС; 2001. 288 с.
8. Туманов ВН, Личик СЛ. *Качественные и количественные методы исследования пигментов фотосинтеза*. Гродно: ГрГУ; 2007. с. 61.
9. Гулиев РБ, Азизов БМ, Аббасзаде АА. Оценка содержания хлорофилла в растениях, подвергнутых антропогенному воздействию, спектрофотометрическим методом. *Оптика и спектроскопия*. 2009;106(3):514–520.
10. Самусик ЕА, Марчик ТП, Головатый СЕ. Полифенолоксидазная и пероксидазная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2019;4:65–79.
11. Самусик ЕА, Головатый СЕ. Тяжелые металлы в почвах и в пшенице в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:76–88.
12. Хмелевская, ИА. Эколого-физиологические исследования древесных пород в условиях в г. Пскове. *Вестник Псковского государственного педагогического университета. Серия Естественные и физико-математические науки*. 2008;6:45–55.
13. Тужилкина ВВ, Плюснина СН. Структурно-функциональные изменения хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения. *Лесоведение*. 2020;6:537–547.
14. Самусик ЕА, Марчик ТП, Головатый СЕ. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения. *Социально-экологические технологии*. 2022;12(4):418–438.
15. Кабашникова, ЛФ и др. Содержание фотосинтетических пигментов и параметры окислительного стресса в листьях амаранта при нарастающем водном дефиците. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2021;66(3):282–294.

References

1. Simonova ZA, Tikhomirova EI, Shaidenko IS. The role of iron-containing oxidases in the adaptation of woody plants to urban environmental factors (on the example of the city of Saratov). *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Obshhaja biologija*. 2016;2(3):801–805. Russian.
2. Tuzhilkina VV. The reaction of the pigment system of conifers to long-term aerotechnogenic pollution. *Ekologija*. 2009;4:243–248. Russian.
3. Chupakhina GN, et al. Response of the pigment and antioxidant systems of plants to environmental pollution in Kaliningrad with vehicle emissions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologija*. 2012;2(18):171–185. Russian.
4. Samusik EA, Marchik TP, Golovaty CE. The intensity of oxidative processes and the activity of the antioxidant system in the leaves of woody plants growing under conditions of technogenic pollution. *Socialno-ekologicheskie tehnologii*. 2022;12(4):418–438. Russian.
5. Sokolova GG. Influence of technogenic pollution on the pigment composition of silver birch leaves (*Betula pendula* Roth.) in the conditions of the city of Barnaul. *Problemy botaniki Juzhnoj Sibiri i Mongolii*. 2020;19(1):223–228. Russian.
6. Titova MS, Rozlomy NG. The reaction of the pigment system of Scots pine to technogenic pollution on the territory of historically significant objects in the city of Ussuriysk. *Vestnik KrasGAU*. 2014;4:170–173. Russian.
7. Fedorova AI, Nikolskaya AN. *Praktikum po jekologii i ohrane okruzhajushhej sredy* [Workshop on ecology and environmental protection]. Moscow: VLADOS; 2001. 288 p. Russian.
8. Tumanov VN, Lichik SL. *Kachestvennyye i kolichestvennyye metody issledovaniya pigmentov fotosinteza* [Qualitative and quantitative methods for studying photosynthesis pigments]. Grodno: GrSU; 2007. p. 61. Russian.
9. Guliyev RB, Azizov BM, Abbaszade AA. Estimation of chlorophyll content in plants subjected to anthropogenic impact by spectrophotometric method. *Optika i spektroskopija*. 2009;106(3):514–520. Russian.
10. Samusik EA, Marchik TP, Golovaty CE. Polyphenol oxidase and peroxidase activity of soddy-podzolic soils under the influence of emissions from an enterprise for the production of building materials. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologija*. 2019;4:65–79. Russian.
11. Samusik EA, Golovaty CE. Heavy metals in soils and wheat in the impact zone of a building materials production facility. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologija*. 2021;4:76–88. Russian.
12. Khmelevskaya, I.A. Ecological and physiological studies of tree species in conditions in Pskov. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Serija Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki*. 2008;6:45–55. Russian.
13. Tuzhilkina VV, Plyusnina SN. Structural and functional changes in pine needles under conditions of aerotechnogenic pollution. *Lesovedenie*. 2020;6:537–547. Russian.
14. Samusik EA, Marchik TP, Golovaty SE. The intensity of oxidative processes and the activity of the antioxidant system in the leaves of woody plants growing in conditions of man-made pollution. *Socialno-ekologicheskie tehnologii*. 2022;12(4):418–438. Russian.
15. Kabashnikova LF, et al. Content of photosynthetic pigments and parameters of oxidative stress in amaranth leaves with increasing water deficit. *Vesci Nacyjanal'naj akademii navuk Belarusi. Serija bijalagichnyh navuk*. 2021;66(3):282–294. Russian.

Статья поступила в редколлегию 17.04.2023.
Received by editorial board 17.04.2023.