

УДК 630.23

**Д. А. Подошвелев**

Белорусский государственный технологический университет

**СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ  
И АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТА ПЕРОКСИДАЗЫ В ХВОЕ СОСНЫ  
В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

С развитием современного общества возрастающее антропогенное воздействие может вызвать деградацию лесных биоценозов. В санитарно-защитных зонах данное явление может приводить к снижению защитной функции лесных насаждений, находящихся вокруг промышленных предприятий. С целью выявления насаждений с наименьшими негативными последствиями, которые были вызваны деятельностью промышленных предприятий, было изучено состояние ассимиляционного аппарата сосны и ели. Объектами исследования являлись древостои, произрастающие вблизи от нефтеперерабатывающего завода и Новополоцкого завода белково-витаминных концентратов. Аналогичная работа проведена в 50- и 90-летних древостоях сосны и ели, произрастающих в ГЛХУ «Глубокский лесхоз». Исследования показали, что с уменьшением возраста и густоты древостоев сосны и ели в большинстве случаев повышается физиологическая устойчивость к загрязнению воздуха промышленными выбросами и сохраняется стабильность физиологических показателей жизнедеятельности. Это позволяет сделать выводы о том, что более молодые древостои показывают большую устойчивость и лучшую адаптацию к неблагоприятным условиям произрастания по сравнению с более старыми древостоями.

**Ключевые слова:** сосна, ель, древостой, биоценоз, ассимиляционный аппарат, загрязнение воздуха, хлорофилл, пероксидаза, сера, устойчивость, адаптация.

**D. A. Podoshvelev**

Belarusian State Technological University

**THE CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS  
AND THE ACTIVITY OF THE ENZYME PEROXIDASE IN PINE NEEDLES  
IN CONDITIONS WITH INTENSIVE TECHNOGENIC EXPOSURE**

The development of modern society and increasing anthropogenic impact can be cause degradation of forest biocenoses. This phenomenon can to decrease the protective function of forest stands in sanitary protection zones of industrial enterprises. In order to identify forest stands with the least negative consequences that were caused by the activities of industrial enterprises, the state of the assimilation apparatus of pine and spruce was studied. The objects of the study were forest stands growing near the petrochemical enterprise and the Novopolotsk plant of protein and vitamin concentrates. A similar work was carried out in 50 and 90 year-old stands of pine and spruce, growing in SEFE “Glubokskiy experimental forestry enterprise”. Studies have shown that with decreasing age and density of pine and spruce stands, in most cases, physiological resistance to air pollution by industrial emissions increases and the physiological indicators of vital signs are stable. This allows us to conclude that younger forest stands show greater resistance and better adaptation to adverse growing conditions compared to older forest stands.

**Key words:** pine, spruce, forest stand, biocenosis, assimilation apparatus, air pollution, chlorophyll, peroxidase, sulfur, stability, adaptation.

**Введение.** В последние годы заметно изменилось отношение мирового сообщества к оценке лесных экосистем: леса оцениваются с позиций не только лесозаготовки, но их биологической устойчивости против различных факторов внешней среды, а также выполнения ими экологических функций [1, 2, 3]. По В. Г. Стороженко, под устойчивым лесным биоценозом следует понимать сообщество растений, животных, микроорганизмов, которое по числу видов, разнообразию и полноте трофических связей, сложности структурного строения

и соответствии климатическим, геоморфологическим и почвенным условиям экотопа сохраняет флуктуирующее постоянство состава организмов и энергетического баланса, а также постоянство восстановительных и деструктивных процессов в течение как минимум нескольких поколений или как угодно долго [4]. При этом в естественных лесах состав и структура лесного биогеоценоза оптимизируются в соответствии с эволюционными законами развития, и их следует рассматривать как естественное формирование у лесного сообщества

качеств устойчивости, как стратегию выживания. Однако эти качества веками вырабатывались в условиях, когда леса не испытывали такого мощного негативного антропогенного воздействия, которое мы наблюдаем в настоящее время.

Известно, что молодому организму свойственна повышенная пластичность, а следовательно, и лучшая приспособляемость к ухудшению условий внешней среды. Поэтому одним из наиболее эффективных путей повышения устойчивости формируемых насаждений ели европейской и сосны обыкновенной против целого ряда неблагоприятных факторов внешней среды может быть снижение возраста рубки при ориентировании на получение балансовой древесины.

**Основная часть.** Исследование влияния снижения густоты стояния древесных растений на физиологические параметры ассимиляционного аппарата ели и сосны проводилось на стационарных опытных объектах и в условиях сильного негативного антропогенного воздействия на лесные экосистемы, которое имеет место в санитарной зоне Новополоцкого промышленного узла.

Для изучения изменения физиологических параметров функционального состояния ассимиляционного аппарата ели европейской и сосны обыкновенной в мае, июне, июле и августе 2019 г. были взяты образцы хвои на высоте 7–8 м с древесных растений в возрасте 50 и 90 лет, произрастающих в санитарно-защитной зоне г. Новополоцка в непосредственной близости от Новополоцкого завода белково-витаминных концентратов (БВК) и нефтеперерабатывающего завода ОАО «Нафтан» (НПЗ). Аналогичная работа проведена в 50-летних опытных культурах ели и сосны, а также в контрольных насаждениях такого же возраста и в возрасте 90 лет, произрастающих на территории ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз». Полный перечень объектов выглядит следующим образом:

Группа ПП 1:

а – СЗЗ Новополоцка, 90 лет;

б – СЗЗ Новополоцка, 50 лет.

Группа ПП 2:

а – Глубокское лесничество, 90 км от НПЗ и БВК, 90 лет;

б – Глубокское лесничество, 90 км от НПЗ и БВК, 50 лет.

Для оценки состояния устойчивости хвойных древесных растений на них отбирали по три пробных образца хвои на высоте 7–8 м с южной стороны дерева. В отобранных образцах хвои определяли следующие показатели:

– содержание серы;

– содержание и соотношение пулов фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов);

– содержание водорастворимых белков;

– активность фермента пероксидазы.

Анализировали хвою ели и сосны текущего и 1-го годов жизни. Для определения содержания серы в хвое применяли спектрофотометрический метод А. Д. Мочаловой [5], основанный на сжигании измельченного образца с азотно-кислым магнием, выведении мешающего окрашиванию железа с помощью хлоргидрата гидроксиламина, осаждении сульфатов хлористым барием и определении экстинции на СФ при длине волны 460 нм.

Содержание фотосинтетических пигментов находили на СФ после извлечения их из растительного образца ацетоном.

Содержание водорастворимых белков определяли по микробиуретовой реакции [6]. Калибровочную кривую строили по стандартному раствору бычьего альбумина.

Активность фермента пероксидазы определяли по модифицированному методу А. Н. Бояркина [7, 8]. Об активности пероксидазы судили по времени образования синей окраски окисленного бензидина.

В ходе проведения исследований физиолого-биохимические анализы выполняли четыре раза. Данные обрабатывали на ЭВМ с расчетом средней арифметической каждого вариационного ряда и средней ошибки измерений.

Так как в составе выбросов завода БВК Новополоцкого промышленного узла доминирует диоксид серы (SO<sub>2</sub>), то данный загрязнитель неизбежно поглощается хвоей из атмосферного воздуха, накапливается в мезофилле, цитоплазме и органоидах клетки и оказывает влияние на важнейшие процессы метаболизма.

Исследования показали, что в зоне распространения эмиссий Новополоцкого НПЗ в хвое ели европейской накапливается значительное количество серы по сравнению с незагрязненной территорией. Наибольшее количество серы в органах ассимиляции ели европейской накапливалось на пробных площадях, непосредственно примыкающих к заводу БВК и НПЗ. В хвое ели европейской в насаждениях старших возрастов накапливалось 0,11–0,18% серы, что почти в 1,5–2,0 раза превышает ее нормальное природное накопление. Так, в опытных культурах на территории Глубокского опытного лесхоза этот показатель не превышает 0,5–0,6%, что в 2–3 раза меньше, чем в санитарно-защитной зоне промышленного узла. В насаждениях ели, примыкающих к промышленным предприятиям, накопилось наименьшее количество серы, что может быть связано со спецификой выбросов данного промышленного предприятия или другими невыясненными причинами.

В контрольных условиях (90 км от НПЗ и БВК) накапливалось в хвое сосны и ели не более 0,05–0,06% серы. Следует отметить, что содержание серы в хвое существенно различается, так как возраст, густота или изреженность насаждений оказывают влияние на состояние физиолого-биохимических показателей ассимиляционного аппарата ели европейской и сосны обыкновенной.

Примечательно, что в хвое 50-летних насаждений плантационного типа, примыкающих к заводу БВК, содержится наименьшее количество серы (0,11%), тогда как в контрольных более густых древостоях этот показатель на 39% выше. Снижение возраста исследуемых насаждений с 90 до 50 лет также способствовало заметному (на 0,03%) уменьшению накопленной серы в хвое древесных растений. Следовательно, не только возраст, но и густота стояния древесных растений могут оказывать влияние на состояние физиолого-биохимических показателей устойчивости ассимиляционного аппарата ели европейской.

В целом насаждения ели в зоне распространения эмиссий НПЗ характеризуются нарушениями накопления и соотношения пулов фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными аналогами, отобранными на пробных площадях вне зоны загрязнения. Так, в еловых насаждениях, расположенных в зоне влияния эмиссий БВК, зарегистрировано значительное снижение накопления фотосинтетических пигментов в хвое текущего и 1-го года жизни, что сопряжено с высокими уровнями поглощенной серы из атмосферного воздуха. Следует отметить, что по этому показателю несколько большую устойчивость проявили насаждения ели старшего возраста (90 лет) по сравнению с более молодыми (50 лет). В то же время в контрольных 50-летних насаждениях отмечено большее снижение содержания хлорофилла и каротиноидов по сравнению с опытными культурами в связи с большим накоплением серы в хвое (0,18% в контрольных насаждениях ели против 0,11% серы в насаждениях, где проводилось селекционное изреживание).

В насаждениях ели, примыкающих к Новополюцкому нефтеперерабатывающему заводу, четко регистрируется уменьшение накопления фотосинтетических пигментов в хвое ели текущего и 1-го года жизни, причем насаждения старшего возраста оказываются наиболее устойчивыми (т. е. они характеризуются наименьшим уровнем снижения содержания пигментов: на 83,1–98,8% относительно контроля). Более молодые древостои ели здесь

менее устойчивы. Суммарное содержание хлорофилла и каротиноидов в хвое разного возраста здесь составляет 62,2–49,4% по отношению к контролю, в то время как в густых (контрольных) насаждениях это содержание намного больше (73,9–74,4% относительно контроля).

Выявленные нами закономерности изменения содержания пигментов в органах ассимиляции хвойных пород в зоне распространения эмиссий Новополюцкого промышленного комплекса близки к описанным в научной литературе изменениям, обнаруженным другими авторами на территориях, подверженных влиянию промышленных газообразных выбросов [7].

В насаждениях ели европейской разного возраста и разной густоты как в непосредственной близости, так и на удалении от Новополюцкого промышленного комплекса обнаружено нарушение и других параметров состояния жизнедеятельности: активности фермента пероксидазы, содержания водорастворимых белков, соотношения показателей активности пероксидазы и содержания белков.

Содержание белков в хвое ели в высоковозрастных посадках (90 лет) во всех вариантах увеличивается по сравнению с контролем (соответственно 106,8–138,7, 134,6–184,6, 131,7–191,9%), что можно рассматривать как результат реализации защитных приспособительных возможностей растений и более высокой устойчивости. В редких 50-летних насаждениях, наиболее близко примыкающих к НПЗ, содержание белка в хвое ели было соответственно 57,3–98,1 и 80,8–83,2% относительно контроля, что свидетельствует о снижении устойчивости растений. В густых 40-летних посадках содержание белка в хвое было соответственно 89,2–110,0 и 66,0–122,9%. По мере удаления от промышленного узла содержание белков в хвое ели как разреженных, так и густых плантаций больше, чем на меньшем расстоянии от промышленного комплекса. Это коррелирует с пониженным уровнем накопления серы (0,05–0,06%) и, вероятно, большей устойчивостью.

Экологические условия произрастания растений в зоне влияния эмиссий НПЗ приводят к нарушению активности фермента пероксидазы, в большинстве случаев ее активность ингибируется, что ведет к снижению устойчивости растений из-за нарушения антиоксидантного статуса.

Результаты исследования состояния фотосинтетических пигментов хвои сосны, а также активности фермента пероксидазы и содержания водорастворимых белков показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Содержание и соотношение хлорофилла и каротиноидов  
в хвое сосны, мг/г массы сырого вещества**

Возраст хвои	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Хлорофилл ( <i>a + b</i> )	Каротиноиды
50 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	0,4568 ± 0,0035	0,1303 ± 0,0008	0,587	0,2939 ± 0,0073
1-го года жизни	0,5329 ± 0,0007	0,1599 ± 0,0001	0,693	0,2803 ± 0,0002
90 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	0,4086 ± 0,0125	0,1158 ± 0,0037	0,525	0,2698 ± 0,0116
1-го года жизни	0,4624 ± 0,0021	0,1412 ± 0,0004	0,603	0,2487 ± 0,0026
50 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	0,4190 ± 0,019	0,1196 ± 0,0111	0,539	0,2324 ± 0,0227
1-го года жизни	0,5030 ± 0,0464	0,1556 ± 0,0146	0,659	0,2300 ± 0,0209
90 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	0,4017 ± 0,0159	0,1147 ± 0,0041	0,516	0,2680 ± 0,0114
1-го года жизни	0,4591 ± 0,0017	0,1367 ± 0,0005	0,596	0,2460 ± 0,0023

Таблица 2

**Активность фермента пероксидазы и содержание  
водорастворимых белков в хвое сосны**

Возраст хвои	Активность пероксидазы, Е/(г·с <sup>-1</sup> )	Содержание белков, мг/100 г сырого вещества	Отношение активности пероксидазы к содержанию белков	Отношение содержания белков к активности пероксидазы
50 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	1,186 ± 0,025	14,900 ± 0,115	0,080	12,563
1-го года жизни	3,089 ± 0,089	22,875 ± 0,222	0,135	7,405
90 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	1,739 ± 0,008	12,075 ± 0,096	0,144	6,944
1-го года жизни	2,168 ± 0,036	13,700 ± 0,115	0,158	6,319
50 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	1,170 ± 0,010	15,650 ± 0,129	0,075	13,376
1-го года жизни	2,334 ± 0,021	19,100 ± 0,115	0,122	8,183
90 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	1,236 ± 0,012	12,763 ± 0,124	0,136	6,741
1-го года жизни	1,978 ± 0,038	13,121 ± 0,102	0,145	6,012

Анализ состояния фотосинтетических пигментов хвои сосны показал, что наибольшая концентрация хлорофилла ( $X(a + b)$ ) наблюдается в хвое в 50-летнем опытном древостое в Глубокском лесничестве, что превышает 90-летние и 50-летние густые древостои на 12–14 и 5–8% соответственно.

По содержанию каротиноидов тенденция сохраняется. В результате этого наибольшее суммарное количество пигментов наблюдается в хвое опытных 50-летних древостоев. Так, молодые редкие древостои превосходят по данному показателю 90-летние древостои на 10–13% и 50-летние густые – на 9–12%.

Активность пероксидазы в хвое 1-го года жизни в 50-летних древостоях сосны на 24–30% превысила данный показатель 50- и 90-летних древостоев. Содержание белков в 50-летних древостоях на 19–40% превышает показатель 90-летних древостоев.

**Заключение.** По результатам исследований можно сделать следующие предварительные выводы:

– содержание серы в хвое увеличивается по мере приближения к Новополюцкому НПЗ и служит индикатором загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы;

– загрязнение атмосферного воздуха является одним из факторов нарушения физиологических показателей ассимиляционного аппарата;

– повышенный уровень накопления серы в хвое относительно его нормального природного уровня аккумуляции, возможно, приводит к нарушению физиолого-биохимических показателей: содержания и соотношения пулов хлорофилла и каротиноидов, водорастворимых белков и активности фермента пероксидазы;

– более молодые сосны показывают большую устойчивость к неблагоприятным условиям произрастания, лучшую адаптацию и стабильность физиологических показателей жизнедеятельности по сравнению с более старыми древостоями.

### Список литературы

1. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: Reinventing agroforestry? / M. Van Noordwijk [et al.] // *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2018. No. 34, P. 33–42.
2. Effectiveness of Community Forest Management at reducing deforestation in Madagascar / R. A. Rasolofosan [et al.] // *Biological Conservation.* 2014. Vol. 184. P. 477–458.
3. Писаренко А. И. Экологические аспекты управления лесами // *Лесное хозяйство.* 2000. № 3. С. 8–11.
4. Стороженко В. Г. Содержание понятия устойчивого лесного сообщества // *Состояние и мониторинг лесов на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24–26 нояб. 1998 г.* Минск, 1998. С. 233–235.
5. Мочалова А. Д. Спектрофитометрический метод определения серы в растениях // *Сельское хозяйство за рубежом.* 1995. № 4. С. 17–21.
6. Шлык А. А., Прудникова И. В., Парамонова Т. К. Влияние ингибиторов сульфгидрильных групп на биосинтез протохлорофиллида и хлорофиллов *a* и *b* // *Биосинтез и состояние хлорофиллов в растениях.* Минск: Наука и техника, 1998. 284 с.
7. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка, 1978. 112 с.
8. New and classic families of secreted fungal heme peroxidases / M. Hofrichter [et al.] // *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2010. Vol. 87, No. 3. P. 871–897.

### References

1. Van Noordwijk M., Duguma L. A., Dewi S., Leimona B., Catacutan D. C., Lusiana B., Öborn I., Hairiah K., Minang P. A. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: Reinventing agroforestry? *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2018, no. 34, pp. 33–42.
2. Rasolofosan R. A., Ferraro P. J., Jenkins C. N., Jones J. P. G. Effectiveness of Community Forest Management at reducing deforestation in Madagascar. *Biological Conservation*, 2014, vol. 184, pp. 477–458.
3. Pisarenko A. I. Ecological aspects of forest management. *Lesnoe hozyaystvo* [Forestry], 2000, no. 3, pp. 8–11. (In Russian)
4. Storozhenko V. G. The content of the concept of sustainable forest community. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ("Sostoyanie i monitoring lesov na rubezhe XXI veka")* [Materials of International scientific conference ("State and monitoring of forests at the turn of the XXI century")]. Minsk, Institute of Experimental Botany National Academy of Sciences of Belarus, 1998, pp. 233–235 (In Russian).
5. Mochlova A. D. Spectrophotometric method for determination of sulfur in plants. *Sel'skoe hozyaystvo za rubezhom* [Agriculture abroad], 1995, no. 4, pp. 17–21 (In Russian).
6. Shlyk A. A., Prudnikova I. V., Paramonova T. K. The effect of sulfhydryl group inhibitors on the biosynthesis of protochlorophyllide and chlorophyll *a* and *b*. *Biosintez i sostoyanie khlorofillov v rasteniyakh* [Biosynthesis and state of chlorophyll in plants]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1998, pp. 284 (In Russian).
7. Ilkun G. M. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya* [Air pollutants and plants]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978, 112 p.
8. Hofrichter M., Ullrich R., Pecyna M. J., Liers C., Lundell T. New and classic families of secreted fungal heme peroxidases. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, vol. 87, no. 3, pp. 871–897.

### Информация об авторах

**Подошвелев Дмитрий Александрович** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры туризма, природопользования и охотоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: podoshv@gmail.com

### Information about the authors

**Podoshvelev Dmitry Aleksandrovich** – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Tourism, Nature Management and Game Management. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: podoshv@gmail.com

Поступила 03.04.2020