



УДК 582.475:581.1:504.5

**ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
НА ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИЙ АППАРАТ *PINUS SYLVESTRIS L.*
I PICEA OBOVATA LEDEB. × *P. ABIES (L.) KARST.*
В СЕВЕРНОЙ ТАЙГЕ БАССЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ**

© *С.Н. Тарханов, д-р биол. наук*
С.Ю. Бирюков, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.

Институт экологических проблем Севера УрО РАН, наб. Северной Двины, 23,
г. Архангельск, Россия, 163000
E-mail: tarkse@yandex.ru

В ельниках черничных свежих северной тайги бассейна Северной Двины при атмосферном загрязнении наблюдается увеличение содержания в однолетней хвое подроста и древостоя ели фотосинтетических пигментов, особенно хлорофилла. Выявлена обратная зависимость содержания пигментов в однолетней хвое подроста ели от расстояния до источника эмиссии. В сосняках черничных свежих и, особенно, сфагновых с приближением к источнику эмиссий (Архангельская ТЭЦ, Архангельский ЦБК) интенсивность фотосинтеза, содержание хлорофиллов и каротиноидов в однолетней хвое древостоя сосны существенно снижаются.

Ключевые слова: атмосферное загрязнение, сосна, ель, хвоя, фотосинтез, фотосинтетические пигменты.

В низовье бассейна Северной Двины аэротехногенное воздействие на леса на протяжении 40...60 лет определяется главным образом выбросами кислотообразующих соединений серы от целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). Среди выбросов Архангельского и Соломбальского ЦБК преобладают неорганическая пыль (31,5 тыс. т/год) и диоксид серы (более 11,0 тыс. т/год). Основной объем выбросов Архангельской ТЭЦ приходится на долю диоксида серы (около 23,0 тыс. т/год). Это обуславливает специфику качественного состава атмосферных эмиссий, в частности увеличение доли содержания высокотоксичных для растений сернистых соединений. Особенности загрязнения определяют ответные реакции растений.

Обширная литература освещает негативное действие диоксида серы на фотосинтетический аппарат листьев, дыхательный процесс, ферментативную активность, азотный метаболизм, клеточную энергетику и другие компоненты физиолого-биохимического статуса растений [5, 10, 11, 17–20].

Интенсивность фотосинтеза и концентрация фотосинтетических пигментов однолетней хвой сосны и ели в период вегетации

Тип леса	Анализируемая порода, элемент леса	Расстояние до источника выбросов, км	Фотосинтез, мг CO ₂ /(г сух. массы·ч)	Фотосинтетические пигменты, мг/г свежей массы				Всего пигментов
				Хлорофилл а	Хлорофилл b	Сумма a + b	Каротиноиды	
Архангельская ТЭЦ								
Е-черн. св.	Е*, древостой	11	19,1±1,0	0,743±0,014	0,331±0,012	1,074±0,019	0,147±0,004	1,221±0,020
		80	19,9±1,9	0,734±0,007	0,312±0,008	1,046±0,011	0,129±0,002	1,176±0,022
С-сф.	С*, древостой	7	18,3±0,7	0,640±0,011	0,232±0,004	0,872±0,013	0,165±0,002	1,037±0,011
		12	24,4±1,2	0,813±0,010	0,291±0,005	1,104±0,013	0,176±0,002	1,280±0,017
Архангельский ЦБК								
С-черн. св.	С**, древостой	5	29,3±0,6	0,870±0,003	0,334±0,01	1,204±0,003	0,187±0,002	1,391±0,004
		20	34,4±1,2	0,937±0,004	0,352±0,002	1,289±0,005	0,199±0,003	1,488±0,003
С-черн. св.	Е***, подрост	4	–	0,616±0,027	0,314±0,023	0,920±0,044	0,161±0,008	1,082±0,049
		7	–	0,667±0,016	0,199±0,016	0,865±0,028	0,206±0,005	1,072±0,030
		13	–	0,678±0,018	0,187±0,006	0,875±0,024	0,209±0,007	1,083±0,030
		20	–	0,538±0,015	0,171±0,009	0,709±0,026	0,172±0,005	0,881±0,025

* I декада июля 1996 г., ** I декада июля 1997 г., *** I декада июля 1998 г.

Исследования проводили в ельниках и сосняках черничных свежих на подзолистых почвах, а также в сосняках сфагновых на болотных верховых почвах. Для определения физиолого-биохимических показателей сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea obovata* Ledeb. × *P. Abies* (L.) Karst.) закладывали пробные площади (ПП) в однотипных хвойных насаждениях на различных расстояниях от источника выбросов в соответствии с направлением господствующих в вегетационный период ветров в исследуемом регионе. Скорость потенциального фотосинтеза определяли радиометрическим методом [3] по количеству поглощенной листом ¹⁴CO₂ при максимальной для фотосинтеза освещенности в данной местности (35...60 тыс. лк) на 5 модельных деревьях древостоев сосны и ели (повторность 4–6-кратная), содержание фотосинтетических пигментов однолетней хвой – спектрофотометрическим методом на 5–10 особях древостоя и подроста [12, 15].

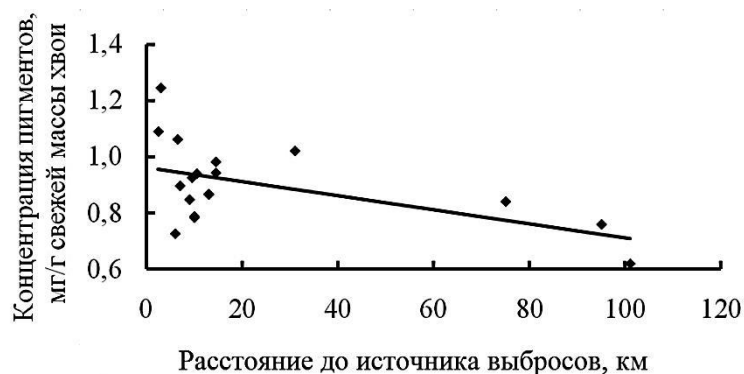
Установлено, что при хроническом воздействии невысоких концентраций загрязняющих веществ в естественных условиях происходит увеличение активации синтеза и повышение накопления пигментов [4, 9]. Влияние высоких доз поллютантов вследствие промышленных выбросов приводит к деградации фотосинтетических пигментов [7, 11, 14, 16] и снижению интенсивности фотосинтеза [2, 6, 11]. Согласно нашим данным (см. таблицу), можно отметить несущественные различия ($t < t_{0,05}$) интенсивности фотосинтеза одно-

летней хвои деревьев в древостое ели при атмосферном загрязнении и в фоновых условиях произрастания ельников черничных свежих. При этом стимулируется синтез зеленых пигментов, что приводит к увеличению общего содержания пигментов в хлоропластах. Интенсивность фотосинтеза деревьев в древостое сосняков как черничных, так и сфагновых, произрастающих на расстоянии 5...7 км от источников выбросов (Архангельская ТЭЦ, Архангельский ЦБК), существенно снижается ($p < 0,05$).

Известно, что интенсивность фотосинтеза зависит от погодных условий. В вегетационный сезон 1998 г., отличающийся большим количеством выпавших осадков, в насаждениях черничного типа у сосны потери фотосинтеза на расстоянии 5 км от источника эмиссии несколько уменьшились (до 8...9 %) по сравнению с засушливым летним сезоном 1997 г. (14...15 %). Ранее установлено [8], что у сосны в сосняках черничного типа на расстоянии 5 км от Архангельского ЦБК скорость фотосинтеза в пересчете на весь побег по сравнению с сосной на удалении 20 км от ЦБК снижалась в 2 раза, в пересчете на сухую массу хвои – на 15 %. Это согласуется с более ранними данными [1, 2]. Различия между этими участками в скорости фотосинтеза в пересчете на хлорофилл незначительны [13].

Нами выявлена обратная зависимость содержания пигментов хлоропластов в однолетней хвое подроста ели (июль 1999 г.) от расстояния до источника выбросов в насаждениях черничного типа ($p < 0,05$, $r = -0,53$) (см. рисунок).

Это в определенной степени свидетельствует о стимуляции пигментобразования ели при умеренном загрязнении атмосферного воздуха (более 2,5...3,0 км от ТЭЦ, ЦБК) в насаждениях черничного типа. Как показали результаты однофакторного дисперсионного анализа, вклад рассматриваемого фактора в общее варьирование пигментного фонда подроста ели в лесорастительных условиях черничного типа достоверен при критических значениях критерия Фишера F ($p < 0,05$).



Зависимость концентрации пигментов хлоропластов хвои подроста ели от расстояния до источника выбросов в насаждениях черничного типа

В то же время наблюдается существенное снижение (при критических значениях t) содержания хлорофиллов и каротиноидов в однолетней хвое сосны в сосняках черничных свежих и, особенно, сфагновых с приближением к источнику эмиссий (см. таблицу).

Таким образом, в хвойных насаждениях черничного типа у древостоя и подроста ели на подзолистых почвах северной тайги при атмосферном загрязнении наблюдается стимулирование процессов пигментообразования, особенно дополнительного синтеза хлорофилла хвои. Сосна, преимущественно в древостое сфагновых сосняков на болотных верховых торфяных почвах, испытывающая острый дефицит кислорода и элементов питания, более чувствительна к аэротехногенному воздействию. В данных условиях, вблизи источников выбросов, могут развиваться процессы деструкции ее пигментного комплекса и снижается интенсивность фотосинтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов А.В., Шевнин Ю.А. Оценка степени поражения фотосинтеза сосны обыкновенной аэротехногенными выбросами // Экология. 1998. № 4. С. 89–91.
2. Влияние длительности воздействия токсичных поллютантов на состояние устьиц и фотосинтез хвои *Pinus sylvestris* L. / Л.К. Кайбияйнен, П. Харри, Г.И. Софронова, В.К. Болондинский // Физиология растений. 1995. Т. 42, № 5. С. 751–757.
3. Вознесенский В.Л., Заленский О.А., Семихатова О.А. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений М.; Л.: Наука, 1965. 305 с.
4. Гирс Г.И. Физиология ослабленного дерева. Новосибирск: Наука, 1982. 255 с.
5. Загрязнение воздуха и жизнь растений / Под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 535 с.
6. Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. К.: Наук. думка, 1978. 246 с.
7. Киртичникова Т.В., Шавнин С.А., Кривошеева А.А. Состояние фотосинтетического аппарата хвои сосны и ели в зонах промышленного загрязнения при различных микроклиматических условиях // Физиология растений. 1995. Т. 42, № 1. С. 107–113.
8. Коновалов В.Н., Тарханов С.Н., Костина Е.Г. Состояние ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в условиях аэрального загрязнения // Лесоведение. 2001. № 6. С. 43–46.
9. Коршиков И.И. Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды. К.: Наук. думка, 1996. 238 с.
10. Морфофизиологическая реакция *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. при техногенном воздействии в условиях Северо-Запада России / В.Б. Придача, Т.А. Сазонова, Т.Ю. Таланова, А.В. Ольчев // Экология. 2011. № 1. С. 25–33.
11. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 278 с.
12. Практикум по физиологии растений / Н.Н. Третьяков, Т.В. Карнаухов, Л.А. Паничкин [и др.]. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
13. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения. Диагностика состояния. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 333 с.

14. Тужилкина В.В., Ладанова Н.В., Плюсина С.Н. Влияние техногенного загрязнения на фотосинтетический аппарат сосны // Экология. 1998. № 2. С. 89–93.
15. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биологические методы в физиологии растений. М., 1971. С. 154–170.
16. Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO₂ – fumigated leaves of spinach / K. Shimazaki, T. Sakaki, N. Kondo, K. Sugahara // Plant & Cell Physiology. 1980. Vol. 21, N 7. P. 1193–1204.
17. Manninen S., Huttunen S. Needle and lichen sulfur analyses on two industrial gradients // Water, Air and Soil Pollution. 1991. Vol. 59. P. 153–163.
18. Smith W.H. Air pollution and forest: Interactions between air contaminants and forest ecosystems. New York etc., 1981. 379 p.
19. Stefan K. Abgrenzung des Einflussbereiches verschiedener Immissionsquellen mit Hilfe von Luft und Nadelanalysen auf dem Hauselberg bei Leolen // Mitt. Forstl. Bundesversuchs Anst. Wien. 1980. N 131. S. 79–81.
20. Wulff A., Karenlampi L. Effects of long-term open-air exposure to fluoride, nitrogen compounds and SO₂ on visible symptoms, pollutant accumulation and ultrastructure of Scots pine and Norway spruce seedlings // Trees. 1996. Vol. 10. P. 157–171.

Поступила 22.03.12

Influence of Air Pollution on the Photosynthetic Apparatus of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst. in the Northern Taiga, Northern Dvina Basin

S.N. Tarkhanov, Candidate of Agriculture

S.Yu. Biryukov, Candidate of Biology, Senior Researcher

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, 163000, Arkhangelsk, Russia
E-mail: tarkse@yandex.ru

Under conditions of air pollution in fresh blueberry spruce forests, we detected increased content of photosynthetic pigments, especially chlorophyll, in annual needles of spruce undergrowth and trees. Further, we observed an inverse relationship between the pigment content in annual spruce needles and the distance from the emission source in blueberry stands. The rate of photosynthesis as well as chlorophyll and carotenoid content in annual pine needles in fresh blueberry forests, especially the sphagnous ones, were significantly reduced the closer they were to the source of emissions (Arkhangelsk Heat Station, Arkhangelsk Pulp and Paper Mill).

Keywords: air pollution, pine, spruce, needles, photosynthesis, photosynthetic pigments.

REFERENCES

1. Bazhenov A.V., Shevnin Yu.A. Otsenka stepeni porazheniya fotosinteza sosny obyknovennoy aerotekhnogennymi vybrosami [Assessment of the Damage to Pine Photosynthesis Caused by Airborne Industrial Emissions]. *Ekologiya*, 1998, no. 4, pp. 89–91.
2. Kaybiyaynen L.K., Kharri P., Sofronova G.I., Bolondinskiy V.K. Vliyanie dlitel'nosti vozdeystviya toksichnykh pollyutantov na sostoyanie ust'its i fotosintez khvoi *Pinus sylvestris* L. [Effect of the Length of Exposure to Toxic Pollutants on the State of Stomata and Needle Photosynthesis in *Pinus sylvestris* L.]. *Fiziologiya rasteniy*, 1995, vol. 42, no. 5, pp. 751–757.
3. Voznesenskiy V.L., Zalenskiy O.A., Semikhatova O.A. *Metody issledovaniya fotosinteza i dykhaniya rasteniy* [Methods of Studying Plant Photosynthesis and Respiration]. Moscow, Leningrad, 1965. 305 p.
4. Girs G.I. *Fiziologiya oslablennogo dereva* [Weakened Tree Physiology]. Novosibirsk, 1982. 255 p.
5. *Zagryaznenie vozdukha i zhizn' rasteniy* [Air Pollution and Plant Life]. Ed. by M. Treshou. Leningrad, 1988. 535 p.
6. Il'kun G.M. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya* [Atmospheric Pollutants and Plants]. Kiev, 1978. 246 p.
7. Kirpichnikova T.V., Shavnin S.A., Krivosheeva A.A. Sostoyanie fotosinteticheskogo apparata khvoi sosny i eli v zonakh promyshlennogo zagryazneniya pri razlichnykh mikroklimaticeskikh usloviyakh [Photosynthetic Apparatus in the Needles of Pine and Spruce Grown in Areas of Industrial Pollution Under Different Microclimatic Conditions]. *Fiziologiya rasteniy*, 1995, vol. 42, no. 1, pp. 107–113.
8. Konovalov V.N., Tarkhanov S.N., Kostina E.G. Sostoyanie assimilyatsionnogo apparata sosny obyknovennoy v usloviyakh aeral'nogo zagryazneniya [State of Assimilation Apparatus of Scots Pine in the Air Pollution]. *Lesovedenie*, 2001, no. 6, pp. 43–46.
9. Korshikov I.I. *Adaptatsiya rasteniy k usloviyam tekhnogenno zagryaznennoy sredy* [Plant Adaptation to Anthropogenic Pollution of the Environment]. Kiev, 1996. 238 p.
10. Pridacha V.B., Sazonova T.A., Talanova T.Yu., Ol'chev A.V. Morfofiziologicheskaya reaktsiya *Pinus sylvestris* L. i *Picea obovata* Ledeb. pri tekhnogenom vozdeystvii v usloviyakh Severo-Zapada Rossii [Morphophysiological Responses of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. to Industrial Pollution Under Conditions of Northwestern Russia]. *Ekologiya*, 2011, no. 1, pp. 25–33.
11. Nikolaevskiy V.S. *Biologicheskie osnovy gazoustoychivosti rasteniy* [Biological Basis of Gas Resistance in Plants]. Novosibirsk, 1979. 278 p.
12. Tret'yakov N.N., Karnaukhov T.V., Panichkin L.A., et al. *Praktikum po fiziologii rasteniy* [Practical Works on Plant Physiology]. Moscow, 1990. 271 p.
13. Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Konovalov V.N. *Lesnye ekosistemy basseyna Severnoy Dviny v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya. Diagnostika sostoyaniya* [Forest Ecosystems of the Northern Dvina Basin in Atmospheric Pollution. Analysis of the State]. Yekaterinburg, 2004. 333 p.
14. Tuzhilkina V.V., Ladanova N.V., Plyusnina S.N. Vliyanie tekhnogennoho zagryazneniya na fotosinteticheskiy apparat sosny [Effect of Industrial Pollution on the Photosynthetic Apparatus of Pine]. *Ekologiya*, 1998, no. 2, pp. 89–93.

15. Shlyk A.A. Opredelenie khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'ev [Determination of Chlorophylls and Carotenoids in Extracts of Green Leaves]. *Biologicheskie metody v fiziologii rasteniy* [Biological Methods in Plant Physiology]. Moscow, 1971, pp. 154–170.
 16. Shimazaki K., Sakaki T., Kondo N., Sugahara K. Active Oxygen Participation in Chlorophyll Destruction and Lipid Peroxidation in SO₂ – Fumigated Leaves of Spinach. *Plant & Cell Physiology*, 1980, vol. 21, no. 7, pp. 1193–1204.
 17. Manninen S., Huttunen S. Needle and Lichen Sulfur Analyses on Two Industrial Gradients. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, vol. 59, pp. 153–163.
 18. Smith W.H. *Air Pollution and Forest: Interactions Between Air Contaminants and Forest Ecosystems*. New York, 1981. 379 p.
 19. Stefan K. Abgrenzung des Einflussbereiches verschiedener Immissionsquellen mit Hilfe von Luft und Nadelanalysen auf dem Hauselberg bei Leolen. *Mitt. Forstl. Bundesversuchs Anst. Wien*, 1980, no. 131, pp. 79–81.
 20. Wulff A., Karenlampi L. Effects of Long-Term Open-Air Exposure to Fluoride, Nitrogen Compounds and SO₂ on Visible Symptoms, Pollutant Accumulation and Ultrastructure of Scots Pine and Norway Spruce Seedlings. *Trees*, 1996, vol. 10, pp. 157–171.
-
-