

**Влияние аэротехногенного загрязнения
целлюлозно-бумажного производства
на пигментный комплекс сосны обыкновенной**

© 2021. В. В. Тужилкина, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tuzhilkina@ib.komisc.ru

Рассмотрены результаты изучения влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» на пигментную систему хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в сосняках черничном и лишайниковом за 25-летний период наблюдений. Проведён сравнительный анализ показателей пигментного комплекса сосны фонового района и зоны действия производства (импактная зона). Установлено, что в 1993–1995 гг. аэротехногенное загрязнение среды в зоне значительного влияния с уровнем техногенной нагрузки в 20–100 раз превышающей фоновые значения, оказывало отрицательное влияние на пигментный комплекс сосны. Поллютанты приводили к подавлению синтеза фотосинтетических пигментов. Пластидный аппарат сосны приспособлялся к условиям загрязнения среды путём изменения соотношения компонентов. Изменения в пигментном комплексе хвои в сосняке лишайниковом происходили за счёт снижения содержания хлорофилла *b*, а в черничном – хлорофилла *a*. При снижении объёма промышленных выбросов в 2015–2018 гг. в пигментном аппарате хвои произошли изменения у сосны в импактной зоне влияния производства. В хлоропластах отмечается увеличение содержания пигментов даже на территории, прилегающей к источнику эмиссии. С ослаблением техногенной нагрузки (в районе умеренного загрязнения) происходит накопление хлорофиллов и каротиноидов, фотосинтетическая и дыхательная способности хвои не претерпевают изменений. Это свидетельствует о сохранении стабильного уровня основных процессов жизнедеятельности сосны и устойчивости её к условиям загрязнения.

Ключевые слова: сосна, целлюлозно-бумажное производство, аэротехногенное загрязнение, пигменты, хвоя, фотосинтез, дыхание.

**Effect of aerotechnogenic impact
of pulp and paper production
on the pigment complex of Scots pine**

© 2021. V. V. Tuzhilkina ^{ORCID: 0000-0002-4415-6598}
Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: tuzhilkina@ib.komisc.ru

Here we present the results of studying the effect of aerotechnogenic emissions of pulp and paper production of Mondi Syktyvkar Timber Processing Complex JSC (STPC) on the pigment system of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in blueberry and lichen pine forests over a 25-year observation period. We conducted comparative analysis of the indicators of the pigment complex of the pine in background and impacted areas. In 1993–1995, aerotechnogenic pollution of the environment was 20–100 times higher in the area of strong impact compared to the background and had a negative impact on the Scots pine pigment complex. Pollutants were found to inhibit the synthesis of photosynthetic pigments. The pine plastid apparatus adapts to the condition of pollution by changing the ratio of pigment components. Changes in the pigment complex of needles occurred in lichen pine forests due to reduction of chlorophyll *b* content, in blueberry type of forest – chlorophyll *a*. After the decrease in volume of industrial emissions in 2015 and 2018, several changes occurred in the pigment apparatus of pine needles in the impacted area. In view of a significant reduction in industrial emissions, chloroplasts demonstrated an increase in pigment content even in the area adjacent to the emission source. With a weakening technogenic impact (in the area of moderate contamination), the photosynthetic and respiration abilities of the needles do not undergo changes. This indicates the stability of the basic processes of pine vital activity, and its resistance to pollution.

Keywords: pine, pulp and paper industry, air pollution, pigments, needles, photosynthesis, respiration.

Аэротехногенное загрязнение природной среды является наиболее значительным антропогенным стрессом. Для Европейского Северо-Востока России эта проблема чрезвычайно актуальна в связи с деятельностью целлюлозно-бумажных, нефтеперерабатывающих и газодобывающих производств. Промышленное загрязнение является одним из мощных экологических факторов, оказывающих существенное влияние на функционирование лесных экосистем, выполняющих средообразующую функцию на Севере.

В Республике Коми крупнейшим источником эмиссии является АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» (СЛПК). Основными компонентами выбросов этого предприятия в воздушный бассейн являются оксиды углерода, азота, серы, сероводород, сероорганические соединения, минеральная пыль, содержащая карбонаты и сульфиды кальция и натрия. Для оценки состояния и прогноза развития лесных фитоценозов в зоне действия крупного целлюлозно-бумажного производства необходимо знать реакцию и механизмы воздействия поллютантов на ассимиляционный аппарат хвойных, отличающихся высокой чувствительностью к загрязнению среды [1–3]. Повреждение ассимиляционных органов, в первую очередь, проявляется на физиолого-биохимическом уровне [4]. Ряд исследователей отмечает, что применение физиологических подходов в лишеноиндикации является эффективным способом мониторинга загрязнения среды [5]. Известно, что пигментный комплекс чутко реагирует на различные внешние воздействия и является показателем реакции растений и их адаптации к изменяющимся условиям среды [6, 7]. Ранее нами отмечалось влияние промышленных выбросов СЛПК на ультраструктуру клеток мезофилла и пигментный комплекс хвойных [8, 9]. За последние годы на целлюлозно-бумажном производстве отмечена тенденция снижения фоновых концентраций оксида серы (IV) и сероводорода в связи с модернизацией очистных сооружений. В 2006 г. на предприятии внедрена система бесхлорной отбелики целлюлозы. В настоящее время суммарное количество выбросов колеблется от 10,5 до 13,0 тыс. т, что почти в 2–3 раза ниже, чем в 1997–1999 гг. [10, 11].

Цель данной работы – анализ результатов многолетнего мониторинга пигментной системы хвой сосны обыкновенной в сосновых лесах фонового района и импактной зоны целлюлозно-бумажного производства АО «Монди СЛПК».

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в 1993–1995, 2015 и 2018 гг. в сосновых фитоценозах черничных и лишайниковых типов леса на пробных площадях, заложенных для проведения локального мониторинга состояния лесов в зоне аэротехногенного воздействия СЛПК. Экспериментальные участки располагались на разном удалении от производства: 6,5 и 7,3 км – зона значительного воздействия выбросов (уровень техногенной нагрузки превышает фоновые значения в 20–100 раз); 11,0 и 11,2 км – зона умеренного влияния (уровень техногенной нагрузки превышает фоновые в 4–20 раз). Фоновые участки находились в 50–56 км к северу от СЛПК на Ляльском лесозащитном стационаре Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

Для исследований отбирали образцы однолетней хвои с десяти растущих 80–90 летних деревьев сосны с опытных и фоновых участков. Такая биологическая повторность считается достаточной для достоверной характеристики биохимического состава хвои [12]. Побег срезали с середины кроны с южной стороны дерева. Сбор образцов проводили в июле. Анализировали смешанную пробу хвои в пятикратной повторности. Концентрацию зелёных пигментов и каротиноидов определяли на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в ацетоновых экстрактах. Содержание хлорофилла в светособирающем комплексе (ССК) оценивали по соотношению хлорофилла *a* и *b* [13].

Фотосинтетическую способность оценивали по поглощению CO₂, измеренной инфракрасным (ИК) газоанализатором Li COR-6400 (Li COR, США) при насыщающей освещённости и температуре 20 °С. Дыхание измеряли в темноте при 20 °С по выделению CO₂ ИК-газоанализатором. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программных продуктов Excel и Statistica. Значимость отличий исследуемых показателей от контроля проверяли с помощью критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Реакция пигментного комплекса хвои на загрязнение воздуха неодинакова и зависит от техногенной нагрузки. В 1995 г. в зоне значительного влияния (7,3 км от источника эмиссии) с уровнем техногенной нагрузки, в 20–100 раз превышающей фоновые значения,

пигментный аппарат сосны проявлял повышенную чувствительность к токсикантам, выражающуюся в снижении общего количества пластидных пигментов (рис. 1, 2). Следует отметить, что хвоя опытных деревьев отличалась от контрольных не только по суммарному количеству зелёных и жёлтых пигментов. В хвое опытных деревьев сосны в лишайниковом типе леса концентрация хлорофилла *a* уменьшалась на 25%, хлорофилла *b* – на 38%, каротиноидов – на 38% по сравнению с контролем. О преобладающем разрушении хлорофилла *b* под влиянием загрязнения свидетельствует и соотношение компонентов зелёных пигментов, которое увеличилось до 3,9. Так как хлорофилл *b* входит в фонды светособирающих комплексов [14, 15], то его пониженное содержание может способствовать ухудшению светопоглощающих свойств ассимиляционного аппарата. Об этом также свидетельствует уменьшение доли хлорофилла в светособирающем комплексе. Что же касается сосняка черничного, то в этом типе леса наряду со снижением общего фонда зелёных пигментов, количество хлорофилла *a* уменьшается на 29, хлорофилла *b* – на 21, каротиноидов – на 24% по сравнению с контролем. Распределение хлорофилла между ССК и фотосистемами примерно одинаковое. Изменения в пигментном комплексе хвои

в сосняке лишайниковом происходили за счёт снижения содержания хлорофилла *b*, а в черничном – хлорофилла *a*. В литературе нет однозначного мнения по оценке воздействия атмосферного загрязнения на величину соотношения хлорофиллов.

При ослаблении техногенной нагрузки в импактной зоне влияния производства у опытных деревьев также наблюдалось уменьшение концентрации жёлтых пигментов на 29% в лишайниковом типе леса, на 38% – в черничном по сравнению с контрольными, а хлорофиллов – на 14 и 18% соответственно. Снижение содержания общего фонда пигментов в ассимилирующих органах хвойных под воздействием аэротехногенного загрязнения отмечают многие исследователи [6, 16–18].

Исследования пластидного аппарата, проведённые в 2015 и 2018 гг. показали, что в пигментном комплексе сосны произошли изменения по сравнению с 1993–1995 гг. В импактной зоне СЛПК хвоя сосны реагировала на аэротехногенное загрязнение активизацией новообразования пигментов (рис. 1, 2), что обусловлено значительным снижением объёмов атмосферных выбросов загрязняющих веществ. Накопление хлорофиллов и каротиноидов можно рассматривать как адаптивную реакцию, направленную на повышение устойчивости фотосинтетического аппарата

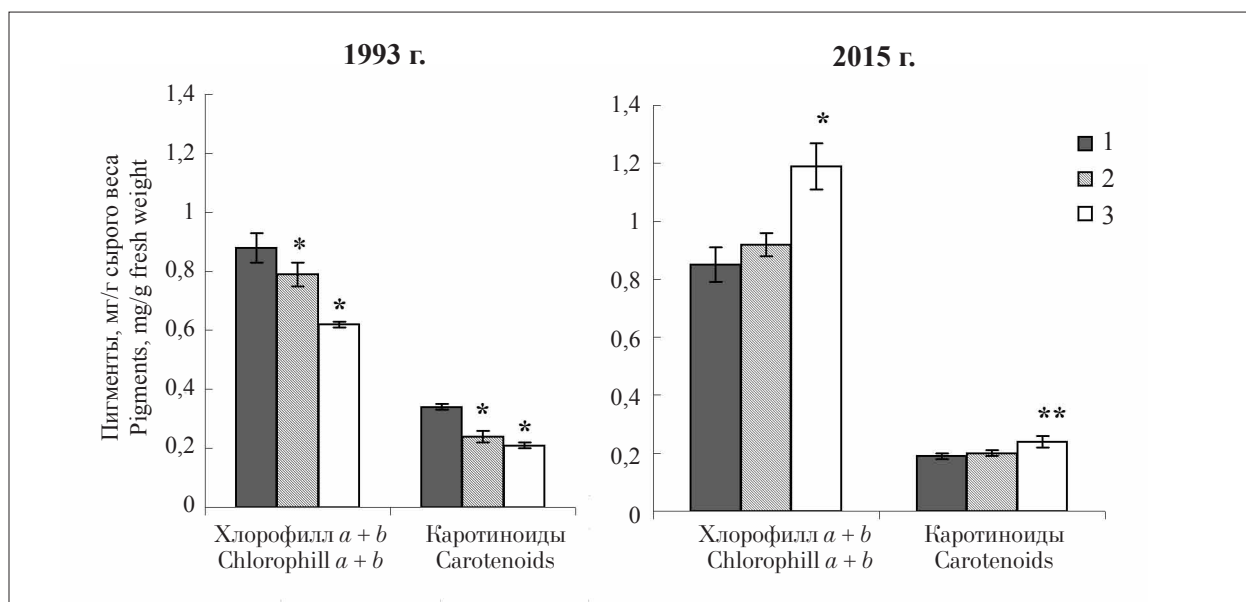


Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое сосны в лишайниковом типе леса в фоновом районе и импактной зоне АО «Монди СЛПК»: 1 – фоновый район; 2 – зона умеренного загрязнения (11 км от СЛПК); 3 – зона значительного загрязнения (7,3 км от СЛПК). Различия с фоном статистически значимы при: * $p \leq 0,01$; ** $p \leq 0,05$

Fig. 1. The content of photosynthetic pigments in the needles of Pine in the lichen type of forest in the background area and pollution zones of “Mondi STPC”: 1 – background area; 2 – zone of moderate pollution (11 km from the STPC); 3 – zone of significant pollution (7.3 km from the STPC). Differences with control are significant at: * $p \leq 0.01$, ** $p \leq 0.05$

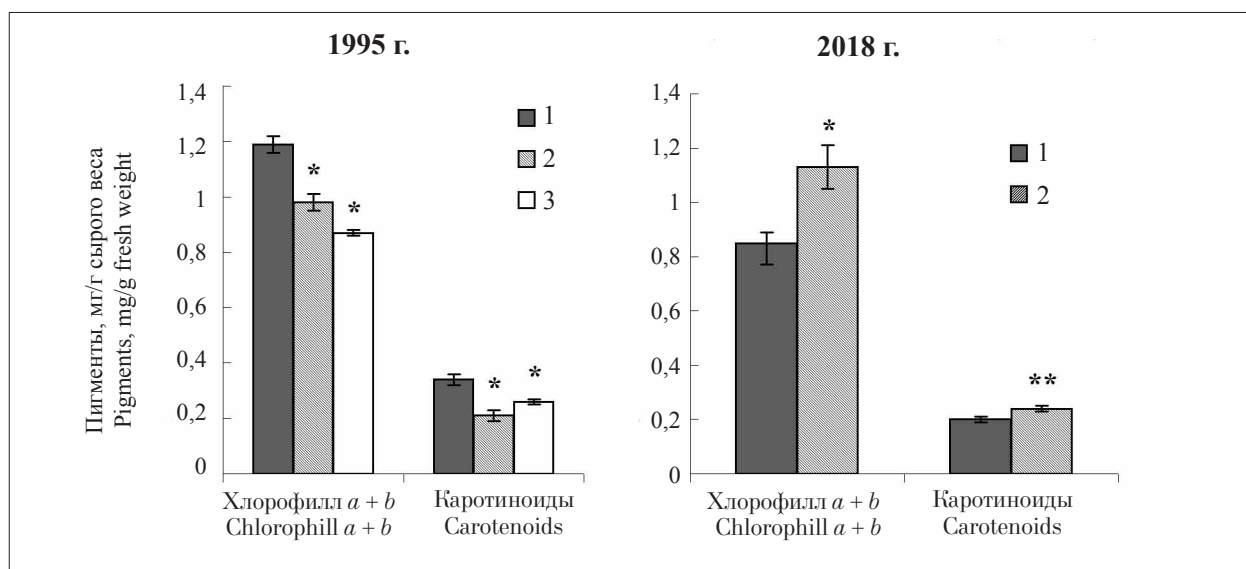


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое сосны в черничном типе леса в фоновом районе и импактной зоне АО «Монди СЛПК»:

1 – фоновый район; 2 – зона умеренного загрязнения (11,2 км от СЛПК);
3 – зона значительного загрязнения (6,5 км от СЛПК).

Различия с фоном статистически значимы при: * $p \leq 0.01$; ** $p \leq 0.05$

Fig. 2. The content of photosynthetic pigments in the needles of Pine in the bilberry type of forest in the background area and pollution zones of “Mondi STPC”:

1 – background area; pollution zones: 2 – zone of moderate pollution (11.2 km from the STPC);
3 – zone of significant pollution (6.5 km from the STPC).

Differences with control are significant at: * $p \leq 0.01$, ** $p \leq 0.05$

к условиям загрязнения среды. Распределение хлорофиллов по фотосинтетическим пулам у экспериментальных деревьев достоверно не отличалось от фоновых (табл.). Расчёт ассимиляционных чисел (АЧ) показал, что хвоя сосны в зависимости от её расположения от источника эмиссии имеет различную фотосинтетическую активность единицы хлорофилла. Величины АЧ варьировали от 1,6 до 4,1 мг CO_2 сухой массы на мг хлорофилла в час. Наименьшая величина АЧ отмечалась у хвои сосен, растущих в 7,3 км от источника эмиссии, что обусловлено меньшей скоростью обновления хлорофилла и неодинаковой ролью различных форм и подфондов хлорофилла в фотосинтезе [19]. Наиболее высокие АЧ были отмечены у сосен, произрастающих в фоновых условиях. Это явление связано, очевидно, с разрушением фотохимически неактивных форм хлорофилла [20], вследствие чего их активность может увеличиваться.

Измерения CO_2 -газообмена сосны показали, что на территории импактной зоны производства с приближением к источнику эмиссии хвоя в лишайниковом типе леса обладала меньшей интенсивностью фотосинтеза по сравнению со скоростью поглощения углекислоты хвоей из фонового района, что

обусловлено низкой работоспособностью единицы хлорофилла (табл.). Скорость выделения CO_2 хвоей в 1,4 раза выше по сравнению с интенсивностью дыхания её из фонового района. Вероятно, повышенная дыхательная активность обеспечивает энергетические потребности адаптации хвои к поллютантам в районе действия производства. Стимуляция процесса дыхания у сосны и ели в условиях промышленной зоны была отмечена другими исследователями [9, 21–23]. Ассимиляционный аппарат сосны характеризуется низким соотношением фотосинтеза и дыхания, которое составило 3,7, что в 2,6 раза меньше по сравнению с контролем.

С ослаблением техногенной нагрузки (11 км от СЛПК), наряду с увеличением содержания зелёных пигментов и уменьшением ассимиляционной активности единицы хлорофилла, прослеживается тенденция снижения интенсивности фотосинтеза. Однако не выявлено достоверных различий по скорости фотосинтеза хвои в исследованных сообществах умеренной зоны и фоновой территории. Скорость темнового дыхания хвои в районе умеренного аэротехногенного загрязнения не отличается от фоновой территории. Таким образом, при снижении аэротехногенной нагрузки интенсивность поглощения CO_2 и скорость

Таблица / Table

Физиолого-биохимические показатели хвои сосны на фоновой территории и в импактной зоне (июль 2015 и 2018 гг.)
Physiological and biochemical parameters of pine needles in the background region and the impact zone (July 2015 and 2018)

Расстояние от СЛПК, км Distance from STPC, km	Хлорофиллы, г/г сухой массы Chlorophylls, mg/g of dry weight		Доля хлорофиллов в ССК, % Share of a chlorophyll in LHC, %	Суммарное содержание каротиноидов мг/г сухой массы Total of carotenoids, mg/g dry weight	Фотосинтез мкмоль CO ₂ /(м ² ·с) Photosynthesis, μmol CO ₂ /(m ² ·s)	Дыхание, мкмоль CO ₂ /(м ² ·с) Respiration, μmol CO ₂ /(m ² ·s)	Ассимиляционное число, мгCO ₂ /(мг хлорофилла·ч) Assimilation number, mg CO ₂ /(mg chlorophyll·h)
	a	b					
Лишайниковый сосняк / Cladinosum pine forests							
56	1,36±0,07	0,49±0,06	2,8±0,2	0,41±0,02	3,67±0,30	0,39±0,04	3,76
11	1,57±0,04**	0,57±0,04	2,8±0,2	0,46±0,03	3,12±0,16	0,42±0,04	2,74
7,3	1,83±0,1*	0,65±0,03**	2,8±0,2	0,50±0,05**	2,02±0,30*	0,55±0,05**	1,63
Черничный сосняк / Blueberry pine forests							
50	1,55±0,10	0,51±0,03	3,0±0,1	0,48±0,02	3,91±0,28	0,30±0,04	4,07
11,2	2,04±0,22**	0,72±0,04	2,8±0,2	0,59±0,02**	3,57±0,28	0,46±0,06	2,96

Примечание: ССК – светособирающий комплекс. Различия с фоном достоверны при: * p ≤ 0,01; ** p ≤ 0,05.
Note: LHC – light-harvesting complex. Differences with control are significant at: * p ≤ 0,01; ** p ≤ 0,05.

темнового дыхания хвои не отличаются от фонового района, что свидетельствует о сохранении стабильного уровня фотосинтетической и дыхательной способности сосны в условиях промышленного загрязнения среды.

Ассимиляционный аппарат сосны в лишайниковых и черничных фитоценозах характеризуется низким соотношением фотосинтеза и дыхания, которое составляло соответственно 3,7; 7,4; 7,7 в импактной зоне СЛПК и 9,4; 13,0 на фоновой территории. Вблизи источника эмиссии скорость темного дыхания хвои составляла 27% от скорости поглощения CO₂ при насыщающей освещённости, что в 2,5 раза больше по сравнению с контролем. При ослаблении загрязнения отмечалось уменьшение в 1,5–1,8 раза доли дыхания от фотосинтеза, что способствует накоплению растворимых углеводов, обладающих защитными свойствами.

Заключение

Многолетние исследования пигментной системы хвои в сосновых сообществах на территории Республики Коми позволили выявить неоднозначную реакцию пигментного комплекса на воздействие аэротехногенных выбросов АО «Монди СЛПК» за периоды наблюдений 1993–1995, 2015, 2018 гг.

Реакция хвои на загрязнение в изучаемых типах леса на уровне пигментной системы была практически идентичной. Характер и направленность содержания хлорофиллов и каротиноидов в хвое изменяются в зависимости от аэротехногенной нагрузки. В 1993–1995 гг. выбросы целлюлозно-бумажного производства при значительной техногенной нагрузке вызывали нарушения в пигментном фонде хвои. Поллютанты снижали общее количество фотосинтетических пигментов. Пластидный аппарат сосны приспосабливался к условиям среды путём изменения соотношения компонентов в пигментном комплексе. В 2015 и 2018 гг. при снижении аэротехногенного загрязнения у сосны в изучаемых фитоценозах выявлена перестройка в пигментном аппарате, направленная на стабилизацию процессов фотосинтеза и дыхания фотосинтетического аппарата и его устойчивости к условиям загрязнения в районе действия целлюлозно-бумажного производства.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН от 10.12.2017 г., номер гос. регистрации АААА-А17-117122090014-8.

References

1. Kulagin Yu.Z. Woody plants and industrial environment. Moskva: Nauka, 1974. 124 p. (in Russian).
2. Kukkola E., Huttunen S., Bäck J., Rautio P. Scots pine needle injuries at subarctic industrial sites // *Trees*. 1997. V. 11. P. 378–387.
3. Yarmishko V.T. Scots pine and atmospheric pollution in the European North. Sankt-Peterburg: GU, 1997. 210 p. (in Russian).
4. Mal'xotra S.S., Xan A.A. Biochemical and physiological effects of priority pollutants // *Air pollution and plant life*. Moskva: Gidrometizdat, 1988. P. 144–189 (in Russian).
5. Golovko T.K., Shelaykih M.A., Zakhozhiy I.G., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. The reaction of the lichens to environmental pollution during the extraction on bauxite in the taiga zone // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.257.50/1995-4301-2018-2-044/2-053/1
6. Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Kononov V.N. Forest ecosystems of the Northern Dvina basin under atmospheric pollution. Diagnostics State. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004. 333 p. (in Russian).
7. Tuzhilkina V.V. The response of the pigment system of conifers to long-term aerotechnogenic pollution // *Ekologiya*. 2009. No. 4. P. 243–248 (in Russian).
8. Tuzhilkina V.V., Ladanova N.V., Plyusnina S.N. Effect of aerotechnogenic pollution on the photosynthetic apparatus of Scots pine // *Ekologiya*. 1998. No. 2. P. 89–93 (in Russian).
9. Tuzhilkina V.V., Plyusnina S.N. Comprehensive assessment of the state of *Picea obovata* (Pinaceae) needle in the condition of aerotechnogenic pollution // *Rastitelnye resursy*. 2014. V. 50. No. 4. P. 579–587 (in Russian).
10. State report on the state of the environment of the Komi Republic. Syktyvkar: Ministerstvo prirodnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Komi, 1997. 148 p. (in Russian).
11. Environmental report 2013–2015 [Internet resource] <http://www.mondigroup.com/> (Accessed: 20.12.2018) (in Russian).
12. Helmisaari H.S. Spatial and age-related variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles // *Silva Fennica*. 1992. V. 26. No. 3. P. 145–153.
13. Lichtenthaler N.K. Chlorophylls and carotenoids-pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology*. 1987. V. 148. P. 350–382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
14. E'dvars D., Uoker D. Photosynthesis of C₃ and C₄ plants: Mechanisms and regulation. Moskva: Mir, 1986. 598 p. (in Russian).
15. Kochubey S.M. Basic principles of the pigment apparatus of higher plants // *Fakty sredy i organizatsiya pervichnogo protsessa fotosinteza*. Kiev: Naukova dumka, 1989. P. 7–21 (in Russian).

16. Getko N.V. Plants in a technogenic environment. Minsk: Nauka i texnika, 1989. 208 p. (in Russian).
17. Krivosheeva A.A., Shavnin S.A., Kalinin V.A., Venediktov P.S. Effect of industrial pollution on seasonal changes in the content of chlorophyll in pine needles // Fiziologiya rasteniy. 1991. V. 38. No. 1. P. 163–168 (in Russian).
18. Bačič T., Ledič A. Changes of pigments content in needles of *Pinus halepensis* Mill // Acta biologia cracoviensia. Series: Botanica. 1992–1993. V. XXXIV–XXXV. P. 71–76.
19. Gaponenko V.I. Chlorophyll renewal in the photosynthesizing apparatus as a physiological process // Problemy biosinteza khlorofilla. Minsk: Nauka i texnika, 1971. P. 78–137 (in Russian).
20. Zima J., Šesták Z. Photosynthetic characteristics during ontogenesis of leaves // Photosynthetica. 1979. V. 3. No. 1. 725 p.
21. Huttunen S., Karhu M., Laine K. Air pollution induced stress and its effects on photosynthesis of *Pinus sylvestris* L. in Outu // Aquilo. Ser. Botanica. 1983. V. 19. P. 275–282.
22. Yarmishko V.T., Deeva N.M., Maznaya E.A., Leina G.D. Effect of industrial emissions on the assimilation apparatus of *Pinus sylvestris* L. and *Vaccinium myrtillus* L. in the European North // Rastitelnye resursy. 1995. No. 3. P. 36–51 (in Russian).
23. Kaybiynen L.K., Sofronova G.I., Bolondinsky V.K. Effect of toxic pollutants on the respiration of needles and shoots of Scots pine // Ekologiya. 1998. No. 1. P. 23–27 (in Russian).