

УДК 582.475:630*114.351:504.054(470.21)

**СОДЕРЖАНИЕ ПОЛЛЮТАНТОВ (NI, CU, S) В ОПАДЕ ХВОИ
СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ СОСНОВЫХ
ЛЕСАХ В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
(МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ)**

Е. А. Иванова¹⁾, Н. В. Лукина²⁾, В. Э. Смирнов²⁾

*¹⁾Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,
ул. Академгородок, 14а, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, Россия,
ea.ivanova@ksc.ru; ²⁾Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, 117997, г. Москва, Россия, nvl07@yandex.ru*

Исследовано влияние аэротехногенного загрязнения на химический состав хвойного опада. На основе статистического анализа данных 2014-2017 гг. показаны различия в содержании основных поллютантов в опаде хвои сосны в северотаежных сосновых лесах в фоновых условиях и в зоне воздействия выбросов медно-никелевого комбината «Североникель». Наблюдаются особенности пространственной изменчивости состава опада с учетом структуры полога леса не только при загрязнении, но и в фоне.

Ключевые слова: хвойный опад; тяжелые металлы; сосновые леса; аэротехногенное загрязнение; пространственная изменчивость.

**THE POLLUTANTS CONTENT (NI, CU, S) IN THE NEEDLE LITTER
OF SCOTS PINE IN NORTHERN TAIGA PINE FORESTS UNDER
AERIAL TECHNOGENIC POLLUTION
(MURMANSK REGION, RUSSIA)**

E. A. Ivanova¹⁾, N. V. Lukina²⁾, V. E. Smirnov²⁾

*¹⁾Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center RAS,
Akademgorodok st., 14a, 184209, Apatity, Murmansk region, Russia, ea.ivanova@ksc.ru
²⁾Center for Forest Ecology and Productivity RAS,
Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, 117997, Moscow, Russia, nvl07@yandex.ru*

The effect of aerotechnogenic pollution on the needle litter chemical composition has been studied. Based on the statistical analysis of 2014-2017 data differences in the content of the main pollutants in the pine needle litter in the northern taiga pine forests at background areas and in the zone of influence of the Severonikel copper-nickel combine emissions are shown. Features of spatial variability of the litter composition are observed taking into account the forest canopy structure not only under pollution, but also in the background areas.

Keywords: needle litter; heavy metals; pine forests; aerial technogenic pollution; spatial variability.

Древесный опад как источник органического вещества почв и элементов питания для биоты является одним из ключевых компонентов биогеохимических циклов в лесных биогеоценозах. Оценка элементного состава листового/хвойного опада деревьев представляет интерес для понимания закономерностей циклов элементов и почвообразования [1-3]. За счет особенностей химического состава листовой и хвойный опад способствует формированию фитогенных зон влияния деревьев, влияет на микробную активность и состав почв [4, 5].

Леса на территории Мурманской области испытывают влияние как природных факторов среды (короткий вегетационный период, низкие температуры), так и аэротехногенного загрязнения – в центральной части региона с 30-х гг. прошлого века функционирует медно-никелевый комбинат «Североникель» (г. Мончегорск, АО «Кольская ГМК»), в атмосферных выбросах которого преобладают сернистый газ и тяжелые металлы. По данным АО «Кольская ГМК» выбросы Ni, Cu и SO₂ в 2014 году составили 0,33, 0,63 и 33,5 тыс. т год⁻¹, соответственно. Известно, что атмосферное загрязнение приводит к деградации лесов, усилению дефолиации деревьев, нарушению процессов ретранслокации элементов внутри деревьев [6-9]. Изучение влияния атмосферного загрязнения на химический состав хвойного опада, в том числе с учетом структуры полога древостоев, важно для оценки состояния и функционирования древостоев, оценки уровня загрязнения, динамики биогеохимических циклов элементов в лесах.

Цель данной работы: оценить влияние аэротехногенного загрязнения комбинатом «Североникель» на химический состав опада хвои сосны (*Pinus sylvestris* L.) с учетом пространственной изменчивости в сосновых лесах на северном пределе распространения.

Исследования проводились на постоянных мониторинговых площадках Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН в северотаежных сосняках кустарничково-лишайниковых на Кольском полуострове и материковой части Мурманской области (Россия). Площадки, в соответствии с уровнем загрязнения и состоянием растительности, характеризуют стадии дигрессионной сукцессии и расположены по градиенту загрязнения в юго-юго-западном направлении от медно-никелевого комбината «Североникель» (г. Мончегорск) на расстоянии 7-10 км в техногенных редколесьях, в 20-100 км в дефолирующих лесах и в 100-200 км – в лесах, формирующихся в фоновых автоморфных условиях [6]. По составу древостоя все объекты исследований — сосновые леса с примесью березы и ели, в прошлом подвергались действию пожаров.

Опад на площадках собирался в 2014-2017 гг. круглогодично в соответствии с рекомендациями международной программы ICP-Forests с применением воронкообразных опадоуловителей, установленных с учетом

мозаичности древесного яруса в межкроновых (по 7-8 шт. на площадку) и подкроновых пространствах (по 4-5 шт.). Отбор образцов проводился дважды в год: в начале октября перед залеганием снега и начале июня после снеготаяния. В лабораторных условиях из общей массы древесного опада выделялась фракция опада хвои сосны.

Анализ содержания элементов проводился в смешанных пробах для подкроновых и межкроновых пространств по-отдельности. Расчеты проводились на абсолютно сухой вес. Перед проведением химического анализа растительный материал подвергали мокрому озолению концентрированной HNO_3 . Концентрации металлов (Cu, Ni) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Aanalyst 800. Общее содержание серы – турбидиметрическим методом [10].

Оценку степени влияния факторов воздушного загрязнения (через стадии дигрессии) и пространственной изменчивости на состав растительного материала оценивали по величине коэффициента детерминации R^2 , показывающего вклад фактора в общую дисперсию рассматриваемого параметра. Статистические анализы проводили с применением V-критерия в среде R [11].

Результаты статистического анализа показали, что загрязнение оказывает существенное влияние на содержание в опаде хвои сосны обыкновенной Ni, Cu, S ($R^2=0.5\div 0.7$). В сосновых лесах в фоновых условиях опад хвои сосны характеризуется относительно низким содержанием изучаемых поллютантов ($p < 0.05$), при приближении к источнику загрязнения содержание Ni, Cu и S достоверно возрастает (таблица). Повышение содержания тяжелых металлов — основных компонентов выбросов комбината «Североникель» (Ni, Cu), наблюдалось также у живой хвои [12].

Содержание тяжелых металлов и серы в опаде хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии, мг/кг

Параметр	Фон	Дефолилирующие леса	Техногенные редколесья
Ni	3,9	69,2	386,7
	2,7	21,5	193,1
Cu	2,4	20,1	78,2
	1,7	6,0	43,4
S	207,0	411,2	596,5
	186,7	186,8	141,4

Примечание: в числителе – среднее, в знаменателе – стандартное отклонение.

Содержание поллютантов проявило также пространственную изменчивость: в фоновых условиях в межкроновых пространствах концентрации Ni и Cu в опаде хвои достоверно в 1,5-2 раза выше ($R^2=0,2$; $p < 0,05$),

чем под кронами деревьев, что может быть связано с фоновым аэротехногенным загрязнением, вызванным переносом поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния [13] и поступающих активнее в окна древостоев. В дефолирующих сосновых лесах опад хвои в подкроновых пространствах содержит в 1,4 раза больше S ($p < 0,05$), чем между крон, что связано с ее поступлением с кислотными атмосферными осадками.

Таким образом, аэротехногенное загрязнение вызывает изменения химического состава хвойного опада в сосновых лесах северотаежной лесной зоны, способствует изменению пространственной изменчивости состава опада с учетом структуры полога леса. Увеличение содержания тяжелых металлов в хвойном опаде приводит к повышенному поступлению их в почву, что может оказывать непосредственное влияние на состояние лесных экосистем Севера и выполнение ими экосистемных функций.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН (Пер. № 122022400120-2).

Библиографические ссылки

1. Решетникова Т. В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 74–81.
2. Meier I. C., Leuschner Ch., Hertel D. Nutrient return with leaf litter fall in *Fagus sylvatica* forests across a soil fertility gradient // Plant Ecology. 2005. Vol. 177, iss. 1. P. 99–112.
3. Wood T. E., Lawrence D., Clark D. A. Determinants of leaf litter nutrient cycling in a tropical rain forest: soil fertility versus topography // Ecosystems. 2006. № 9. P. 700–710.
4. Уфимцев В. И., Егорова И. Н. Роль растительного опада в формировании фитогенных полей сосны обыкновенной на техногенных элювиях Кузбасса // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 116–120.
5. Aponte C., García L. V., Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 36–46.
6. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН, 1998.
7. Тарханов С. Н. Поврежденность хвойных древостоев устья и дельты Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 1-3. С. 394–399.
8. Черненко Т. В., Бочкарев Ю. Н., Фридрих М., Беттгер Т. Воздействие природно-антропогенных факторов на радиальный прирост деревьев Кольского Севера // Лесоведение. 2012. № 4. С. 3–15.
9. Vacek S., Vacek Z., Bílek L., Simon J., Remeš J., Hůnová I., Král J., Putalová T., Mikeska M. Structure, regeneration and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution // Silva Fennica. 2016. Vol. 50. № 4. Article id 1564. 21 p. [Electronic resource]. URL: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1564>. (date of access: 13.02.2024).

10. Воробьева Л. А. Химический анализ почв: Учебник. М.: Изд. Московского гос. ун-та, 1998.
11. *Husson F., Le S., Pages J.* Exploratory multivariate analysis by example using R. 2nd ed. London: Chapman & Hall/CRC Press. 2017. 248 p.
12. Сухарева Т. А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2013. № 6 (336). С. 19–28.
13. Ершов В. В., Лукина Н. В., Данилова М. А., Исаева Л. Г., Сухарева Т. А., Смирнов В. Э. Оценка состава дождевых выпадений в хвойных лесах на северном пределе распространения при азротехногенном загрязнении // Экология. 2020. № 4. С. 265–274.