
СООБЩЕНИЯ

СРЕДООБРАЗУЮЩАЯ ФУНКЦИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА СОСНОВЫХ ЛЕСОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2024 г. И. В. Лянгузова^{1,*}

¹Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197022, Россия

*e-mail: ilyanguzova@binran.ru

Поступила в редакцию 16.08.2024 г.
Получена после доработки 03.10.2024 г.
Принята к публикации 08.10.2024 г.

В работе представлены результаты изучения средообразующей функции почвенно-растительного покрова фоновых средневозрастных сосновых лесов Кольского полуострова и при разном уровне аэротехногенного загрязнения окружающей среды выбросами медно-никелевого комбината “Североникель” (Мурманская обл.). На постоянных пробных площадях, расположенных по градиенту аэротехногенного загрязнения, проведен учет общего запаса надземной биомассы напочвенного покрова, растительного опада и лесной подстилки и охарактеризовано соотношение запасов биомассы травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Установлено, что по мере приближения к источнику загрязнения уменьшаются запасы биомассы всех компонентов напочвенного покрова сосновых лесов; из состава растительных сообществ выпадают мохообразные — наиболее чувствительные к стрессовому фактору виды; изменяется видовой состав лишайников, что приводит к снижению запасов их надземной биомассы; сокращается доля мохово-лишайникового яруса в общем запасе биомассы вплоть до полного исчезновения в импактной зоне; возрастают внутриценотическая гетерогенность и контрастность в распределении запасов биомассы всех компонентов напочвенного покрова, что может быть обусловлено высокой степенью неоднородности уровня загрязнения верхнего органогенного горизонта подзола тяжелыми металлами. В результате происходит значительная потеря средообразующей функции напочвенного покрова, который выравнивает гидротермический режим местообитаний в сосновых лесах. Воздействие аэротехногенного загрязнения сказывается на процессах разложения растительных остатков, что приводит к возрастанию запасов растительного опада и лесной подстилки.

Ключевые слова: средообразующая функция, напочвенный покров, запас биомассы, мортмасса, лесная подстилка, растительный опад, северная тайга, тяжелые металлы, аэротехногенное загрязнение, Кольский полуостров

DOI: 10.31857/S0006813624100031, EDN: OLCSCN

Различные аспекты взаимодействия “лес—почва” исследуются уже достаточно давно, при этом значительная доля публикаций относится к изучению средообразующей роли деревьев, как “экосистемных инженеров”, формирующих и преобразующих среду обитания наземных растений (Trefilova et al., 2021; Lukina et al., 2021; Rozenberg, 2022). Это явление получило название “фитогенное поле”, определение которого впервые дал А.А. Уранов (Uranov, 1965). Наиболее ярко воздействие фитогенного поля на окружающую среду проявляется для одиночно стоящих деревь-

ев (Ipatov, 2007; Ipatov et al., 2009; Zhuravleva et al., 2012). Сложная структура фитогенного поля в растительных сообществах определяется многообразием форм влияния самого растения и внешних факторов, что приводит к неоднородности напочвенного покрова (Kryshen, 2000).

Живой напочвенный покров представляет собой очень важный структурный и энергетический компонент лесных экосистем, который быстрее реагирует на действие внешних нарушений, чем древостой. В хвойных лесах северной тайги очень значительна роль напочвенного покрова, одной

из основных функций которого является создание оптимального гидротермического режима верхних горизонтов почвы, обеспечение условий для разложения органического вещества и поглощения минеральных веществ корнями растений, при этом главную средообразующую функцию на всех этапах постпирогенной сукцессии выполняет мохово-лишайниковый ярус (Gorshkov et al., 2013).

Растительный опад (листья, хвоя, почки, побеги, плоды, корни и др., отмирающие в течение определенного времени) и лесная подстилка в экосистемах северной тайги — не менее важные компоненты почвенно-растительного покрова и выполняют основную средообразующую функцию по выравниванию теплового и водного режима верхних биологически активных горизонтов почвы. Растительный опад является источником органического углерода и элементов минерального питания, которые становятся доступными для биоты в ходе его разложения и минерализации, причем на скорость разложения растительных остатков влияет сочетание качества растительного материала, температурного режима и количества осадков, связанных с типом леса (Ivanova et al., 2023). Качество лесной подстилки зависит от видового состава деревьев, возрастной структуры древостоя, а также этапов онтогенетического развития древесных растений и определяется соотношением макроэлементов (N, P, K, Ca, Mg) и различных органических веществ (полифенолы, лигнин и др.) в подстилке (Basova et al., 2023), важным показателем является соотношение C/N (Berg, McClaugherty, 2020). Качество подстилки регулирует скорость разложения растительных остатков, которые являются основным источником питательных веществ для сапрофагов (Krishna, 2017). Средообразующая роль лесной подстилки в бореальных лесах определяется ее высокой водоудерживающей способностью и аккумуляцией зольных элементов и азота (Telesnina et al., 2018; Nadporozhskaya et al., 2018). Хорошо известно, что лесная подстилка в значительной степени определяет химические свойства, водный и тепловой режим верхнего корнеобитаемого слоя почв, является областью концентрации сосущих корней, банка семян, средой обитания большинства видов грибов, микроорганизмов и беспозвоночных. Толщина и запас лесной подстилки зависит от многочисленных факторов, в частности, возраста

древостоя, определяемого давностью последнего пожара; типа растительной микрогруппировки (лишайниковая, брусничная, черничная, зеленомошная); количества и качества поступающего опада и условий его трансформации (режимы температуры и влажности) (Gorshkov et al., 2005; Nadporozhskaya et al., 2018; Telesnina et al., 2018; Semenyuk et al., 2020; Akhmetova, 2022; Bakhmet et al., 2022).

Изучение мозаики напочвенного покрова и верхних горизонтов почв в пределах лесного биогеоценоза преимущественно проводилось в северотаежных еловых лесах или среднетаежных еловых и пихтовых лесах, где внутриценозная мозаичность выражена наиболее контрастно (Lebedeva et al., 2005, 2015; Orlova et al., 2011, 2016; Artemkina et al., 2018; Smirnova et al., 2011; Lugovaya et al., 2013; Lukina et al., 2018). В подзоне елово-широколиственных лесов выявлены четкие закономерности изменения в видовом составе живого напочвенного покрова ельников в зависимости от положения в тессере (Semenyuk et al., 2020). Значительно меньше работ посвящено изучению пространственной гетерогенности напочвенного покрова и верхних горизонтов почв в светлохвойных (сосновых, лиственничных) лесах, что, по-видимому, связано с их более равномерной освещенностью (Lebedeva et al., 2006, 2016; Lukina et al., 2018; Demianov, 1982; Nikonov et al., 2002; Ivanova et al., 2019; Lyanguzova, Primak, 2019; Nagimov et al., 2022).

В настоящее время одним из наиболее мощных экологических факторов является аэротехногенное загрязнение окружающей среды, которое оказывает негативное воздействие на структуру и продуктивность фитоценозов, а также вносит дополнительный вклад в формирование пространственной неоднородности накопления и разложения органического вещества, способствует изменению фракционного состава, запасов и скорости разложения растительного опада и приводит к трансформации свойств лесных подстилок (Zvereva, Kozlov, 2004, 2007; Dynamics..., 2009; Vorobeichik, Pishchulin, 2009, 2011, 2016; Ivanova, Lukina, 2017; Odintsov et al., 2018; Ivanova et al., 2019).

Мурманская область, занимающая практически полностью территорию Кольского полуострова, является одним из наиболее индустри-

ально развитых регионов России, здесь расположены многочисленные предприятия цветной и черной металлургии, минеральных удобрений и строительных материалов, лесной, деревообрабатывающей и рыбной промышленности. Металлургический комбинат “Североникель” был основан в середине 1930-х гг. в г. Мончегорске для выплавки цветных металлов из полиметаллических руд. Он всегда был и остается одним из ведущих предприятий никелевой промышленности СССР и России, занимает ведущие позиции в мировом производстве никеля. На различных этапах производственного цикла в атмосферу поступает диоксид серы с примесью мелкодисперсной полиметаллической пыли, содержащей в основном соединения Ni, Cu, Co. В результате многолетнего техногенного воздействия комбината на окружающую среду произошла ее трансформация, хвойные леса на площади 3.7 тыс. га полностью уничтожены. Согласно опубликованным данным в период 1981–1990 гг. ежегодный объем атмосферных выбросов SO₂ комбината “Североникель” превышал в среднем 220 тыс. т, твердых веществ — 16 тыс. т, затем происходило постепенное снижение объемов выбросов, и к концу XX в. они составляли соответственно 45.8 тыс. и 6.0 тыс. т в год. В настоящее время ежегодный объем выбросов SO₂ и твердых веществ составляет соответственно 35–37 тыс. и 2.9–3.4 тыс. т в год.

В рамках настоящей работы были поставлены следующие задачи: оценить общий запас надземной биомассы напочвенного покрова, растительного опада и лесной подстилки по градиенту аэротехногенного загрязнения; охарактеризовать соотношение запасов биомассы травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов средневозрастных сосновых лесов в фоновом районе Кольского полуострова и на загрязненной территории; выявить внутриценотическую неоднородность запасов биомассы кустарничков, мхов и лишайников, а также запасов растительного опада и лесной подстилки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в средневозрастных сосновых лесах, расположенных в фоновом районе Кольского полуострова в среднем течении р. Ливы, и на территории буферной и импактной зон комбината “Североникель” (г. Монче-

горск, Мурманская обл.). Названия указанных зон приведены в соответствии с номенклатурой ЮНЕП (Munn, 1973).

Пробные площади (ПП) размером 20 × 20 м были заложены в лишайниково-зеленомошных сосновых лесах в фоновом районе (ПП1) на расстоянии 80 км от комбината “Североникель” и на территории буферной (ПП2 и ПП3) и импактной (ПП4 и ПП5) зон. ПП2 и ПП4 удалены от комбината соответственно на расстояние 40 и 10 км в северо-восточном, а ПП3 и ПП5 — на 35 и 15 км в юго-западном направлении.

Древесный ярус исследованных сообществ сформирован *Pinus sylvestris* L. с участием *Betula pubescens* Ehrh., подробная таксационная характеристика древостоев приведена ранее (Lyanguzova et al., 2023). В травяно-кустарничковом ярусе фоновых сосновых лесов доминирующими видами являются кустарнички *Vaccinium vitis-idaea* L., *V. myrtillus* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup, в мохово-лишайниковом — зеленые мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum* sp. и лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F.H. Wigg., *C. stellaris* (Opiz.) Pouzar & Vězda, *C. arbuscula* (Wallr.) Flot. На загрязненной территории в травяно-кустарничковом ярусе доминируют те же виды кустарничков, а в мохово-лишайниковом ярусе преобладают лишайники р. *Cladonia* с шиловидными и сцифовидными подетциями. Напочвенный покров исследуемых сосновых лесов представлен на рис. 1. Согласно современной классификации почв России (Classification..., 2004; Pereverzev, 2011) исследуемые почвы относятся к группе Al-Fe-гумусовых подзолов.

На каждой пробной площади были заложены трансекты, на которых с интервалом 1 м размещали учетные площадки размером 10 × 10 см. На каждой площадке был вырезан монолит до верхнего минерального горизонта. Монолит был разобран на живую биомассу и мортмассу. В живую биомассу входили следующие компоненты: надземные части сосудистых растений, зеленые части мхов и живые части лишайников. Мортмасса — слой отмерших растительных остатков, в котором, согласно современным представлениям (Karpachevsky, 1981, 1983; Karpachevsky et al., 2007; Bazilevich, Titlyanova, 2008) выделяют 3 подгоризонта. Подгоризонт AOL, образованный свежим растительным опадом, все фракции которого (мелкие ветви, кора, хвоя, листья, шишки)

a



b



c



Рис. 1. Напочвенный покров исследуемых сосновых лесов в фоновом районе (a), буферной (b) и импактной (c) зонах.

Fig. 1. Ground cover of the studied pine forests in the background area (a), buffer (b) and impact (c) zones.

еще сохраняют свою морфологическую структуру (этот слой мы будем в дальнейшем называть растительным опадом), и подгоризонты АОФ и АОН, в совокупности образующие органогенный горизонт (О) почвы или лесную подстилку. Все образцы надземной биомассы и мортмассы были высу-

шены до воздушно-сухого состояния и взвешены. Запасы компонентов почвенно-растительного покрова представлены в г/м².

Содержание кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co было определено в вытяжке 1.0 N HCl из образцов лесной подстилки (соотношение 1 : 25) методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в 3-кратной повторности (Methods..., 2002). Для оценки уровня загрязнения почв тяжелыми металлами использовали индекс техногенной нагрузки, который представляет собой превышение суммарного содержания кислоторастворимых форм преобладающих металлов (Ni, Cu и Co) в подстилке над их фоновым содержанием (Methods..., 2002).

Проверка выборок исследуемых параметров на соответствие закону нормального распределения показала, что распределения большинства параметров значимо отличаются от нормального распределения. В связи с этим при оценке значимости различий использовали непараметрические критерии Краскела–Уоллиса (H) и Манна–Уитни (z), при уровне значимости $p < 0.05$ различия считали достоверными.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В фоновых сосновых лесах Кольского полуострова среднее значение суммарной концентрации кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co в лесной подстилке Al-Fe-гумусовых подзолов составляет 20.0 ± 0.5 мг/кг, при расчете индекса техногенной нагрузки оно было принято за 1. По мере приближения к комбинату “Североникель” возрастает уровень загрязнения почв тяжелыми металлами (рис. 2). В пределах буферной зоны величины индексов техногенной нагрузки на ПП2 и ПП3 существенно различаются. На ПП2 его среднее значение равно 8.7 ± 0.2 отн. ед., а на ПП3 оно почти в 2 раза больше и составляет 15.8 ± 0.6 отн. ед. Столь существенные различия в значениях индекса техногенной нагрузки на двух исследованных пробных площадях в буферной зоне обусловлены преобладанием ветров, дующих в юго-юго-западном направлении от г. Мончегорска, и соответственно большим количеством полиметаллической пыли, переносимой именно в этом направлении. На территории импактной зоны средние значения индекса техногенной нагрузки одинаковы на ПП4 и ПП5 – 116 ± 2 и 119 ± 4 отн. ед.,

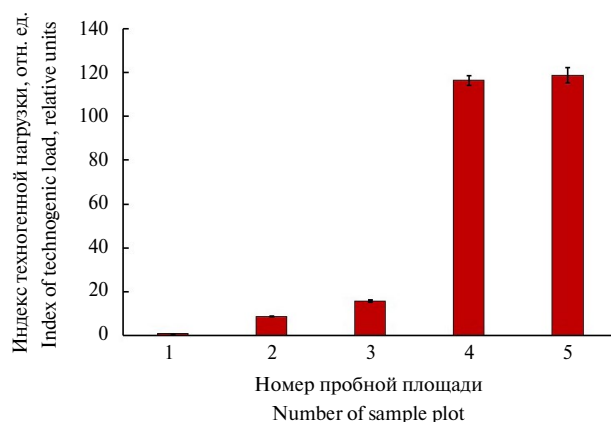


Рис. 2. Индекс техногенной нагрузки в исследуемых сосновых лесах.

Fig. 2. Index of technogenic load in the studied pine forests.

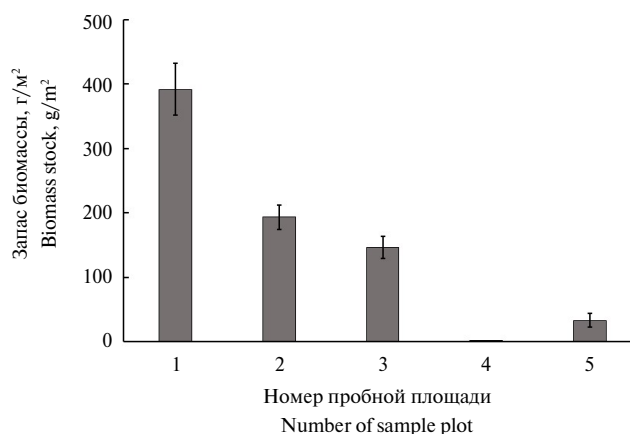


Рис. 3. Запас надземной биомассы лишайников в исследуемых сосновых лесах.

Fig. 3. Stock of lichen aboveground biomass in the studied pine forests.

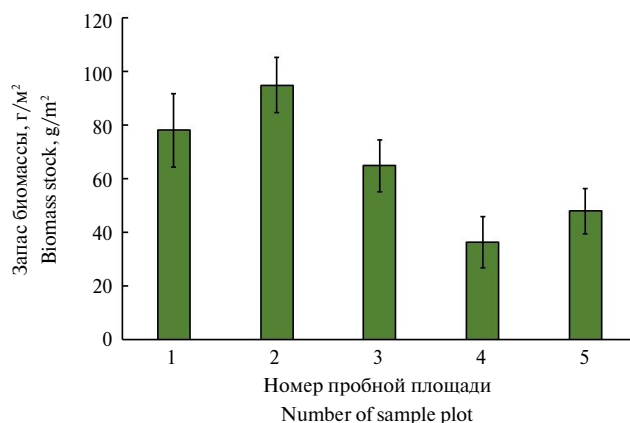


Рис. 4. Запас надземной биомассы кустарничков в исследуемых сосновых лесах.

Fig. 4. Stock of dwarf-shrub aboveground biomass in the studied pine forests.

и в 7.5–13.6 раз больше соответствующих величин в буферной зоне. Диапазоны варьирования этого показателя достаточно широки – 11–182 и 66–218 отн. ед. соответственно.

В соответствии с увеличением уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами уменьшается надземная биомасса всех компонентов напочвенного покрова (табл. 1, рис. 3, 4). В первую очередь из состава растительного сообщества исчезают наиболее чувствительные виды мхов, в частности, доминант мохового покрова *Pleurozium schreneri*. Если на ПП2 в запас биомассы мохово-лишайникового яруса еще входят надземные части мхов, доля которых составляет менее 15%, то на ПП3 мхи практически отсутствуют, и запас биомассы мохово-лишайникового яруса состоит только из надземных частей лишайников. Следует подчеркнуть, что в отличие от фоновых сосняков, где лишайниковый покров сформирован, в основном, кустистыми лишайниками р. *Cladonia*, на загрязненной территории лишайники представлены раннесукцессионными видами с накипной и чешуйчато-накипной формой роста. На территории буферной зоны запас биомассы лишайников и соответственно мохово-лишайникового яруса снижается в среднем более чем в 2 раза по отношению к их фоновым величинам, а в пределах импактной зоны это снижение достигает 12 крат на ПП5, и этот ярус практически полностью отсутствует на ПП4 (рис. 3, табл. 1).

Значительно более устойчив к воздействию аэротехногенного загрязнения травяно-кустарничковый ярус (см. табл. 1, рис. 4). На территории буферной зоны средний запас надземной биомассы кустарничков и травяно-кустарничкового яруса в целом достоверно не отличается от его величины в фоновом районе, хотя регистрируются 1.5-кратные различия в надземной биомассе кустарничков на ПП2 и ПП3 (см. рис. 4). В пределах импактной зоны различия в запасе надземной биомассы кустарничков между ПП4 и ПП5 недостоверны, и среднее значение этого показателя менее чем в 2 раза ниже соответствующих фоновых величин.

В отличие от запасов надземной биомассы компонентов напочвенного покрова запасы мортмассы (растительного опада и лесной подстилки) на загрязненной территории достоверно больше по сравнению с их фоновыми значениями (см. табл. 1). В условиях аэротехногенного

Таблица 1. Средние значения запаса надземной биомассы (г/м²) напочвенного покрова и морт-массы в исследуемых сосновых лесах по градиенту загрязнения
Table 1. Average values of aboveground biomass stock (g/m²) of ground cover and mortuary mass in the studied pine forests along the pollution gradient

Запас массы Stock of mass	Фоновый район Background area	Буферная зона Buffer zone	Импактная зона Impact zone	Критерий Краскела–Уоллиса Kruskal–Wallis criterion
Мохово-лишайникового яруса of moss-lichen layer	<u>406 ± 40</u> 0–1043	<u>170 ± 18</u> 0–638	<u>17.3 ± 3.8</u> 0–423	158.3
Травяно-кустарничкового яруса of herb-dwarf-shrub layer	<u>78.1 ± 13.7</u> 0–515	<u>80 ± 10</u> 0–365	<u>42 ± 10</u> 0–452	94.9
Живого напочвенного покрова of living ground cover	<u>484 ± 39</u> 14–1090	<u>250 ± 14</u> 6–650	<u>59.3 ± 9.0</u> 0–463	209.1
Растительного опада of plant waste	<u>1194 ± 90</u> 349–4260	<u>1570 ± 86</u> 465–3765	<u>1505 ± 122</u> 147–4680	28.1
Лесной подстилки of forest litter	<u>1770 ± 127</u> 352–4540	<u>4630 ± 295</u> 617–14055	<u>6425 ± 328</u> 84–18230	112.8

Примечание. Над чертой — среднее со стандартной ошибкой; под чертой — размах варьирования (min–max). Полужирным шрифтом выделены значения критерия Краскела–Уоллиса, значимые при $p < 0.05$.
Note. Above the line — mean with standard error; below the line — range of variation (min–max). Bold font indicates the values of the Kruskal–Wallis criterion significant at $p < 0.05$.

загрязнения запас растительного опада возрастает почти в 1.5 раза по отношению к фоновым величинам, причем различия в этом показателе на территории буферной и импактной зон не достоверны (рис. 5). Еще более значительные различия отмечены для запаса лесной подстилки: в сосняках буферной зоны ее запас увеличивается в среднем в 2.6 раз, а в пределах импактной зоны это возрастание достигает 3.6 крат по сравнению с фоновыми величинами (рис. 6).

В фоновых сосновых лесах основной вклад в общий запас надземной биомассы вносит мохово-лишайниковый ярус (рис. 7), причем доля лишайников составляет свыше 90%, а доля мхов не превышает 10%. В пределах буферной зоны вклад мохово-лишайникового яруса в общий запас биомассы снижается до 70% и достоверно не различается на ПП4 и ПП5. На территории импактной зоны его доля уменьшается до 5–40%, т. е. здесь напочвенный по-

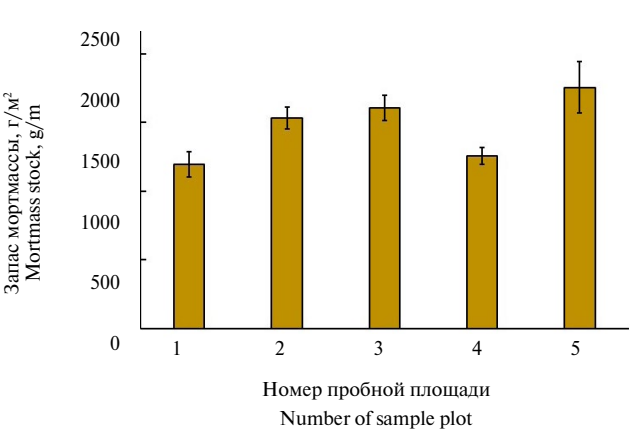


Рис. 5. Запас растительного опада в исследуемых сосновых лесах.
Fig. 5. Stock of plant waste in the studied pine forests.

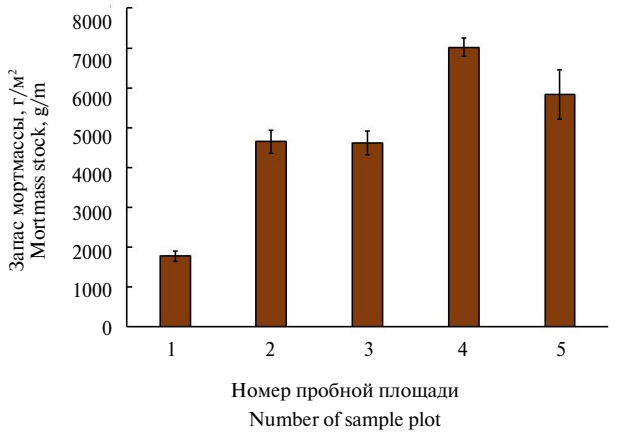


Рис. 6. Запас лесной подстилки в исследуемых сосновых лесах.
Fig. 6. Stock of forest litter in the studied pine forests.

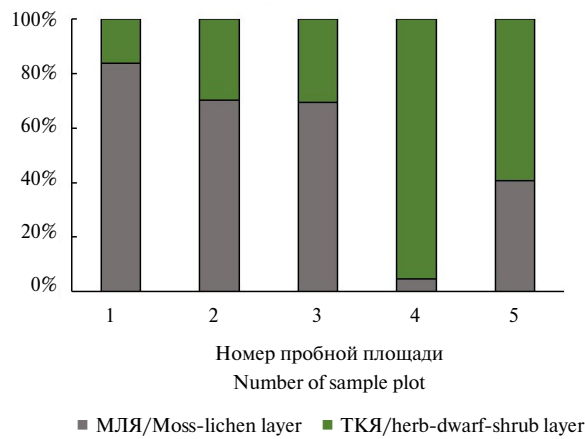


Рис. 7. Соотношение запасов надземной биомассы мохово-лишайникового (МЛЯ) и травяно-кустарничкового (ТКЯ) ярусов в исследуемых сосновых лесах.
Fig. 7. Ratio of aboveground biomass stocks of moss-lichen and herb-dwarf-shrub layers in the studied pine forests.

кров сформирован практически только травяно-кустарничковым ярусом.

Для оценки степени внутриценотической неоднородности рассматриваемых показателей использовали коэффициент вариации (табл. 2). Прежде всего, следует отметить достаточно высокую степень вариабельности запасов всех компонентов лесных экосистем даже в фоновом районе. По мере приближения к источнику загрязнения степень гетерогенности запасов напочвенного покрова возрастает, наиболее ярко она выраже-

на на территории импактной зоны. Для запасов мортмассы (растительного опада и лесной подстилки) коэффициент вариации практически во всех случаях превышает 50%, но не связан с уровнем загрязнения местообитаний тяжелыми металлами.

Таким образом, по мере приближения к комбинату “Североникель” резко возрастает уровень загрязнения верхнего органогенного горизонта подзолов, уменьшаются запасы надземной биомассы всех компонентов напочвенного покрова, увеличиваются запасы растительного опада и лесной подстилки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что воздействие аэротехногенного загрязнения неоднозначно сказывается на изменении запасов различных компонентов почвенно-растительного покрова средневозрастных сосновых лесов.

Значительное снижение объемов атмосферных выбросов комбинатом “Североникель”, произошедшее в последние 25 лет, не сказалось на уровне загрязнения верхнего органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов. В пределах буферной и импактной зон концентрации кислоторастворимых форм тяжелых металлов в подстилке в среднем в 5–25 и 80–190 раз соответственно превышают региональные фоно-

Таблица 2. Коэффициенты вариации (%) запасов компонентов лесных экосистем в фоновом районе и при аэротехногенном загрязнении
Table 2. Coefficients of variation (%) of stocks of forest ecosystem components in the background area and under aerotechnogenic pollution

Коэффициент вариации запаса Coefficients of variation (%) of stock	Фоновый район Background area	Буферная зона Buffer zone	Импактная зона Impact zone
Лишайников Lichens	79	90	216
Мхов Mosses	137	169	330
Кустарничков Dwarf shrubs	135	108	243
Живого напочвенного покрова Living ground cover	63	57	200
Растительного опада Plant waste	50	45	58
Лесной подстилки Forest litter	55	53	50

вые значения. Ряд исследователей констатируют продолжающееся увеличение уровня загрязнения лесной подстилки на территории буферной зоны, и отсутствие его снижения на территории импактной зоны и техногенной пустоши (Koptsik et al., 2016, 2021; Kashulina, 2017, 2018, 2022; Lyanguzova et al., 2018). Сохранение высокого уровня загрязнения почв тяжелыми металлами препятствует восстановлению биоты, что подтверждают исследования в районах воздействия атмосферных выбросов предприятий цветной металлургии (Trubina et al., 2014; Vorobeichik et al., 2014; Vorobeychik, Kaigorodova, 2017; Kashulina, 2017, 2018; Lyanguzova et al., 2018).

Результаты настоящей работы также свидетельствуют о негативном воздействии аэротехногенного загрязнения, хотя и сниженной интенсивности, на напочвенный покров средневозрастных сосновых лесов. При увеличении уровня загрязнения местообитаний тяжелыми металлами уменьшаются запасы надземной биомассы всех компонентов напочвенного покрова (табл. 1, рис. 3, 4). Ранее установлена значимая линейная зависимость общего запаса надземной биомассы напочвенного покрова от уровня загрязнения почв тяжелыми металлами, т. е. с увеличением индекса техногенной нагрузки существенно снижается общий запас надземной биомассы, на территории импактной зоны это снижение достигает 4–7 крат (Lyanguzova, Belyaeva, 2022). В то же время проведенные исследования показали, что на ПП2, где зарегистрировано минимальное значение индекса техногенной нагрузки, в запас биомассы мохово-лишайникового яруса входят мхи, доля которых не превышает 15%, что свидетельствует о наименьшем нарушении напочвенного покрова. На ПП3, где уровень загрязнения подстилки в 2 раза больше, чем на ПП2, мхи полностью выпали из напочвенного покрова, и запас биомассы мохово-лишайникового яруса сформирован только лишайниками. В условиях экспериментального загрязнения верхнего органогенного горизонта почв полиметаллической пылью было установлено пороговое значение индекса техногенной нагрузки равное 10 отн. ед., превышение которого приводит к нарушению структуры напочвенного покрова и снижению его продуктивности (Gorshkov et al., 2013, Lyanguzova et al., 2015; Bondarenko et al., 2018).

Хорошо известно, что под воздействием аэротехногенного загрязнения из состава

растительных сообществ выпадают наиболее чувствительные виды мхов и лишайников, изменяется видовой состав и структура мохово-лишайникового яруса, в то время как травяно-кустарничковый ярус наиболее устойчив к действию стрессового фактора (Dynamic..., 2009; Gorshkov et al., 2013, Lyanguzova et al., 2015; Lyanguzova et al., 2018). Результаты настоящей работы также подтверждают полученные ранее выводы. По мере приближения к источнику загрязнения, прежде всего выпадает доминант мохового покрова средневозрастных сосновых лесов *Pleurozium schreberi*, а затем и остальные виды мохообразных. В лишайниковом покрове происходит замена кустистых лишайников р. *Cladonia* на раннесукцессионные виды с накипной и чешуйчато-накипной формой роста, что приводит к снижению запаса биомассы лишайников вплоть до полного его исчезновения (см. рис. 3). В результате изменяется соотношение запасов мохово-лишайникового и травяно-кустарничкового ярусов (см. рис. 7), и общий запас надземной биомассы сформирован практически только кустарничками. Как уже отмечалось выше, напочвенный покров – неотъемлемая часть экосистем северотаежных лесов, одной из основных функций которого является выравнивание теплового и водного режима верхних биологически активных горизонтов почвы и обеспечение стабильных условий для разложения органического вещества и поглощения минеральных веществ корнями растений. В сосновых лесах главную средообразующую функцию на всех этапах постпирогенной сукцессии выполняет мохово-лишайниковый ярус (Gorshkov et al., 2013). В фоновых сосновых лесах северной тайги наиболее быстро восстанавливаются параметры травяно-кустарничкового яруса, а наиболее длительный период занимает процесс восстановления мохово-лишайникового яруса (Dynamic..., 2009). Результаты многолетнего полевого эксперимента по искусственному загрязнению местообитаний полиметаллической пылью показали, что при индексе техногенной нагрузки ~15 отн. ед. наблюдается незначительное угнетение мохово-лишайникового яруса, проявляющееся в снижении общего проективного покрытия лишайников с 84 до 72%. В интервале индекса техногенной нагрузки 20–30 отн. ед. мохово-лишайниковый ярус по общему проективному покрытию соответствует таковому при давности

пожара 10–15 лет, а по суммарному проективному покрытию видов рода *Cladonia* — давности пожара 30–50 лет. При индексе техногенной нагрузки >30 отн. ед. состояние яруса соответствует начальному этапу послепожарного восстановления покрова (давность пожара 5 лет) (Gorshkov et al., 2013, Lyanguzova et al., 2015). На территории буферной зоны при совместном воздействии газообразных (сернистый ангидрид) и твердых (тяжелые металлы) загрязнителей уже регистрируется существенная потеря средообразующей функции мохово-лишайникового яруса, выражающаяся в значительном вплоть до полного исчезновения снижении мохообразных, изменении видового состава и запаса лишайников, смещении соотношения запасов биомассы нижних ярусов (Lyanguzova et al., 2020). В пределах импактной зоны запас надземной биомассы практически полностью сформирован видами травяно-кустарничкового яруса, который наиболее устойчив к воздействию аэротехногенного загрязнения, в этих условиях ход постпирогенной сукцессии полностью нарушен, и восстановление яруса будет зависеть от скорости самоочищения почвы от тяжелых металлов, который может занять более 100 лет (Dynamic..., 2009; Gorshkov et al., 2013).

Согласно нашим предыдущим исследованиям (Lyanguzova et al., 2020, 2021, Lyanguzova, Belyaeva, 2022) аэротехногенное загрязнение оказывает существенное влияние на средообразующую функцию эдификаторов фитоценоза — древесных растений *Pinus sylvestris* и *Betula pubescens*, которые перестают выполнять функцию “экосистемных инженеров”. Показано, что закономерности распределения биомассы компонентов напочвенного покрова и мортмассы в тессерах принципиально различаются в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении. В фоновых сосновых лесах запас надземной биомассы возрастает, а мортмассы убывает от приствольных к межкрупным пространствам; под воздействием аэротехногенного загрязнения различия в трендах нивелируются (Lyanguzova, Belyaeva, 2022). В условиях загрязнения распределение биомассы лишайников по микросайтам несколько выравнивается по сравнению с фоновыми сообществами, а контрастность распределения биомассы мхов, надземных органов кустарничков и массы опада существенно возрастает (Lyanguzova et al., 2021). Кроме того, возрастает степень гетерогенности

распределения органического вещества по территории фитоценоза (Lyanguzova, Belyaeva, 2022), что подтверждают и результаты настоящей работы (табл. 2). Наиболее вероятной причиной столь значительного увеличения гетерогенности распределения запасов биомассы напочвенного покрова является высокая степень неоднородности уровня загрязнения лесной подстилки тяжелыми металлами (Vorobeichik, Pishchulin, 2009, 2016; Ginocchio et al., 2004; Watmough, Dickinson, 1995; Vorobeichik, Pozolotina, 2003; Kashulina, 2017, 2018; Lyanguzova et al., 2020, 2023). В результате формируются микролокусы или “микросайты выживания” с меньшим уровнем токсичности почвы, где могут сохраняться и выживать растения (Vorobeichik, Pishchulin, 2016; Ginocchio et al., 2004; Watmough, Dickinson, 1995).

В противоположность закономерному снижению запасов надземной биомассы компонентов напочвенного покрова по мере приближения к источнику загрязнения, запасы мортмассы (растительного опада и лесной подстилки) на загрязненной территории достоверно возрастают по сравнению с их фоновыми значениями (см. табл. 1, рис. 5, 6), что хорошо согласуется с выводами других исследователей (Ivanova et al., 2017, 2019). В сосновых лесах Финноскандии среднегодовая продукция древесного опада варьирует в пределах 590–3160 кг/га, в фоновых сосновых лесах Кольского полуострова запас древесного опада (хвоя, кора, ветви, шишки сосны) в 2014–2015 гг. в среднем составил (940 ± 188) кг/га, в дефолилирующих лесах его значение было в 1.2 раза больше, а в техногенном редколесье запас не отличался от его величины в фоновых сосняках (Ivanova et al., 2017). Аэротехногенное загрязнение тормозило процессы разложения крупных древесных остатков: вблизи медеплавильного завода в елово-пихтовых лесах в 3–4 раза увеличивается доля фрагментов крупных древесных остатков на начальных этапах разложения, период полураспада стволов ели и пихты возрастает соответственно на 5 и 16 лет, что свидетельствует о сильном торможении их деструкции (Bergman, Vorobeichik, 2017; Dulya et al., 2019). Увеличение мортмассы опада в условиях аэротехногенного загрязнения обусловлено более медленным его разложением: в техногенном редколесье потеря массы образцов активной фракции опада (листья, хвоя) доминирующих видов сосудистых растений после двухлетнего экспери-

мента составила в среднем 17%, а в фоновом сосновом лесу – 27% (Ivanova et al., 2019).

Подводя итог, можно заключить, что аэротехногенное загрязнение, хотя и при сниженной его интенсивности, негативно влияет на средообразующую функцию напочвенного покрова средневозрастных сосновых лесов, тормозит разложение растительных остатков, что приводит к увеличению запасов опада и лесной подстилки. Наши выводы полностью согласуются с мнением других исследователей об отрицательном влиянии атмосферного промышленного загрязнения на состояние лесных экосистем, которое варьирует в широком диапазоне и не всегда согласуется с уровнем концентраций основных металлов-загрязнителей в почвах (Koptsik et al., 2016; Kashulina, 2017, 2018). Интенсивность и длительность антропогенного воздействия сопровождается серьезными повреждениями растительности, вплоть до полного исчезновения, что, в свою очередь, оборачивается целым комплексом дополнительных к экстремальному загрязнению негативных экологических факторов: нарушением водного режима экосистем и ландшафтов, изменением микроклимата, деградацией почв с изменением их базовых свойств и морфологии, количественными и качественными изменениями биологического круговорота (Kashulina, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова, позволило выявить изменение средообразующей функции почвенно-растительного покрова по градиенту загрязнения в зонах воздействия атмосферных выбросов медно-никелевого комбината в сравнении с фоновыми растительными сообществами.

Несмотря на 5–9-кратное сокращение объемов атмосферных выбросов комбинатом “Североникель”, произошедшее в последнее 25-летие, уровень загрязнения верхнего органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов на территории буферной зоны по-прежнему превышает порог (индекс техногенной нагрузки ≥ 15 отн. ед.), при котором наблюдается существенное нарушение состава и структуры нижних ярусов. В пределах импактной зоны наблюдается более чем 100-кратное превышение фоновых концентраций кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co в лес-

ной подстилке, что не позволяет даже начаться процессу восстановления напочвенного покрова на этой территории.

Распределение запасов органического вещества, заключенного в надземной биомассе напочвенного покрова и мортмассе (растительном опаде и лесной подстилке), принципиально различается в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении. В фоновых сосняках основную средообразующую функцию выполняет мохово-лишайниковый ярус, надземные части мхов и лишайников составляют более 80% от общего запаса биомассы. По мере приближения к источнику загрязнения достоверно снижается запас надземной биомассы всех компонентов напочвенного покрова и общего запаса в целом; мохообразные, как наиболее чувствительные виды к аэротехногенному загрязнению, выпадают из состава растительных сообществ; изменяется видовой состав лишайников, что приводит к уменьшению запаса их биомассы. В условиях экстремального загрязнения (импактная зона) общий запас биомассы сформирован практически полностью надземными частями кустарничков – наиболее устойчивыми видами травяно-кустарничкового яруса сосновых лесов. В пределах импактной зоны резко возрастает гетерогенность и контрастность распределения запасов биомассы напочвенного покрова, что может быть обусловлено высокой степенью неоднородности уровня загрязнения лесной подстилки тяжелыми металлами. В результате средообразующая функция напочвенного покрова утрачивает свое значение, равно как отдельные деревья и древесный полог в целом перестают выполнять свои функции “экосистемных инженеров”, что говорит в пользу смены биотического регулирования на абиотический.

Аэротехногенное загрязнение тормозит скорость разложения растительных остатков, в том числе процессы разложения крупных древесных остатков, что приводит к увеличению мортмассы опада и возрастанию запасов лесной подстилки. В этих условиях главным фактором в формировании мозаичности почвенно-растительного покрова в северотаежных лесах становится уровень токсичности загрязненных почв, особенно их верхних горизонтов, где расположена основная масса подземных побегов и корней кустарничков, а лесная подстилка служит субстратом для напочвенных мхов и лишайников.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность П.А. Примак, Ф.С. Салиховой и Е.Н. Волковой за помощь в сборе полевого материала, а также А.И. Беляевой за помощь в проведении химических анализов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по плановой теме Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН № 121032500047-1 “Растительность Европейской России и северной Азии: разнообразие, динамика, принципы организации”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Akhmetova] Ахметова Г.В. 2022. Пространственная неоднородность химического состава лесных подстилок сосновых насаждений средней тайги Восточной Фенноскандии. — Лесоведение. 3: 250–261. <https://doi.org/10.31857/S0024114822030020>
- [Artemkina et al.] Артемкина Н.А., Орлова М.А., Лукина Н.В. 2018. Микромозаика растительности и вариабельность химического состава L-горизонтов подстилки северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных. — Лесоведение. 2: 97–106.
- [Bakhmet et al.] Бахмет О.Н., Медведева М.В., Мошкина Е.В., Ткаченко Ю.Н., Мамай А.В., Новиков С.Г., Мошников С.А., Тимофеева В.В., Карпечко А.Ю. 2022. Пространственная вариабельность свойств подзолов в зависимости от растительных микрогруппировок в сосняке брусничном. — Лесоведение. 1: 47–60. <https://doi.org/10.31857/S002411482105003X>
- Basova E.V., Lukina N.V., Kuznetsova A.I., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Tikhonova E.V., Geraskina A.P., Braslavskaya T.Yu., Tebenkova D.N., Lugovaya D.L. 2023. Quality of tree litter as an informative indicator of functional classification of forests. — Forest Science Issues. 6(3). Article 133. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202363-133>
- [Bazilevich, Titlyanova] Базилевич Н.И., Титлянова А.А. 2008. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск. 381 с.
- Berg B., McClaugherty C. 2020. Plant Litter. 4th ed. Switzerland, Cham: Springer. 332 p.
- [Bergman, Vorobeichik] Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л. 2017. Влияние выбросов медеплавильного завода на формирование запаса и разложение крупных древесных остатков в елово-пихтовых лесах. — Лесоведение. 1: 24–38.
- [Bondarenko et al.] Бондаренко М.С., Лянгузова И.В., Горшков В.В., Баккал И.Ю. 2018. Изменение фитомассы нижних ярусов северотаежных сосновых лесов при экспериментальном загрязнении почв тяжелыми металлами. — Растит. ресурсы. 1: 59–74.
- [Classification...] Классификация и диагностика почв России. 2004. Смоленск. 342 с.
- [Demianov] Демьянов В.А. 1982. Влияние *Larix gmelinii* (Pinaceae) на строение растительного покрова на верхней границе древесной растительности. — Бот. журн. 62(4): 500–507.
- Dulya O.V., Bergman I.E., Kukarskih V.V. et al. 2019. Pollution induced slowdown of coarse woody debris decomposition differs between two coniferous tree species. — Forest Ecology and Management. 448: 312–320.
- [Dynamics...] Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. 2009. СПб. 276 с.
- Ginocchio R., Carvallo G., Toro I. et al. 2004. Micro-spatial variation of soil metal pollution and plant recruitment near a copper smelter in central Chile. — Environ. Pollut. 127: 343–352.
- [Gorshkov et al.] Горшков В.В., Ставрова Н.И., Баккал И.Ю. 2005. Динамика восстановления лесной подстилки в бореальных сосновых лесах после пожаров. — Лесоведение. 3: 37–45.
- [Gorshkov et al.] Горшков В.В., Баккал И.Ю., Лянгузова И.В., Баркан В.Ш. 2013. Прогноз восстановления напочвенного покрова в сосновом лесу с давностью пожара 65 лет при искусственном загрязнении полиметаллической пылью. — Живые и биокосные системы. 3. <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-14>
- [Ipatov] Ипатов В.С. 2007. Фитогенные поля одиночных деревьев некоторых пород в одном экотопе. — Бот. журн. 92(8): 1186–1192.
- [Ipatov et al.] Ипатов В.С., Журавлева Е.Н., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. 2009. Фитогенное поле *Picea abies*, *P. obovata* (Pinaceae). — Бот. журн. 94 (4): 558–568.
- [Ivanova, Lukina] Иванова Е.А., Лукина Н.В. 2017. Варьирование массы и фракционного состава древесного опада в сосняках кустарничково-лишайниковых при аэротехногенном загрязнении. — Лесоведение. 5: 47–58. <https://doi.org/10.7868/S0024114817050059>
- [Ivanova et al.] Иванова Е.А., Лукина Н.В., Данилова М.А., Артемкина Н.А., Смирнов В.Э., Ершов В.В., Исаева Л.Г. 2019. Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения. — Лесоведение. 6: 533–546. <https://doi.org/10.1134/S0024114819060044>
- [Ivanova et al.] Иванова Е.А., Данилова М.А., Смирнов В.Э., Ершов В.В. 2023. Сравнительная оценка скорости разложения растительного опада в еловых и сосновых лесах на северном пределе распространения. — Вопросы лесной науки. 6 (3): 1–30. Статья № 132. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202363-132>

- [Karpachevsky] Карпачевский Л.О. 1981. Лес и лесные почвы. М. 264 с.
- [Karpachevsky] Карпачевский Л.О. 1983. Подстилка — особый биогоризонт лесного биогеоценоза. — В кн.: Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М. С. 88–89.
- [Karpachevsky et al.] Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Ташнинова Л.Н., Руденко Р.Н. 2007. Почвенный покров и парцеллярная структура лесного биогеоценоза. — Лесоведение. 6: 107–113.
- Kashulina G.M. 2017. Extreme pollution of soils by emission of the copper-nickel industrial complex in the Kola peninsula. — *Eurasian Soil Science*. 50 (7): 837–849. <https://doi.org/10.1134/S1064229317070031>
- Kashulina G.M. 2018. Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola peninsula. — *Eurasian Soil Science*. 51 (4): 467–478. <https://doi.org/10.1134/S1064229318040063>
- Kashulina G.M. 2022. Multi-medium environmental monitoring in the impact zone of the Copper-Nickel industrial complex in the Kola peninsula. — *Eurasian Soil Science*. 55 (5): 573–586. <https://doi.org/10.1134/S1064229322050027>
- [Koptsik et al.] Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е., Кудрявцева А.Д., Турбабина К.А. 2016. Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных промышленных выбросов в Кольской Субарктики. — *Журнал общей биологии*. 77(2): 145–163.
- Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E., Sinichkina M.A. 2021. Remediation of technogenic barren soils in the Kola Subarctic: current state and long-term dynamics. — *Eurasian Soil Science*. 54 (4): 619–630. <https://doi.org/10.1134/S1064229321040098>
- Krishna M.P. 2017. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. — *Energy, Ecology and Environment*. 2(4): 236–249.
- [Kryshen] Крышень А.М. 2000. Фитогенное поле: теория и проявление в природе. — *Изв. РАН. Сер. Биологическая*. 4: 437–443.
- [Lebedeva et al.] Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю., Ипатов В.С. 2005. Влияние древесного полога на виды напочвенного покрова в ельнике чернично-зеленомошном. — *Бот. журн.* 90 (3): 400–410.
- [Lebedeva et al.] Лебедева В.Х., Ипатов В.С., Тиходеева М.Ю. 2015. Неоднородность пространственной структуры живого напочвенного покрова в лесных сообществах. — *Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология*. 2: 32–46.
- [Lebedeva et al.] Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю., Ипатов В.С. 2006. Оценка влияния деревьев на виды травяно-кустарничкового и мохового ярусов в сосняке чернично-зеленомошном. — *Бот. журн.* 91 (2): 176–192.
- [Lebedeva et al.] Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю., Ипатов В.С. 2016. О неоднородности растительного покрова лугов и лесов. — *Бот. журн.* 101(4): 358–376.
- [Lugovaya et al.] Луговая Д.Л., Смирнова О.В., Запрудина М.В. и др. 2013. Микромозаичная организация и фитомасса напочвенного покрова в основных типах темнохвойных лесов Печоро-Илычского заповедника. — *Экология*. 1: 3–10.
- [Lukina et al.] Лукина Н.В., Ершов В.В., Горбачева Т.В. и др. 2018. Оценка состава почвенных вод северо-таежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона. — *Почвоведение*. 3: 284–296.
- Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Tebenkova D.N., Gornova M.V. 2021. Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects. — *Forest Science Issues*. 4 (1): 1–59. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60>
- Lyanguzova I.V., Belyaeva A.I. 2022. Mosaic Pattern of Soil and Vegetation Cover Stocks in Pine Forests under Conditions of Aerotechnogenic Pollution. — *Russian Journal of Ecology*. 53 (2): 68–82. <https://doi.org/10.1134/S1067413622020060>
- [Lyanguzova et al.] Лянгузова И. В., Горшков В. В., Баккал И. Ю., Бондаренко М. С. 2015. Воздействие почвенного загрязнения тяжёлыми металлами на напочвенный покров сосняка лишайниково-зеленомошного в условиях полевого эксперимента — *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. 3 (27): 74–86.
- [Lyanguzova, Primak] Лянгузова И.В., Примак П.А. 2019. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова. — *Растит. ресурсы*. 4: 473–489.
- [Lyanguzova et al.] Лянгузова И.В., Примак П.А., Волкова Е.Н., Салихова Ф.С. 2020. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в фоновых и дефолирующих сосновых лесах Кольского полуострова. — *Растит. ресурсы*. 56(4): 335–350. <https://doi.org/10.31857/S0033994620040068>
- [Lyanguzova et al.] Лянгузова И.В., Примак П.А., Салихова Ф.С., Волкова Е.Н., Беляева А.И. 2021. Воздействие загрязнения почв тяжелыми металлами на пространственное распределение биомассы напочвенного покрова и запаса лесной подстилки в сосновых лесах Кольского полуострова. — *Растит. ресурсы*. 57(4): 340–358. <https://doi.org/10.31857/S0033994621040087>
- [Lyanguzova et al.] Лянгузова И.В., Беляева А.И., Катаева М.Н., Волкова Е.Н. 2023. Запасы потенциально токсичных элементов в напочвенном покрове сосновых лесов северной тайги при аэротехногенном загрязнении. — *Бот. журн.* 108 (11): 1001–1014.
- Lyanguzova I., Yarmishko V., Gorshkov V., Stavrova N., Bakkal I. 2018. Impact of heavy metals on forest eco-

- systems of the European North of Russia. — In: Heavy Metals. London. P. 91.
- [Methods...] Методы изучения лесных экосистем. 2002. СПб. 240 с.
- Munn R.E. 1973. Global Environmental Monitoring System (GEMS). — SCOPE. Report 3. Toronto: IC-SU-SCOPE. 130 p.
- [Nadporozhskaya et al.] Надпорожская М.А., Зубкова Е.В., Фролов П.В., Быховец С.С., Чертов О.Г. 2018. Соподчиненность почвенных условий и растительных сообществ в сосняках как следствие действия комплекса факторов. — Вестник ТвГУ. Серия. Биология и экология. 2: 122–138.
- [Nagimov et al.] Нагимов З.Я., Артемьева И.Н., Шевелина И.В., Нагимов В.З. 2022. Видовой состав и запасы живого напочвенного покрова в сосняках лишайниковых ХМАО — ЮГРЫ. — Леса России и хозяйство в них. 1: 48–56.
- [Nikonov et al.] Никонов В.В., Лукина Н.В., Смирнова Е.В., Исаева Л.Г. 2002. Влияние *Picea obovata* и *Pinus sylvestris* на первичную продуктивность нижних ярусов хвойных лесов Кольского полуострова. — Бот. журн. 87(8): 107–119.
- [Odintsov et al.] Одинцов П.Е., Караванова Е.И., Степанов А.А. 2018. Трансформация водорастворимых органических веществ подстилок подзолов фоновых и техногенных территорий Кольского полуострова. — Почвоведение. 8: 1022–1032. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18080099>
- [Orlova et al.] Орлова М.А., Лукина Н.В., Камаев И.О. и др. 2011. Мозаичность лесных биогеоценозов и продуктивность почв. — Лесоведение. 6: 39–48.
- [Orlova et al.] Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э., Артемкина Н.А. 2016. Влияние ели на кислотность и содержание элементов питания в почвах северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных. — Почвоведение. 11: 1355–1367.
- [Pereverzev] Переверзев В.Н. 2011. Почвообразование в лесной зоне Кольского полуострова. — Вестн. КНЦ РАН. 2: 74–82.
- [Rozenberg] Розенберг Г.С. 2022. Инженеры экосистем: “старые песни о главном” или концепция, которую у нас практически не заметили (Обзор проблемы). — Журнал общей биологии. 83 (3): 220–234. <https://doi.org/10.31857/S0044459622030071>
- [Semenyuk et al.] Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. 2020. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях. — Почвоведение. 1: 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
- [Smirnova et al.] Смирнова О.В., Алейников А.А., Семиколенных А.А. и др. 2011. Пространственная неоднородность почвенно-растительного покрова темнохвойных лесов в Печоро-Илычском заповеднике. — Лесоведение. 6: 67–78.
- [Telesnina et al.] Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И. 2018. Особенности напочвенного покрова и лесных подстилок в искусственных липовых насаждениях в зависимости от характера ухода. — Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2: 3–11.
- [Trefilova et al.] Трефилова О.В., Беланов И.П., Уфимцев В.И., Ефимов Д.Ю. 2021. Эффекты фитогенного поля сосны в различных климатических условиях. — Лесоведение. 2: 156–172. <https://doi.org/10.31857/S0024114821020091>
- [Trubina et al.] Трубина М.Р., Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В., Бергман И.Е., Кайгородова С.Ю. 2014. Динамика лесной растительности после снижения промышленных выбросов: быстрое восстановление или продолжение деградации? — Доклады Академии наук. 458 (6): 721–725. <https://doi.org/10.7868/S0869565214300252>
- [Uranov] Уранов А.А. 1965. Фитогенное поле. — Проблемы современной ботаники. 1: 251–254.
- [Vorobeychik, Kaigorodova] Воробейчик Е.Л., Кайгородова С.Ю. 2017. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов. — Экология. 8: 1009–1024. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17080135>
- [Vorobeichik, Pishchulin] Воробейчик Е.Л., Пищулин П.Г. 2009. Влияние отдельных деревьев на pH и содержание тяжелых металлов в лесной подстилке в условиях промышленного загрязнения. — Почвоведение. 8: 927–937.
- [Vorobeichik, Pishchulin] Воробейчик Е.Л., Пищулин П.Г. 2011. Влияние деревьев на скорость деградации целлюлозы в почвах в условиях промышленного загрязнения. — Почвоведение. 5: 597–610.
- [Vorobeichik, Pishchulin] Воробейчик Е.Л., Пищулин П.Г. 2016. Промышленное загрязнение снижает роль деревьев в формировании структуры полей концентраций тяжелых металлов в лесной подстилке. — Экология. 5: 323–334.
- [Vorobeichik, Pozolotina] Воробейчик Е.Л., Позолотина В.Н. 2003. Микромасштабное пространственное варьирование фитотоксичности лесной подстилки. — Экология. 6: 420–427.
- [Vorobeichik et al.] Воробейчик Е.Л., Трубина М.Р., Хантемирова Е.В., Бергман И.Е. 2014. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода. — Экология. 6: 448–458. <https://doi.org/10.7868/S0367059714060158>
- Watmough S.A., Dickinson N.M. 1995. Dispersal and mobility of heavy metals in relation to tree survival in an aerially contaminated woodland soil. — Environ. Pollut. 90: 135–142.
- [Zhuravleva et al.] Журавлева Е.Н., Ипатов В.С., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. 2012. Изменение растительности на лугах под влиянием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). — Вест. СПбГУ. Сер. 3. 2: 3–12.

- Zvereva E.L., Kozlov M.V. 2004. Facilitative effects of top-canopy plants on four dwarf shrub species in habitats severely disturbed by pollution. — *J. Ecol.* 92 (2): 288–296.
- Zvereva E.L., Kozlov M.V. 2007. Facilitation of bilberry by mountain birch in habitat severely disturbed by pollution: Importance of sheltering. — *Environ. Exp. Bot.* 60(2): 170–176.

ENVIRONMENT-FORMING FUNCTION OF SOIL AND VEGETATION COVER OF PINE FORESTS OF THE KOLA PENINSULA UNDER CONDITIONS OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION

I. V. Lyanguzova^{1, *}

¹*V.L. Komarov Botanical Institute of RAS
Prof. Popov Str., 2, Saint-Petersburg, 197022, Russia*

**e-mail: ilyanguzova@binran.ru*

The paper presents the results of studying the habitat-forming function of soil and vegetation cover of medium-aged pine forests of the Kola Peninsula, both background ones and at different levels of aerotechnogenic environmental pollution by emissions of the “Severonickel” copper-nickel complex (Murmansk Region). The objectives were set: to estimate the total aboveground biomass stock of ground cover, plant waste and forest litter along the gradient of aerotechnogenic pollution; to characterise the ratio of biomass stocks of herb-dwarf-shrub and moss-lichen layers of middle-aged pine forests in the background area of the Kola Peninsula and in the polluted area; to reveal intracenetotic heterogeneity of biomass stock of shrubs, mosses and lichens, as well as stocks of plant waste and forest litter. It was found that as the pollution source is approached, the biomass stocks of all components of the pine forest ground cover decrease; mosses, the most sensitive species to the stress factor, drop out of the plant communities; the species composition of lichens changes, leading to a decrease in the stock of their aboveground biomass; the share of moss-lichen layer in the total biomass stock decreases, down to complete disappearance in the impact zone; intracenetotic heterogeneity and contrast in the distribution of biomass stocks of all components of the ground cover increase, which may be due to a high degree of heterogeneity in the level of pollution of the upper horizon of podzol by heavy metals. As a result, there is a significant loss of the environment-forming function of the ground cover, which equalises the hydrothermal regime of habitats in pine forests. The impact of aerotechnogenic pollution affects the processes of decomposition of plant residues, which leads to an increase in the stocks of plant waste and forest litter.

Keywords: environment-forming function, ground cover, biomass stock, mort-mass, forest litter, plant waste, northern taiga, heavy metals, aerotechnogenic pollution, Kola Peninsula

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses her sincere gratitude to P.A. Primak, F.S. Salikhova and E.N. Volkova for help in collecting field material, and to A.I. Belyaeva for assistance in chemical analyses.

The work was carried out within the framework of the state assignment under the planned project of the V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences No. 121032500047-1 “Vegetation of European Russia and northern Asia: diversity, dynamics, and principles of organization”.

REFERENCES

- Akhmetova G.V. 2022. Spatial heterogeneity of the forest litter’s chemical composition in pine stands of the Eastern Fennoscandia’s middle taiga. — *Russian Journal of Forest Science.* 3: 250–261.
<https://doi.org/10.31857/S0024114822030020>
- Artemkina N.A., Orlova M.A., Lukina N.V. 2018. Micromosaic structure of vegetation and variability of the chemical composition of L-layer of the litter in dwarf-shrubs-green moss spruce forests of the northern taiga. — *Russian Journal of Forest Science.* 2: 97–106.
- Bakhmet O.N., Medvedeva M.V., Moshkina Ye.V., Mamyay A.V., Novikov S.G., Moshnikov S.A., Timofeeva V.V., Karpechko A.Yu. 2022. Spatial variability of podzol properties depending on the plant microgroups on the example of the cowberry pine forests. — *Russian Journal of Forest Science.* 1: 47–60.
<https://doi.org/10.31857/S002411482105003X>
- Basova E.V., Lukina N.V., Kuznetsova A.I., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Tikhonova E.V., Geraskina A.P.,

- Braslavskaya T.Yu., Tebenkova D.N., Lugovaya D.L. 2023. Quality of tree litter as an informative indicator of functional classification of forests. — *Forest Science Issues*. 6(3). Article 133.
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-202363-133>
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. 2008. Biotic circulation on five continents: nitrogen and ash elements in natural terrestrial ecosystems. Novosibirsk. 381 p. (In Russ.).
- Berg B., McClaugherty C. 2020. *Plant Litter*. 4th ed. Switzerland, Cham: Springer. 332 p.
- Bergman I.Ye., Vorobeichik Ye.L. 2017. Vliyaniye vybrosov medeplavil'nogo zavoda na formirovaniye zapasa i razlozheniye krupnykh drevesnykh ostatkov v yelovo-pikhtovykh lesakh [The influence of copper smelter emissions on the formation of reserves and decomposition of large woody debris in spruce-fir forests]. — *Lesovedeniye*. 1: 24–38.
- Bondarenko M.S., Lyanguzova I.V., Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu. 2018. Changes in the phytomass of the lower layers of northern taiga pine forests under experimental pollution by heavy metals. — *Plant Resources*. 1: 59–74 (In Russ.).
- Classification and diagnostic of soils of Russia. 2004. Smolensk. 342 p. (In Russ.).
- Dem'yanov V.A. 1982. Effect of *Larix gmelinii* (Pinaceae) on the structure of vegetation at the upper treeline. — *Bot. Zhurn.* 62 (4): 500–507 (In Russ.).
- Dulya O.V., Bergman I.E., Kukarskih V.V. et al. 2019. Pollution induced slowdown of coarse woody debris decomposition differs between two coniferous tree species. — *Forest Ecology and Management*. 448: 312–320.
- Dynamics of forest communities in the Nord-West of Russia. 2009. St. Petersburg. 276 p. (In Russ.).
- Ginocchio R., Carvallo G., Toro I. et al. 2004. Micro-spatial variation of soil metal pollution and plant recruitment near a copper smelter in central Chile. — *Environ. Pollut.* 127: 343–352.
- Gorshkov V.V., Stavrova N.I., Bakkal I.Yu. 2005. Post-fire restoration of forest litter in Boreal pine forests. — *Russian Journal of Forest Science*. 3: 37–45.
- Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu., Lyanguzova I.V., Barcan VSh. 2013. Prognosis of Dwarf-shrub and Lichen Layers Development in Northern Taiga Pine Forests under Artificial Pollution by Polymetallic Dust. — *Living and Biocosm systems*. 3.
<http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-14>
- Ipatov V.S. 2007. Fitogennyye polya odinochnykh derev'ev nekotorykh porod v odnom ekotipe (Phytogenic areas of single trees of some species in the same ecotipe). — *Bot. Zhurn.* 92 (8): 1186–1192 (In Russ.).
- Ipatov V.S., Zhuravleva E.N., Lebedeva V.K., Tikhodeeva M.Y. 2009. Fitogennoe pole *Picea abies*, *P. obovata* (Pinaceae) (Ecological field of *Picea abies* and *P. obovata* (Pinaceae)). — *Bot. Zhurn.* 94 (4): 558–568 (In Russ.).
- Ivanova E.A., Lukina N.V. 2017. Variation in the mass and fractional composition of woody debris in dwarf shrub–lichen pine forests exposed to industrial air pollution. — *Russian Journal of Forest Science*. No. 5. P. 47–58.
- Ivanova E.A., Lukina N.V., Danilova M.A., et al. 2019. Effect of industrial air pollution on plant debris decomposition rate in pine forests at the northern limit of their distribution. — *Russian Journal of Forest Science*. 6: 533–546.
- Ivanova E.A., Danilova M.A., Smirnov V.E., Ershov V.V. 2023. Comparative assessment of the decomposition rate of plant litterfall in spruce and pine forests at the northern distribution limit. — *Voprosy lesnoi nauki*. 6 (3): 1–30. Article No. 132 (In Russ.).
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-202363-132>
- Karpachevsky L.O. 1981. *Forest and forest soils*. Moscow. 264 p. (In Russ.).
- Karpachevsky L.O. 1983. The litter is a special biohorizon of the forest biogeocenosis. — In: *The role of litter in forest biogeocenoses*. Moscow. P. 88–89 (In Russ.).
- Karpachevsky L.O., Zubkova T.A., Tashninova L.N., Rudenko R.N. 2007. Soil cover and parcel structure of forest biogeocenosis. — *Russian Journal of Forest Science*. 6: 107–113 (In Russ.).
- Kashulina G.M. 2017. Extreme pollution of soils by emission of the copper-nickel industrial complex in the Kola peninsula. — *Eurasian Soil Science*. 50 (7): 837–849.
<https://doi.org/10.1134/S1064229317070031>
- Kashulina G.M. 2018. Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola peninsula. — *Eurasian Soil Science*. 51 (4): 467–478.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318040063>
- Kashulina G.M. 2022. Multi-medium environmental monitoring in the impact zone of the Copper-Nickel industrial complex in the Kola peninsula. — *Eurasian Soil Science*. 55 (5): 573–586.
<https://doi.org/10.1134/S1064229322050027>
- Krishna M.P. 2017. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. — *Energy, Ecology and Environment*. 2(4): 236–249.
- Koptsik G.M., Koptsik S.V., Smirnova I.E., Kudryavsteva A.D., Turbabina K.A. 2016. Response of forest ecosystems to reduction of industrial emissions to the atmosphere in the Kola Subarctic. — *Zh. Obshch. Biol.* 77(2): 145–163 (In Russ.).
- Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E., Sinichkina M.A. 2021. Remediation of technogenic barren soils in the Kola Subarctic: current state and long-term dynamics. — *Eurasian Soil Science*. 54 (4): 619–630.
<https://doi.org/10.1134/S1064229321040098>
- Kryshen' A.M. 2000. The phytogenic field: theory and manifestations in nature. — *Biology Bulletin*. 27(4): 364–369.
- Lebedeva V.Kh., Tikhodeeva M.Yu., Ipatov V.S. 2005. The influence of the canopy on the types of ground cover in the blueberry-green moss spruce forest. — *Bot. Zhurn.* 90 (3): 400–410 (In Russ.).
- Lebedeva V.Kh., Tikhodeeva M.Yu., Ipatov V.S. 2006. Assessment of the influence of trees on the species of grass-

- dwarf shrub and moss layers in a blueberry-green moss pine forest. — Bot. Zhurn. 91 (2): 176–192 (In Russ.).
- Lebedeva V.Kh., Ipatov V.S., Tikhodeeva M.Yu. 2015. Heterogeneity of the spatial structure of the living ground cover in forest communities. — Vestnik of Saint Petersburg University. Ser. 3. Biology. 2: 32–46 (In Russ.). <https://biocomm.spbu.ru/article/view/859/750>
- Lebedeva V.Kh., Tikhodeeva M.Yu., Ipatov V.S. 2016. On the heterogeneity of the vegetation cover of meadows and forests. — Bot. Zhurn. 101 (4): 358–376 (In Russ.).
- Lugovaya D.L., Smirnova O.V., Zaprudina M.V., Aleynikov A.A., Smirnov V.E. 2013. Micromosaic structure and phytomass of ground vegetation in main types of dark conifer forests in the Pechora–Ilych state nature reserve. — Russian J. of Ecology. 44(1): 1–8. <https://doi.org/10.1134/S1067413613010086>
- Lukina N.V., Ershov V.V., Gorbacheva T.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Teben'kova D.N. 2018. Assessment of soil water composition of the North taiga coniferous forests of the background territories of the industrially developed region. — Eurasian Soil Science. 3: 284–296 (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030036>
- Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Tebenkova D.N., Gornova M.V. 2021. Biodiversity and climat-regulating functions of forests: current issues and research prospects. — Forest Science Issues. 4 (1): 1–59. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60>
- Lyanguzova I.V., Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu., Bondarenko M.P. 2015. Impact of polymetallic dust on ground vegetation layer in lichen–moss pine forest. — 2015. Vestn. Povolzh. Gos. Tech. Univ., Ser.: Les. Ekol. Prirodopol'z. 3: 74–86 (In Russ.).
- Lyanguzova I.V., Primak P.A. 2019. Spatial distribution of ground vegetation and forest litter in middle-aged pine forests of the Kola Peninsula. — Plant Resources. 4: 473–489.
- Lyanguzova I.V., Belyaeva A.I. 2022. Mosaic Pattern of Soil and Vegetation Cover Stocks in Pine Forests under Conditions of Aerotechnogenic Pollution. — Russian Journal of Ecology. 53 (2): 68–82. <https://doi.org/10.1134/S1067413622020060>
- Lyanguzova I.V., Primak P.A., Volkova E.N., Salikhova F.S. 2020. Spatial distribution of ground vegetation and forest litter in background and defoliating pine forests of the Kola Peninsula. — Plant Resources. 4: 335–350 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033994620040068>
- Lyanguzova I.V., Primak P.A., Salikhova F.S., Volkova E.N., Belyaeva A.I. 2021. Effect of aerotechnogenic pollution on spatial distribution of stocks of overground cover, forest litter and heavy metals in pine forests on the Kola Peninsula. — Plant Resources. 57 (4): 340–358. <https://doi.org/10.31857/S0033994621040087>
- Lyanguzova I.V., Belyaeva A.I., Kataeva M.N., Volkova E.N. 2023. Stocks of potentially toxic elements in the ground cover of northern taiga pine forests under aerotechnogenic pollution. — Bot. Zhurn. 108 (11): 1001–1014.
- Lyanguzova I., Yarmishko V., Gorshkov V., Stavrova N., Bakkal I. 2018. Impact of heavy metals on forest ecosystems of the European North of Russia. — In: Heavy Metals. London. P. 91.
- Methods for forest community studies. 2002. Saint-Petersburg. 240 p. (In Russ.).
- Munn R.E. 1973. Global Environmental Monitoring System (GEMS). — SCOPE. Report 3. Toronto: IC-SU-SCOPE. 130 p.
- Nadporozhskaya M.A., Zubkova E.V., Frolov P.V., Bykhovest S.S., Chertov O.G. 2018. Factors of soil and ground vegetation formation in pine forests. — Vestnik of Tver' University. Ser. of Biology and Ecology. 2: 122–138 (In Russ.).
- Nagimov Z.Ya., Artem'eva I.N., Shevelina I.V. Nagimov Z.Z. 2022. Species composition and reserves of phytomass of live ground cover in lichen pine forests of KHMAO — YUGRA. — Forests of Russia and economy in them. 1: 48–56 (In Russ.).
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Smirnova E.V., Isaeva L.G. 2002. The influence of *Picea obovata* and *Pinus sylvestris* on primary productivity of lower layers of coniferous forests in Kola Peninsula. — Bot. Zhurn. 87(8): 107–119 (In Russ.).
- Odintsov P.E., Karavanova E.I., Stepanov A.A. 2018. Transformation of water soluble organic substances in litters of podzols in the background and technogenic areas of the Kola Peninsula. — Eurasian Soil Science. 51 (8): 955–964. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18080099>
- Orlova M.A., Lukina N.V., Kamaev I.O. et al. 2011. Patchiness of forest biogeocenoses and soil productivity. — Russian Journal of Forest Science. 6: 39–48.
- Orlova M.A., Lukina N.V., Smirnov V.E., Artemkina N.A. 2016. The Influence of spruce on acidity and nutrient content in soils of northern taiga dwarf shrub–green moss spruce forests. — Euras. Soil Sci. 49(11): 1276–1288.
- Pereverzev V.N. 2011. Soils and soil cover of Kola Peninsula: history and modern condition of researches. — Vestnik of the Kola scientific center of RAS. 2: 74–82 (In Russ.).
- Rozenberg G.S. 2022. Ecosystem engineers: “Old songs about the first things” or the concept we have never noticed (overview of the problem). — Zh. Obshch. Biol. 83 (3): 220–234. <https://doi.org/10.31857/S0044459622030071>
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D. 2020. Assessment of intrabiogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub–herbaceous vegetation in spruce stands. — Eurasian Soil Science. 53 (1): 27–38. <https://doi.org/10.1134/S1064229320010135>
- Smirnova O.V., Aleinikov A.A., Semikolennykh A.A. et al. 2011. Spatial heterogeneity of soil–plant cover in dark

- taiga forests of the Pechora–Ilych Nature Reserve. — Russian Journal of Forest Science. 6: 67–78.
- Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I. 2018. Features of a ground cover and forest litter of artificial lime plantations depending on the nature of care. — Moscow University Soil Science Bulletin. 2: 3–11.
- Trefilova O.V., Belanov I.P., Ufimtsev V.I., Efimov D.Yu. 2021. Pine's Phytogenic Field's Effects in Different Climate Conditions. — Russian Journal of Forest Science. 2: 156–172 (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0024114821020091>
- Trubina M.R., Vorobeichik E.L., Khantemirova E.V., Bergman I.E., Kaigorodova S.Y. 2014. Dynamics of forest vegetation after industrial emissions decline: rapid recovery or continued degradation? — Doklady Biological Sciences. 458 (6): 721–725 (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0869565214300252>
- Uranov A.A. 1965. Fitogennoe pole (Phytogenic field). — Problemy sovremennoi botaniki (Challenges of modern botany). 1: 251–254 (In Russ.).
- Vorobeichik E.L., Trubina M.R., Khantemirova E.V., Bergman I.E. 2014. Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions. — Rus. J. Ecol. 45 (6): 498–507.
- Vorobeychik E.L., Kaigorodova S.Y. 2017. Long-term dynamics of heavy metals in the upper horizons of soils in the region of a copper smelter impacts during the period of reduced emission. — Eurasian Soil Science. 50 (8): 977–990.
<https://doi.org/10.1134/S1064229317080130>
- Vorobeichik E.L., Pishchulin P.G. 2009. Effect of individual trees on the pH and the content of heavy metals in forest litters upon industrial contamination. — Eurasian Soil Sci. 42 (8): 861–873.
- Vorobeichik E.L., Pishchulin P.G. 2011. Effect of trees on the decomposition rate of cellulose in soils under industrial pollution. — Eurasian Soil Sci. 44(5): 547–560.
- Vorobeichik E.L., Pishchulin P.G. 2016. Industrial pollution reduces the effect of trees on forming the patterns of heavy metal concentration fields in forest litter. — Russ. J. Ecol. 47 (5): 431–441.
- Vorobeichik E.L., Pozolotina V.N. 2003. Microscale spatial variation in forest litter phytotoxicity. — Russ. J. Ecol. 34 (6): 381–388.
- Watmough S.A., Dickinson N.M. 1995. Dispersal and mobility of heavy metals in relation to tree survival in an aerially contaminated woodland soil. — Environ. Pollut. 90: 135–142.
- Zhuravleva E.N., Ipatov V.S., Lebedeva V.Kh., Tikhodeva M.Yu. 2012. Vegetation changes in meadows under the influence of Scotts pine (*Pinus sylvestris* L.). — Vestnik of Saint Petersburg University. Ser. 3. Biology. 2: 3–12 (In Russ.).
<https://biocomm.spbu.ru/article/view/3842/3439>
- Zvereva E.L., Kozlov M.V. 2004. Facilitative effects of top-canopy plants on four dwarf shrub species in habitats severely disturbed by pollution. — J. Ecol. 92 (2): 288–296.
- Zvereva E.L., Kozlov M.V. 2007. Facilitation of bilberry by mountain birch in habitat severely disturbed by pollution: Importance of sheltering. — Environ. Exp. Bot. 60 (2): 170–176.