

ЗАПАСЫ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НАПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ПРИ АЭРОТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2023 г. И. В. Лянгузова^{1,*}, А. И. Беляева¹, М. Н. Катаева¹, Е. Н. Волкова¹

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

*e-mail: ILyanguzova@binran.ru

Поступила в редакцию 03.10.2023 г.

После доработки 26.10.2023 г.

Принята к публикации 07.11.2023 г.

В работе представлены результаты изучения распределения запасов потенциально токсичных элементов (Ni, Cu) в подкروновых пространствах и “окнах” древостоев в средневозрастных сосновых лесах на фоновой территории Кольского полуострова и при загрязнении окружающей среды атмосферными выбросами комбината “Североникель” (г. Мончегорск, Мурманская обл.). На основе ранее полученных данных о запасах наземной биомассы компонентов напочвенного покрова, мортмассы растительного опада и лесной подстилки и данных химического анализа методом атомно-абсорбционной спектрометрии листьев доминирующих видов кустарничков, наземных частей мха *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и лишайника *Cladonia stellaris* (Opiz.) Pouzar et Vězda, а также растительного опада и органогенного горизонта (подстилки) Al-Fe-гумусовых подзолов произведен расчет запасов Ni и Cu в различных компонентах лесных экосистем. Установлено, что резкое снижение объемов атмосферных выбросов комбинатом “Североникель”, произошедшее в последнее 20-летие, не оказало влияния на уровень загрязнения местообитаний, и запас тяжелых металлов в верхнем органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов остается очень высоким, особенно в импактной зоне, что не позволяет даже начать процессу восстановления напочвенного покрова на этой территории. Запас тяжелых металлов в растительном опаде согласованно возрастает с увеличением уровня загрязнения лесной подстилки при приближении к источнику загрязнения, но масштаб этого увеличения существенно меньше в мортмассе по сравнению с подстилкой: если запас тяжелых металлов в подстилке в импактной зоне превышает фоновые значения в 170–390 крат, то это превышение в растительном опаде достигает лишь 28 крат. Характер распределения запасов тяжелых металлов в компонентах напочвенного покрова, растительного опада и лесной подстилки по площади фитоценоза принципиально различается в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении, что обусловлено различиями в накоплении органического вещества в разных типах микросайтов. Соотношение концентраций и запасов Ni : Cu также различается в почвенно-растительном покрове в сосновых лесах фонового района и на территории с аэротехногенным загрязнением.

Ключевые слова: сосновые леса, напочвенный покров, запас биомассы, мортмасса, лесная подстилка, растительный опад, северная тайга, тяжелые металлы, аэротехногенное загрязнение, Мурманская область

DOI: 10.31857/S0006813623110054, **EDN:** CIOWSC

В бореальном климатическом поясе леса северной тайги отличаются редкостойностью, ярко выраженной гетерогенностью и контрастностью ценотических условий. Деревья — эдификаторы фитоценоза, часто рассматриваются в качестве “экосистемных инженеров” (Jones et al., 1994), которые формируют пространственную структуру растительного сообщества и существенно преобразуют физико-химическую среду. Кроны деревьев перераспределяют атмосферные осадки и трансформируют их химический состав, влияют на световой, тепловой и ветровой режимы место-

обитаний, мохово-лишайниковый и травяно-кустарничковый ярусы, возобновление древесных растений (Ershov et al., 2016, 2020; Klimenko, Ostakhova, 2020; Lebedeva et al., 2005, 2006, 2015, 2016; Lukina et al., 2018). Микромозаика напочвенного покрова наиболее четко отражается на морфологических, физико-химических и биологических свойствах их органогенных горизонтов, формирующихся из растительного опада (Karpachevsky, 1981, 1983; Karpachevsky et al., 2007; Vorobeichik, Pishchulin, 2009, 2011, 2016).

Аэротехногенное загрязнение окружающей среды оказывает существенное 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 (Dynamics..., 2009; Ivanova, Lukina, 2017; Odintsov et al., 2018; Ivanova et al., 2019; Zvereva, Kozlov, 2004, 2007; Vorobeichik, Pishchulin, 2009, 2011, 2016).

На территории Мурманской обл. расположены многочисленные предприятия цветной и черной металлургии, минеральных удобрений и строительных материалов, лесной, деревообрабатывающей и рыбной промышленности. Газообразные и пылевые выбросы промышленных предприятий являются крупнейшими источниками антропогенных загрязнителей атмосферы, почвы и поверхностных вод и оказывают негативное воздействие на природу, что нашло отражение в многочисленных публикациях (Argas, Kashulina, 2000; Salemaa et al., 2001, 2004; Myking et al., 2009; Kozlov, Zvereva, 2007; Kozlov et al., 2009; Zvereva et al., 2010; Kashulia et al., 2014; Lukina et al., 2017; Kashulina, 2017, 2018; Lyanguzova et al., 2018; Ershov et al., 2020).

Комбинат “Североникель” вступил в строй в 1938 г. и до 1968 г. использовал руду местного происхождения, а затем перешел на руду Норильского месторождения, что привело к резкому увеличению объемов атмосферных выбросов диоксида серы. Согласно опубликованным данным, в период 1981–1990 гг. ежегодный объем атмосферных выбросов SO_2 ОАО “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 и 6.0 тыс. т в год. В настоящее время ежегодный объем выбросов SO_2 и твердых веществ на комбинате “Североникель” составляет соответственно 35–37 и 2.9–3.4 тыс. т в год.

Цель настоящей работы — оценка пространственного распределения запасов тяжелых металлов в компонентах живого напочвенного покрова, растительного опада и лесной подстилки в средневозрастных северотаежных сосновых лесах, находящихся на фоновой территории и под воздействием аэротехногенного загрязнения.

Тяжелые металлы, входящие в состав полиметаллической пыли, выбрасываемой в атмосферу промышленными предприятиями, относятся к наиболее опасным и токсичным загрязняющим веществам окружающей среды. В связи с этим оценка запасов потенциально опасных для здоровья человека тяжелых металлов (Ni, Cu, Co) в компонентах

растительно-почвенного покрова лесных экосистем представляется весьма актуальной.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в 2017–2019 гг. в средневозрастных сосновых лесах, расположенных в фоновом районе Кольского полуострова и на территории буферной и импактной зон комбината “Североникель” (г. Мончегорск, Мурманская обл.). Названия зон приведены в соответствии с номенклатурой ЮНЕП (Munn, 1973).

Полевые исследования проведены на сети мониторинговых пробных площадей (ПП), которые 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. 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* spp. и лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F.H. Wigg., *C. stellaris* (Opiz.) Pouzar et 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. Согласно современной классификации почв России (Classification..., 2004; Pereverzev, 2011), исследуемые почвы относятся к Al-Fe-гумусовым подзолам.

На каждой пробной площади были заложены трансекты, на которых с интервалом 1 м размещали учетные площадки размером 10 × 10 см. Были выделены следующие типы микросайтов: А — на междокровных участках в “окнах” полога древостоя; Б — в поддокровных пространствах деревьев сосны.

На каждой площадке был вырезан монолит размером 10 × 10 см до верхнего минерального горизонта. С 4-х сторон монолита измерена толщина лесной подстилки. Монолит был разобран на живую биомассу и мортмассу. В живую биомассу входили следующие компоненты: надземные и подземные 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 подгори-

зонта. Подгоризонт AOL, образованный свежим растительным опадом, все фракции которого (мелкие ветви, кора, хвоя, листья, шишки) еще сохраняют свою морфологическую структуру (этот слой мы будем в дальнейшем называть растительным опадом), и подгоризонты AOF и AOH, в совокупности образующие органогенный горизонт (O) почвы или лесную подстилку. Все образцы живой биомассы и мортмассы были высушены до воздушно-сухого состояния и взвешены.

Содержание кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co было определено в вытяжке 1.0 н 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 два критерия: индекс техногенной нагрузки и запас Ni и Cu в лесной подстилке. Выбор органогенного горизонта подзолов обусловлен, с одной стороны, высокой сорбционной емкостью лесной подстилки, которая является основным депо тяжелых металлов в лесных экосистемах; с другой стороны, тем, что именно в этом горизонте располагаются подземные побеги и корни кустарничков. Индекс техногенной нагрузки (ИТН) представляет собой превышение суммарного содержания кислоторастворимых форм преобладающих металлов (Ni, Cu и Co) в подстилке над их фоновым содержанием (Methods..., 2002). Запас (г/м^2) Ni и Cu в различных фракциях надземной биомассы, растительном опаде и лесной подстилке был рассчитан как произведение концентрации металла (мг/кг) на соответствующий запас биомассы или подстилки (г/м^2) на каждой учетной площадке.

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 условиях аэротехногенного загрязнения происходит накопление тяжелых металлов во всех компонентах наземных экосистем, но прежде всего необходимо оценить современный уровень загрязнения местообитаний тяжелыми металлами.

Оценка уровня загрязнения местообитаний. На фоновой территории Кольского полуострова в сосновых лесах среднее значение суммарной концентрации кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co в органогенном горизонте (лесной подстилке) Al-Fe-

гумусовых подзолов составляет $20.0 \pm 0.5 \text{ мг/кг}$, при этом не выявлено достоверных различий в их содержании в разных типах микросайтов, поэтому при расчете индекса техногенной нагрузки суммарное содержание этих металлов было принято за 1. Изменение индекса техногенной нагрузки в разных типах микросайтов в пределах буферной и импактной зон подробно описано ранее (Lyanguzova et al., 2021), поэтому здесь приведем лишь краткую характеристику этого показателя.

В пределах буферной зоны величины индексов техногенной нагрузки на ПП2 и ПП3 существенно различаются. На ПП2 его среднее значение равно 8.7 ± 0.3 отн. ед., составляя в подкроновых и межкроновых микросайтах соответственно 9.3 ± 0.4 и 7.2 ± 0.3 отн. ед. На ПП3 зарегистрировано более высокое среднее значение — 15.8 ± 1.1 отн. ед., а в соответствующих типах микросайтов величины индекса составляют 17.7 ± 1.0 и 13.1 ± 1.3 отн. ед. Почти 2-кратные различия в значениях индекса техногенной нагрузки на двух исследованных пробных площадях в буферной зоне обусловлены преобладанием ветров, имеющих юго-юго-западное направление 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 ± 5 и 119 ± 7 отн. ед., что в 7.5–13.6 раза больше соответствующих величин в буферной зоне. Диапазоны варьирования этого показателя достаточно широки — 11–182 и 66–218 отн. ед. соответственно, при этом на обеих ПП в разных типах микросайтов величины индекса техногенной нагрузки достоверно не различаются.

Распределение запасов тяжелых металлов в лесной подстилке по площади фитоценоза имеет свои особенности, обусловленные как химической природой металла, так и биогеоценотической обстановкой, и отличается от распределения концентраций тяжелых металлов. Наименьшие значения запаса зарегистрированы для кобальта, они варьируют от 0.004 (в подстилке фонового сосняка) до 0.24 г/м^2 (в импактной зоне), поэтому в дальнейшем мы их не будем учитывать. В зонах аэротехногенного загрязнения запасы тяжелых металлов в подстилке различаются значительно сильнее, чем их концентрации. В буферной зоне превышение фоновых величин в запасах Ni и Cu достигает 9–33, в импактной зоне — 170–390 крат.

Характер изменения запасов тяжелых металлов в лесной подстилке неодинаков, как в зависимости от положения микросайта в пространстве, так и от металла. В фоновом сосняке запасы Ni и Cu одинаковы (0.03 г/м^2) и достоверно не различаются в “окнах” и под пологом древостоя

Таблица 1. Местоположение пробных площадей (ПП) и краткая таксационная характеристика древостоев сосны
Table 1. Location of the sample plots (SP) and brief taxation characteristics of pine forest stands

Номер ПП Number of sample plot (SP)	Координаты, расстояние и направление от комбината Coordinates, distance and direction from the plant	Возраст, лет Age, years	Диаметр на высоте 1.3 м, см Diameter at breath height, cm	Высота, м Height, m	Плотность, экз./га Density, trees/ha
Фоновый район/Background					
1	N 67°49' E 31°20' 80 км ЮЗ 80 km SW	70	11.9	11.5	1160
Буферная зона/Buffer zone					
2	N 68°06'82" E 33°19'45" 35 км СВ 35 km NE	80	9.1	9.7	2960
3	N 67°38'17" E 32°42'23" 35 км ЮЮЗ 35 km SSW	80	7.9	8.1	2880
Импактная зона/Impact zone					
4	N 68°00'38" E 32°55'54" 10 км СВ 10 km NE	80	6.6	9.2	4300
5	N 67°44'22" E 32°46'45" 15 км ЮЮЗ 15 km SSW	80	5.1	7.2	6300

(рис. 1). В условиях аэротехногенного загрязнения во всех случаях более высокие величины запаса зарегистрированы для меди, они превышают соответствующие значения запасов никеля в 1.3–2 раза (рис. 1). Как уже отмечалось нами (Lyanguzova et al., 2021), столь неоднозначный характер изменения запасов тяжелых металлов, скорее всего, связан с отсутствием достоверных различий в запасах лесной подстилки в разных типах микросайтов независимо от уровня аэротехногенного загрязнения, а концентрации кислоторастворимых форм меди в подстилке всегда больше соответствующего содержания никеля.

Запас тяжелых металлов в растительном опаде. Тренды запасов никеля и меди в растительном опаде исследуемых сосновых лесов, в целом, аналогичны характеру изменения этого показателя в лесной подстилке, но абсолютные величины значительно меньше (рис. 2). В фоновом сосняке запас никеля достоверно не отличается от его величины для меди, как в “окнах”, так и под пологом древостоя и в среднем составляет 0.010 г/м². В условиях аэротехногенного загрязнения во всех случаях

запас меди в растительном опаде значительно превышает этот показатель для никеля. В пределах буферной зоны запас никеля варьирует от 0.014 до 0.042 г/м², а меди – от 0.019 до 0.068 г/м². Средние величины запасов тяжелых металлов в этой зоне превышают фоновые значения не более, чем в 7 раз. На территории импактной зоны запас меди на обеих пробных площадях существенно больше (более чем в 2 раза) значения этого показателя для никеля. По отношению к фоновым величинам превышение запасов тяжелых металлов в импактной зоне составляет 6–28 крат.

Сравнительный анализ запасов тяжелых металлов в лесной подстилке и растительном опаде показывает существенные различия в их величинах. В фоновом сосняке запас как никеля, так и меди в подстилке в среднем в 3 раза больше его величины в растительном опаде. В условиях аэротехногенного загрязнения эти различия еще более значительны: в буферной зоне они варьируют для никеля – от 13 до 40 крат, для меди – 14 до 49 крат; в импактной зоне – 7–110 крат для никеля и 27–85 крат для меди соответственно. Следует подчерк-

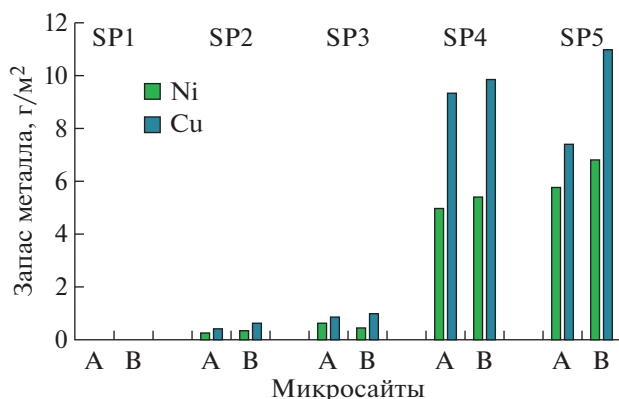


Рис. 1. Запасы тяжелых металлов в лесной подстилке сосновых лесов в фоновом районе, буферной и импактной зонах. Здесь и на рис. 2–5: микросайты: А — “окно” древостоя (открытый участок); В — подкروновое пространство; SP1–SP5 — номера пробных площадей.

Fig. 1. Stocks of heavy metals (g/m^2) in the forest litter of pine forests in the background area, buffer and impact zones. Here and in Figs. 2–5: microsites: A — forest stand “window” (open area); B — undercrown space; SP — numbers of sample plots.

нать, что соотношение Ni : Cu, как в лесной подстилке, так и в растительном опаде сдвинуто в сторону преобладания последнего металла (рис. 1, 2).

Запасы тяжелых металлов в надземной биомассе напочвенного покрова. Для оценки запасов тяжелых металлов в травяно-кустарничковом ярусе исследуемых сосновых лесов использовали данные о запасе надземной биомассы кустарничков на учетных площадках и соответствующее среднее содержание Ni и Cu в листьях доминирующих видов яруса — *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea* и *Empetrum hermaphroditum* (табл. 2). Минимальные значения запасов тяжелых металлов отмечены в фоновом сосняке (ПП1), где они составляют Ni — 0.0005–0.0010, Cu — 0.0023–0.0047 g/m^2 (рис. 3). В пределах буферной зоны запасы Ni варьируют от 0.007 до 0.017, Cu — от 0.002 до 0.005 g/m^2 , т.е. запасы никеля превышают фоновые значения в 15–34 раза, а запасы меди достоверно не отличаются от их фоновых величин. Наиболее широкий интервал варьирования запасов тяжелых металлов в надземной биомассе кустарничков наблюдается в импактной зоне, где запасы никеля составляют от 0.012 до 0.040 g/m^2 , меди — от 0.003 до 0.014 g/m^2 , что в 24–80 раз превышает их фоновые значения для никеля и лишь в 1.3–6 раз для меди.

Распределение запасов тяжелых металлов в надземной биомассе кустарничков в “окнах” и под пологом древостоя принципиально различается в фоновом сосняке, буферной и импактной зонах (рис. 3). Если при отсутствии аэротехногенного загрязнения (фоновый район) и в буферной зоне запасы Ni и Cu в подкروновых простран-

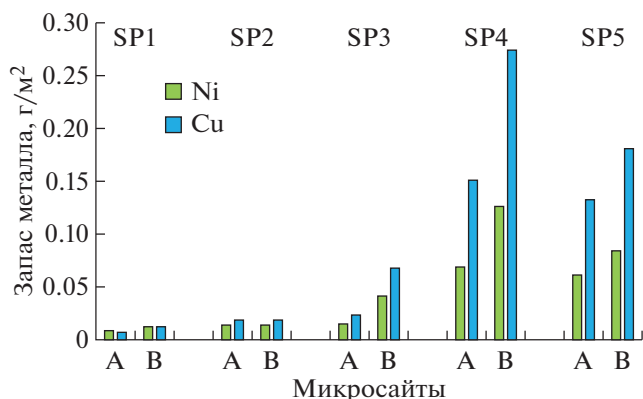


Рис. 2. Запасы тяжелых металлов в мортмассе (растительном опаде) сосновых лесов в фоновом районе, буферной и импактной зонах.

Fig. 2. Stocks of heavy metals (g/m^2) in the mortmass (plant waste) of pine forests in the background area, buffer and impact zones.

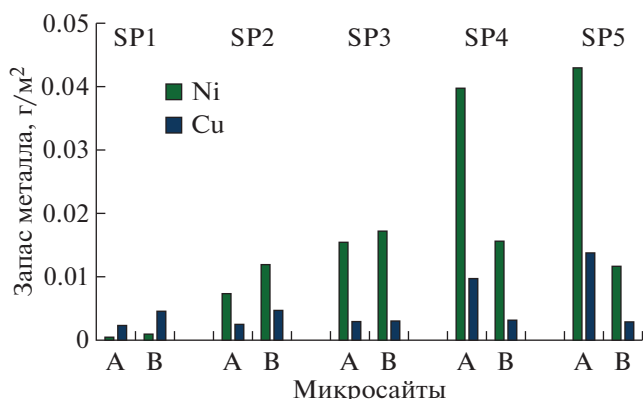


Рис. 3. Запасы тяжелых металлов в надземной биомассе кустарничков сосновых лесов в фоновом районе, буферной и импактной зонах.

Fig. 3. Stocks of heavy metals (g/m^2) in the aboveground biomass of dwarf-shrubs in pine forests in the background area, buffer and impact zones.

ствах в большинстве случаев достоверно больше по сравнению с открытыми участками, то в импактной зоне наблюдается обратное соотношение, т.е. в “окнах” древостоя запасы обоих металлов существенно больше по отношению к их величинам под пологом древостоя.

Оценку запасов тяжелых металлов в мохово-лишайниковом ярусе проводили, исходя из биомассы надземных частей мхов и лишайников, собранных на учетных площадках, и содержания Ni и Cu в доминирующих видах яруса — *Pleurozium schreberi* и *Cladonia stellaris* (табл. 2). Согласно данным табл. 2, в фоновом сосняке содержание обоих металлов достоверно больше в доминанте мохового покрова *Pleurozium schreberi* по сравнению

Таблица 2. Содержание (мг/кг сух. в-ва) металлов в листьях кустарничков, зеленых частях мха *Pleurozium schreberi* и живых частях лишайника *Cladonia stellaris* из фонового района, буферной и импактной зон**Table 2.** Content (mg/kg dry matter) of metals in the leaves of shrubs, green parts of the moss *Pleurozium schreberi* and living parts of the lichen *Cladonia stellaris* from background area, buffer and impact zones

Вид растений/Species	ПП/SP	Ni	Cu	Co
Фоновый район/Background				
<i>Cladonia stellaris</i>	1	1.4 ± 0.1	1.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1
<i>Pleurozium schreberi</i>	1	2.1 ± 0.1	3.2 ± 0.3	0.4 ± 0.1
<i>Vaccinium myrtillus</i>	1	0.9 ± 0.1	5.5 ± 1.0	0.4 ± 0.1
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	1	0.8 ± 0.1	3.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1
<i>Empetrum hemaphroditum</i>	1	2.8 ± 0.2	3.8 ± 0.2	0.4 ± 0.1
Буферная зона/Buffer zone				
<i>Cladonia stellaris</i>	2	25.2 ± 4.6	9.6 ± 1.6	0.9 ± 0.1
		20.6 ± 0.4	8.0 ± 0.1	0.8 ± 0.1
<i>Cladonia stellaris</i>	3	47.0 ± 3.4	23.6 ± 1.3	1.5 ± 0.7
		35.9 ± 0.9	20.3 ± 1.4	1.8 ± 0.1
<i>Pleurozium schreberi</i>	2	59.5 ± 0.7	24.7 ± 0.8	2.2 ± 0.1
		69.1 ± 10.4	30.6 ± 2.3	2.7 ± 0.3
<i>Vaccinium myrtillus</i>	2	0.8 ± 0.9	5.7 ± 0.7	0.5 ± 0.1
		8.6 ± 1.5	6.6 ± 1.1	0.5 ± 0.1
<i>Vaccinium myrtillus</i>	3	42.7 ± 1.1	8.8 ± 0.3	0.4 ± 0.1
		48.5 ± 0.2	9.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	2	7.7 ± 1.6	3.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1
		7.4 ± 1.0	2.8 ± 0.3	0.4 ± 0.1
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	3	28.7 ± 1.1	5.1 ± 0.2	0.4 ± 0.1
		27.9 ± 2.4	4.3 ± 0.3	0.4 ± 0.1
<i>Empetrum hemaphroditum</i>	2	23.2 ± 9.9	4.0 ± 1.1	0.4 ± 0.1
		16.1 ± 7.4	3.3 ± 1.3	0.4 ± 0.1
<i>Empetrum hemaphroditum</i>	3	41.8 ± 5.3	8.3 ± 0.6	0.7 ± 0.1
		33.5 ± 1.8	6.8 ± 1.3	0.7 ± 0.1
Импактная зона/Impact zone				
<i>Vaccinium myrtillus</i>	4	73.5 ± 3.4	18.2 ± 0.7	1.4 ± 0.1
		60.3 ± 0.3	10.0 ± 0.3	0.4 ± 0.1
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4	51.2 ± 1.0	7.5 ± 0.1	1.6 ± 0.3
		28.0 ± 2.1	5.4 ± 0.5	1.1 ± 0.2
<i>Empetrum hemaphroditum</i>	4	74.1 ± 9.2	23.1 ± 4.6	1.5 ± 0.2
		46.3 ± 3.6	13.2 ± 2.0	1.8 ± 0.4
<i>Vaccinium myrtillus</i>	5	73.4 ± 2.8	19.4 ± 0.3	1.4 ± 0.1
		61.9 ± 0.2	11.2 ± 0.1	0.4 ± 0.1
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	5	54.4 ± 1.0	7.4 ± 0.3	1.4 ± 0.1
		29.9 ± 1.4	5.3 ± 0.3	1.0 ± 0.1
<i>Empetrum hemaphroditum</i>	5	76.5 ± 4.8	21.3 ± 1.2	1.6 ± 0.2
		41.2 ± 5.9	10.0 ± 1.3	1.7 ± 0.1

Примечания: Приведены среднее значение и ошибка среднего. Над чертой — межкروновое пространство, под чертой — подкroновое пространство.**Notes:** Mean and error of the mean are given. Above the line is the intercrown space, below the line is the undercrown space.

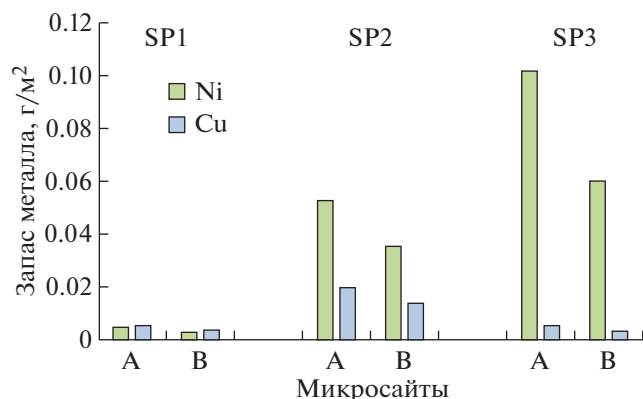


Рис. 4. Запасы тяжелых металлов в надземных частях лишайников сосновых лесов в фоновом районе и буферной зоне.

Fig. 4. Stocks of heavy metals (g/m^2) in the aboveground parts of lichens in pine forests in the background area and buffer zone.

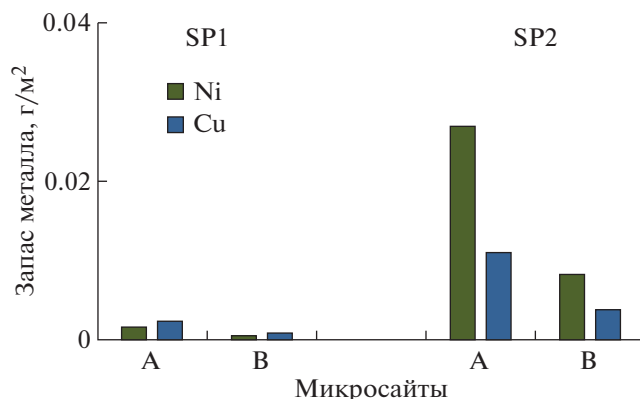


Рис. 5. Запасы тяжелых металлов в зеленых частях мхов сосновых лесов в фоновом районе и буферной зоне.

Fig. 5. Stocks of heavy metals (g/m^2) in the green parts of mosses in pine forests in the background area and buffer zone.

с доминирующим видом лишайникового покрова *Cladonia stellaris*. Эта закономерность сохраняется и в буферной зоне при их совместном произрастании на ПП2, однако при более высоком уровне загрязнения лесной подстилки на ПП3 лишайник накапливает соответственно в 1.7–2.5 раза больше тяжелых металлов по сравнению с их содержанием в надземных частях лишайника на ПП2, а *Pleurozium schreberi* выпадает из напочвенного покрова. Сравнительный анализ содержания и запасов тяжелых металлов в мохово-лишайниковом ярусе фоновой сосняк и в буферной зоне на ПП2 выявил различия в закономерностях их накопления (табл. 2, рис. 4, 5). В этих условиях концентрации обоих металлов в исследуемом виде мха достоверно больше по сравнению с их содержанием в лишайнике, в то время как для запасов тяжелых металлов регистрируется противоположная закономерность: их запасы в лишайниковом покрове превышают запасы в моховом покрове в 2–4 раза. Эти противоречия обусловлены различиями в накоплении надземной биомассы лишайниками и мхами: запас биомассы первых в 4–5 раз больше на открытых участках и в 8–14 раз под пологом древостоя по сравнению с запасом биомассы последних.

В фоновой сосняк в подкروновых пространствах запасы обоих металлов в мохово-лишайниковом ярусе достоверно меньше по сравнению с их значениями на открытых участках, причем запасы меди больше, чем никеля (рис. 4, 5). На территории буферной зоны (ПП2) запасы никеля значительно превышают запасы меди в доминирующих видах мохово-лишайникового яруса, при этом в “окнах” древостоя запасы и никеля, и меди в 1.5–3 раза больше по отношению к микросайтам под пологом древостоя. Эти же закономерности

сохраняются и в запасах тяжелых металлов в лишайниковом покрове на ПП3 при более высоком уровне загрязнения лесной подстилки.

При отсутствии аэротехногенного загрязнения (фоновый район) все исследуемые виды растений и лишайников накапливают больше Cu, чем Ni, а на территории буферной и импактной зон это соотношение изменяется на обратное (табл. 2). В условиях аэротехногенного загрязнения концентрации Ni в надземных частях растений и лишайников существенно превышают содержание Cu, в отличие от лесной подстилки и растительного опада, где это соотношение сдвинуто в сторону преобладания последнего металла.

ОБСУЖДЕНИЕ

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

Произошедшее в последнее 20-летие 5–8-кратное снижение объемов атмосферных выбросов комбинатом “Североникель” не сказалось на уровне загрязнения верхнего органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов. На территории буферной зоны уровень загрязнения лесной подстилки продолжает увеличиваться, а на территории импактной зоны практически не снижается (Kashulina, 2017, 2018; Lyanguzova, 2016, 2017; Lyanguzova et al., 2018). 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 фоновые значения. Превышение фоновых значений в запасах тяжелых

металлов в лесной подстилке достигает для Ni — 9–18, для Cu — 18–33 крат в буферной зоне, а в импактной зоне соответственно 140–175 и 290–390 крат. Многократное увеличение запасов тяжелых металлов в подстилке обусловлено меньшей скоростью разложения растительных остатков и соответственно повышенным накоплением массы подстилки (Vorobeichik, 1995, 2002; Vorobeichik, Pishchulin, 2009, 2011, 2016; Ivanova et al., 2019). Сохранение высокого уровня загрязнения почв тяжелыми металлами препятствует восстановлению биоты, что хорошо задокументировано в районах воздействия атмосферных выбросов предприятий цветной металлургии (Kashulina, 2017, 2018; Lyanguzova et al., 2018; Trubina et al., 2014; Vorobeychik, Kaigorodova, 2017; Vorobeichik et al., 2014).

По мере приближения к источнику загрязнения происходит согласованное увеличение запасов тяжелых металлов, как в лесной подстилке, так и в растительном опаде, но абсолютные значения их запасов в растительном опаде значительно уступают их величинам в подстилке, что вполне логично. Растительный опад в сосновых лесах формируется из опавших ассимиляционных органов (листьев, хвои) кустарничков и деревьев, коры и сухих ветвей деревьев, сосновых шишек и служит экраном для поступления полиметаллической пыли из загрязненного воздуха на поверхность почвы. Резкое уменьшение объемов атмосферных выбросов в настоящее время привело к существенному снижению содержания тяжелых металлов в листьях (хвое) кустарничков и деревьев (Lyanguzova, Katjutin, 2023), что и является одной из причин различий в запасах тяжелых металлов в мортмассе (растительном опаде) и лесной подстилке. Распределение запасов тяжелых металлов в этих компонентах в разных типах микросайтов различается в буферной и импактной зонах (рис. 1, 2). Возрастание запасов никеля и меди в мортмассе подкроновых пространств по сравнению с открытыми участками наиболее ярко выражено на территории импактной зоны, для запасов тяжелых металлов в лесной подстилке эта закономерность не столь четко просматривается. В буферной зоне аналогичные тренды не всегда выявляются. Ранее нами было показано, что распределение по площади фитоценоза толщины и запаса лесной подстилки не всегда связано с запасом растительного опада (Lyanguzova et al., 2021). Если толщина подстилки и масса опада в большинстве случаев закономерно снижаются от приствольных к межкроновым зонам, то масса подстилки в условиях аэротехногенного загрязнения не связана с положением в тессере. Возможно, это обусловлено высокой степенью вариабельности параметров лесных подстилок, что отмечается в ряде работ (Demakov et al., 2017; Semenyuk et al., 2020; Telesnina et al., 2017).

В соответствии с полученными результатами можно констатировать, что с уменьшением расстояния до источника аэротехногенного загрязнения в надземных частях растений и лишайников возрастает содержание тяжелых металлов, причем их концентрации располагаются в убывающем ряду: $Ni > Cu > Co$ (табл. 2). На территории импактной зоны практически во всех случаях под пологом древостоя регистрируется достоверно меньшее содержание тяжелых металлов в надземной биомассе по сравнению с их содержанием в надземных частях растений и лишайников, произрастающих на открытых участках. Сходная закономерность в изменении запасов тяжелых металлов отмечена на территории импактной зоны для кустарничков, а в пределах буферной зоны — для лишайников и мхов, однако для запасов никеля и меди в листьях кустарничков наблюдается противоположный тренд (рис. 3–5). Различия в закономерностях изменения концентраций и запасов тяжелых металлов в надземной биомассе травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов обусловлены различиями в накоплении органического вещества в разных типах микросайтов. Ранее нами было показано, что в фоновых условиях наиболее четкие закономерности в накоплении органического вещества в зависимости от положения в тессере наблюдаются для запаса надземной биомассы лишайников, а для мхов и кустарничков более характерно незакономерное варьирование запасов биомассы по площади фитоценоза (Lyanguzova et al., 2021), что, возможно, связано с микромасштабным пространственным варьированием условий экотопа. В разных типах еловых лесов выявлена высокая степень варьирования запаса надземной биомассы напочвенного покрова в пределах тессер (Semenyuk et al., 2020; Telesnina et al., 2017). Авторы установили, что внутрибиогеоценозное варьирование надземной биомассы напочвенного покрова превышает межбиогеоценозное варьирование, при этом фактором, определяющим увеличение биомассы напочвенного покрова от приствольных к межкроновым пространствам, является освещенность. В редкостойных северотаежных лесах фактор освещенности не играет столь существенной роли, как в еловых лесах южной тайги, однако как в еловых, так и в сосновых фоновых лесах Кольского полуострова влияние деревьев на формирование биомассы напочвенного покрова остается по-прежнему значительным (Nikonov et al., 2002). Авторы указывают, что в сосняках кустарничково-лишайниковых наименьший запас надземной биомассы напочвенного покрова регистрируется в приствольных зонах (758 г/м²), а максимальный — в подкроновых пространствах (1414–1482 г/м²) деревьев сосны, при этом запас биомассы в межкроновых (730 г/м²) и приствольных зонах достоверно не различается.

Хорошо известно, что тяжелые металлы в малых концентрациях выполняют роль микроэлементов, необходимых для нормальной жизнедеятельности растений, при этом важны не только концентрации элементов, но также и их соотношение (Lyanguzova, 2021). Если в фоновом районе содержание Cu достоверно превышает концентрацию Ni в ассимиляционных органах всех исследованных растений (табл. 2), а в живых частях лишайника *Cladonia stellaris* концентрации Ni и Cu равны, то в условиях аэротехногенного загрязнения соотношение Ni : Cu смещено в сторону преобладания первого металла. При этом, в лесной подстилке содержание кислоторастворимых форм Cu более чем в 2 раза выше, чем Ni. Кроме того, коэффициенты концентрации для Ni во много раз больше, чем значения этого параметра для Cu. Все это свидетельствует о более быстрой транслокации Ni из загрязненной почвы в наземные части растений по сравнению с Cu (Lyanguzova, 2021). Аналогичные закономерности в соотношении запасов Ni : Cu в наземной биомассе кустарничков, мхов и лишайников зарегистрированы и в настоящей работе, а для мортмассы (растительного опада) и лесной подстилки выявлены противоположные тренды.

Воздействие аэротехногенного загрязнения на запасы тяжелых металлов в различных компонентах лесных экосистем проявляется неоднозначно. С одной стороны, в условиях загрязнения кроны сосны приобретают еще большую ажурность, снижается охвоенность ветвей, перераспределение количества и трансформация химического состава осадков кронами сосны существенно ослабляется, что приводит к более равномерному по площади фитоценоза накоплению запасов тяжелых металлов в подстилке и снижению роли хвойных деревьев в распределении органического вещества. В то же время запасы тяжелых металлов в мортмассе (растительном опаде) более значительны в подкروновых пространствах за счет увеличения запасов растительного опада в этих микросайтах по сравнению с величинами этих показателей в “окнах” древостоя. С другой стороны, несмотря на увеличивающуюся ажурность крон сосны и снижение охвоенности ветвей, на территории импактной зоны концентрации и запасы тяжелых металлов в листьях кустарничков достоверно больше на открытых участках по сравнению с микросайтами под пологом древостоя (табл. 2, рис. 3). Сходная тенденция наблюдается и в буферной зоне для концентраций и запасов тяжелых металлов в лишайниках и мхах (табл. 2, рис. 4, 5). Это свидетельствует о сохранении роли древесного яруса в качестве эдификатора фитоценоза, оказывающего влияние на напочвенный покров. Тем не менее следует подчеркнуть, что высокие концентрации и повышенные запасы тяжелых металлов во всех компонентах лесных экосистем

являются потенциально опасными для здоровья человека, особенно на территории импактной зоны. В связи с этим не рекомендуется собирать грибы, ягоды, лекарственные растения в радиусе 15–20 км от комбината “Североникель”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова, позволило оценить внутриценотическую неоднородность распределения запасов тяжелых металлов в компонентах напочвенного покрова, растительного опада, а также в лесной подстилке в фоновых условиях и по градиенту загрязнения в зонах воздействия атмосферных выбросов медно-никелевого комбината.

Несмотря на резкое снижение объемов атмосферных выбросов комбинатом “Североникель” (Мурманская обл.), произошедшее в последнее 20-летие, уровень загрязнения местообитаний и запасы тяжелых металлов в верхнем органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов остаются очень высокими, особенно в импактной зоне, что не позволяет даже начаться процессу восстановления напочвенного покрова на этой территории. Запас тяжелых металлов в растительном опаде согласованно возрастает с увеличением уровня загрязнения лесной подстилки при приближении к источнику загрязнения, но масштаб этого увеличения существенно меньше в мортмассе по сравнению с подстилкой. Если в буферной зоне превышение фоновых величин в запасах Ni и Cu в лесной подстилке достигает 9–33, а в импактной зоне — 170–390 крат, то в мортмассе растительного опада запасы Ni превышают фоновые значения в 13–40 крат, Cu — 14 до 49 крат, а в импактной зоне — 7–110 (Ni) и 27–85 (Cu) крат соответственно.

Характер распределения запасов тяжелых металлов в компонентах напочвенного покрова, растительного опада и лесной подстилки по площади фитоценоза принципиально различается в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении. Различия в закономерностях изменения концентраций и запасов тяжелых металлов в наземной биомассе травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов обусловлены различиями в накоплении органического вещества в разных типах микросайтов. Кроме того, соотношение концентраций и запасов Ni : Cu также различается в почвенно-растительном покрове в сосновых лесах фонового района и при воздействии аэротехногенного загрязнения. В незагрязненных местообитаниях содержание и запасы Ni и Cu часто примерно одинаковы, как в растительных компонентах, так и в растительном опаде и подстилке, в условиях аэротехногенного загрязнения регистрируются противоположные тренды: во всех растительных организмах содержание и запасы

Ni превышают таковые Cu, в то время как в лесной подстилке и растительном опаде эти соотношения сдвинуты в сторону преобладания меди.

Вследствие высоких концентраций и запасов тяжелых металлов, особенно Ni, представляющих потенциальную опасность для здоровья человека, в растительном сырье на территории импактной зоны, не рекомендуется использовать недревесные ресурсы леса в окрестностях комбината “Североникель” в радиусе 15–20 км.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за оказанную помощь при проведении полевых работ П.А. Примака и Ф.С. Салиховой.

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

- Ayras M., Kashulina G. 2000. Regional patterns of element contents in the organic horizon of podzols in the central part of the Barents region (Finland, Norway and Russia), with special reference to heavy metals (Co, Cr, Fe, Ni, Pb, V and Zn) and sulphur as indicators of airborne pollution. — *Journal of Geochemical Exploration*. 68: 127–144.
- [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.
- [Classification...] Классификация и диагностика почв России. 2004. Смоленск. 342 с.
- [Demakov et al.] Демаков Ю.П., Исаев А.В., Шарафутдинов Р.Н. 2017. Роль лесной подстилки в борах Марийского Заволжья и вариabельность ее параметров. — В сб.: Научные труды Гос. природного заповедника “Большая Кокшага”. 8: 15–43.
- [Dynamics...] Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. 2009. СПб. 276 с.
- Ershov V.V., Lukina N.V., Orlova M.A., Zukert N.V. 2016. Dynamics of snowmelt water composition in conifer forests exposed to airborne industrial pollution. — *Rus. J. Ecol.* 47 (1): 46–52.
- Ershov V.V., Isaeva L.G., Sukhareva T.A., Lukina N.V., Danilova M.A., Smirnov V.E. 2020. Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the Northern tree line subject to air pollution. — *Rus. J. Ecol.* 51 (4): 319–328. <https://doi.org/10.1134/S1067413620040050>
- Jones C.G., Lawton J.H., Shachak M. 1994. Organisms as ecosystem engineers. — *Oikos*. 69 (3): 373–386.
- [Ivanova, Lukina] Иванова Е.А., Лукина Н.В. 2017. Вальрирование 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>
- [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., de Caritat P., Reimann C. 2014. Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis. — *Atmospheric Environ.* 89: 672–682.
- 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>
- [Klimenko, Ostakhova] Клименко Д.Е., Остахова А.Л. 2020. Моделирование потерь дождевых осадков в кронах хвойных древостоев. — *Лесоведение*. 4: 335–345.
- Kozlov M., Zvereva E. 2007. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. — *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 6: 231–259.
- Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. 2009. Impacts of point polluters on terrestrial biota. Dordrecht, Heidelberg, London, New-York. 466 p.
- [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., 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., Ипатов В.С., Тиходеева М.Ю. 2015. Неоднородность пространственной структуры живого напочвенного покрова в лесных сообществах. — *Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология*. 2: 32–46. <https://biocomm.spbu.ru/article/view/859/750>
- [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.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Smirnov V.E., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Belova E.A. 2017.

- Mass-Loss Rates from Decomposition of Plant Residues in Spruce Forests Near the Northern Tree Line Subject to Strong Air Pollution. — *Environmental Science and Pollution Research*. 24 (24): 19874–19887.
- [Lukina et al.] Лукина Н.В., Ершов В.В., Горбачева Т.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г., Тебенькова Д.Н. 2018. Оценка состава почвенных вод северотаежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона. — *Почвоведение*. 3: 284–296. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030036>
- [Lyanguzova] Лянгузова И.В. 2016. Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Saarbrücken (Германия). 260 с.
- [Lyanguzova] Лянгузова И.В. 2017. Динамические тренды содержания тяжелых металлов в растениях и почвах при разном режиме аэротехногенной нагрузки. — *Экология*. 4: 250–260. <https://doi.org/10.7868/S0367059717040114>
- Lyanguzova I.V. 2021. Airborne Heavy Metal Pollution and its Effects on Biomass of Ground Vegetation, Foliar Elemental Composition and Metabolic Profiling of Forest Plants in the Kola Peninsula (Russia). — *Russian Journal of Plant Physiology*. 68 (Suppl. 1): S140–S149.
- [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. — *Раст. ресурсы*. 57 (4): 340–358.
- Lyanguzova I., Katjutin P. 2023. Effects of High and Low Aerotechnogenic Emissions of heavy Metals on Wild Plants. — *Forests*. 14 (8). N article 1650.
- Lyanguzova I., Yarmishko V., Gorshkov V., Stavrova N., Bakal I. 2018. Impact of heavy metals on forest ecosystems 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: ICSU-SCOPE. 130 p.
- Myking T., Aarrestad P.A., Derome J. et al. 2009. Effects of air pollution from a nickel–copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian–Norwegian–Finnish border area. — *Boreal Environ. Res*. 14: 279–291.
- [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>
- [Pereverzev] Переверзев В.Н. 2011. Почвообразование в лесной зоне Кольского полуострова. — *Вестн. КНЦ РАН*. 2: 74–82.
- Salemaa M., Vanha-Majamaa I., Derome J. 2001. Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. фоновых и техногенных территорий (3): 339.
- Salemaa M., Derome J., Helmisaari H.-S., Nieminen T., Vanha-Majamaa I. 2004. Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland. — *Sci. Total Environ*. 324: 141–160.
- [Semenyuk et al.] Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. 2020. Оценка внутрибиогеоценотической изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях. — *Почвоведение*. 1: 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
- [Telesnina et al.] Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г. 2017. Свойства лесных подстилок во взаимосвязи с напочвенным покровом в лесных экосистемах Подмосковья (на примере УОПЭЦ “Чашниково”). — *Вест. МГУ. Сер. 17. Почвоведение*. 4: 11–20.
- [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>
- [Vorobeichik] Воробейчик Е.Л. 1995. Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения. — *Экология*. 4: 278–284.
- [Vorobeichik] Воробейчик Е.Л. 2002. Изменение пространственной структуры деструкционного процесса в условиях атмосферного загрязнения лесных экосистем. — *Изв. АН. Сер. Биол.* 3: 368–379.
- [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>
- [Vorobeichik, 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. — *Почвоведение*. 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 деструкции 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 концентрации тяжелых металлов в лесной подстилке. — *Экология*. 5: 323–334.

- 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.
- Zvereva E., Roitto M., Kozlov M. 2010. Growth and reproduction of vascular plants in polluted environments: a synthesis of existing knowledge. — Environ. Rev. 18: 355–367.

STOCKS OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS IN THE GROUND COVER OF NORTHERN TAIGA PINE FORESTS UNDER AEROTECHNOGENIC POLLUTION

I. V. Lyanguzova^{a, #}, A. I. Belyaeva^a, M. N. Kataeva^a, and E. N. Volkova^a

^aV. L. Komarov Botanical Institute of RAS
Prof. Popov Str., 2, St. Petersburg, 197022, Russia

[#]e-mail: ilyanguzova@binran.ru

The paper presents the results of studying the distribution of stocks of potentially toxic elements (Ni, Cu) in subcrown spaces and “windows” of stands in medium-aged pine forests in the background area of the Kola Peninsula and that under environmental pollution by atmospheric emissions of the Severonickel Combine (Monchegorsk, Murmansk Region). On the basis of previously obtained data on the stocks of aboveground biomass of the components of the ground cover, mortmass of plant debris and forest litter and data of chemical analysis by means of atomic absorption spectrometry of leaves of dominant shrub species, aboveground parts of the moss *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt, and lichen *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězda, as well as plant waste and organogenic horizon (forest litter) of Al-Fe-humus podzols, Ni and Cu stocks in different components of forest ecosystems were calculated. It was found that the sharp decrease in atmospheric emissions by the Severonickel Combine over the last 20 years has not affected the level of habitat contamination, and the stock of heavy metals in the upper organogenic horizon of Al-Fe-humus podzols remains very high, especially in the impact zone, which does not even allow to start the process of restoration of the ground cover in this area. The stock of heavy metals in the plant waste consistently increases with the increase in the level of forest litter contamination when approaching the source of pollution, but the scale of this increase is significantly smaller in the mortmass compared to the litter. The pattern of distribution of heavy metal stocks in components of ground cover, plant waste and forest litter over the phytocenosis area is fundamentally different in background conditions and under aerotechnogenic pollution, which is due to differences in the accumulation of organic matter in different types of microsites. The ratio of Ni : Cu concentrations and stocks also differs in the soil-vegetation cover in pine forests of the background area and under the influence of aerotechnogenic pollution.

Keywords: pine forests, ground cover, biomass stock, mortmass, forest litter, plant waste, northern taiga, heavy metals, aerotechnogenic pollution, Murmansk Region

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their gratitude to P.A. Primak and F.S. Salikhova for their assistance during fieldwork.

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 № 121032500047-1 “Vegetation of European Russia and Northern Asia: diversity, dynamics, principles of organization”.

REFERENCES

- Ayras M., Kashulina G. 2000. Regional patterns of element contents in the organic horizon of podzols in the central part of the Barents region (Finland, Norway and Russia), with special reference to heavy metals (Co, Cr, Fe, Ni, Pb, V and Zn) and sulphur as indicators of airborne pollution. — Journal of Geochemical Exploration. 68: 127–144.
- 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.).
- Classification and diagnostic of soils of Russia. 2004. Smolensk. 342 p. (In Russ.).
- Demakov Yu.P., Isaev A.V., Sharafutdinov R.N. 2017. Forest cover role in pine forests of Mari trans-Volga region and variability of soil cover parameters. — Nauchnyye Trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika “Bolshaya Kokshaga”. 8: 15–43 (In Russ.).
- Dynamics of forest communities in the Nord-West of Russia. 2009. St. Petersburg. 276 p. (In Russ.).
- Ershov V.V., Lukina N.V., Orlova M.A., Zukert N.V. 2016. Dynamics of snowmelt water composition in conifer forests exposed to airborne industrial pollution. — Rus. J. Ecol. 47 (1): 46–52.

- Ershov V.V., Isaeva L.G., Sukhareva T.A., Lukina N.V., Danilova M.A., Smirnov V.E. 2020. Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the Northern tree line subject to air pollution. — *Russ. J. Ecol.* 51 (4): 319–328.
<https://doi.org/10.1134/S1067413620040050>
- Jones C.G., Lawton J.H., Shachak M. 1994. Organisms as ecosystem engineers. — *Oikos*. 69 (3): 373–386.
- Ivanova E.A., Lukina N.V. 2017. Variation of mass and fraction composition of tree litter in dwarf shrub-lichen pine forests under aerial technogenic pollution. — *Russian Journal of Forest Science*. 5: 47–58 (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0024114817050059>
- Ivanova E.A., Lukina N.V., Danilova M.A., Artemkina N.A., Smirnov V.E., Ershov V.V., Isaeva L.G. 2019. The effect of air pollution on the decomposition of plant litter at the Northern limit of pine forests. — *Russian Journal of Forest Science*. 6: 533–546.
<https://doi.org/10.1134/S0024114819060044>
- Karpachevsky L.O. 1981. Forest and forest soils. Moscow. 264 p.
- Karpachevsky L.O. 1983. The litter is a special biobiosphere of the forest biogeocenosis. — In: *The role of litter in forest biogeocenoses*. Moscow. P. 88–89.
- Karpachevsky L.O., Zubkova T.A., Tashnina L.N., Rudenko R.N. 2007. Soil cover and parcel structure of forest biogeocenosis. — *Russian Journal of Forest Science*. 6: 107–113.
- Kashulina G., de Caritat P., Reimann C. 2014. Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis. — *Atmospheric Environ.* 89: 672–682.
- 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>
- Klimenko D.E., Ostakhova A.L. 2020. Modeling rainfall losses in the crowns of coniferous stands. — *Russian Journal of Forest Science*. 4: 335–345.
- Kozlov M., Zvereva E. 2007. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. — *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 6: 231–259.
- Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. 2009. Impacts of point polluters on terrestrial biota. Dordrecht, Heidelberg, London, New-York. 466 p.
- 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.).
- Lukina N.V., Orlova M.A., Smirnov V.E., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Belova E.A. 2017. Mass-Loss Rates from Decomposition of Plant Residues in Spruce Forests Near the Northern Tree Line Subject to Strong Air Pollution. — *Environmental Science and Pollution Research*. 24 (24): 19874–19887.
- 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>
- Lyanguzova I.V. 2016. Heavy metals in the Northern taiga ecosystems in Russia. Saabruken (Germany). 260 p.
- Lyanguzova I.V. 2017. Dynamic Trends of Heavy Metal Contents in Plants and Soil under Different Industrial Air Pollution Regimes. — *Russ. J. Ecol.* 48 (4): 250–260 (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0367059717040114>
- Lyanguzova I.V. 2021. Airborne Heavy Metal Pollution and its Effects on Biomass of Ground Vegetation, Foliar Elemental Composition and Metabolic Profiling of Forest Plants in the Kola Peninsula (Russia). — *Russian Journal of Plant Physiology*. 68 (Suppl. 1): S140–S149.
- 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., Katjutin P. 2023. Effects of High and Low Aerotechnogenic Emissions of heavy Metals on Wild Plants. — *Forests*. 14 (8): N article 1650.
- Lyanguzova I., Yarmishko V., Gorshkov V., Stavrova N., Bakka I. 2018. Impact of heavy metals on forest ecosystems of the European North of Russia. — In: *Heavy Metals*. London. P. 91.
- Methods for studying forest ecosystems. 2002. St. Petersburg. 240 p. (In Russ.).
- Munn R.E. 1973. Global Environmental Monitoring System (GEMS). — SCOPE, Report 3. Toronto: ICSU-SCOPE. 130 p.
- Myking T., Aarrestad P.A., Derome J. et al. 2009. Effects of air pollution from a nickel-copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian–Norwegian–Finnish border area. — *Boreal Environ. Res.* 14: 279–291.
- 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>
- 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.).
- Salemaa M., Vanha-Majamaa I., Derome J. 2001. Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. — *Environmental Pollution*. 112(3): 339.
- Salemaa M., Derome J., Helmisaari H.-S., Nieminen T., Vanha-Majamaa I. 2004. Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland. — *Sci. Total Environ*. 324: 141–160.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D. 2020. Assessment of intra biogeocenotic 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>
- Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G. 2017. The features of litters in connection of ground layer in Moscow outside (“Chashnikovo” station). — *Moscow University Soil Science Bulletin*. 4: 11–20.
- 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.).
- Vorobeychik E.L. 1995. Changes in the thickness of forest litter under conditions of chemical pollution. — *Russ. J. Ecol*. 4: 278–284.
- Vorobeychik E.L. 2002. Changes in the spatial structure of the destruction process in the conditions of atmospheric pollution of forest ecosystems. — *Biology Bulletin. Ser. Biol*. 3: 368–379 (In Russ.).
- 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., 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.
- 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.
- Zvereva E., Roitto M., Kozlov M. 2010. Growth and reproduction of vascular plants in polluted environments: a synthesis of existing knowledge. — *Environ. Rev*. 18: 355–367.