

УДК 504.5:581.52:630*424.5

МИГРАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОЧВЫ В РАСТЕНИЯ И ЛИШАЙНИКИ В УСЛОВИЯХ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

© 2020 г. И. В. Лянгузова^{a, *}, М. С. Бондаренко^a, А. И. Беляева^a, М. Н. Катаева^a,
В. Ш. Баркан^b, А. Ю. Лянгузов^c

^aБотанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Россия 197376 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2

^bЛапландский государственный биосферный заповедник, Россия 184506 Мончегорск, ул. Зеленая, 8

^cСанкт-Петербургский государственный университет,
Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

*e-mail: Pyanguzova@binran.ru

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.

После доработки 13.05.2020 г.

Принята к публикации 25.05.2020 г.

В полевом эксперименте изучали миграцию Ni, Cu, Co из загрязненного тяжелыми металлами (ТМ) органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов в доминирующие виды кустарничков, мхов и лишайников, формирующих напочвенный покров средневозрастных сосновых лесов. Проверяли гипотезы: 1) внесение металлургической пыли вызывает разрушение напочвенного покрова даже при отсутствии диоксида серы; 2) разрушение напочвенного покрова обусловлено высокими концентрациями ТМ в надземных органах растений и лишайников, приводящими к их отмиранию; 3) уровень накопления ТМ разными таксонами прямо связан со стратегией минерального питания. Содержание Ni, Cu, Co в органогенном горизонте подзолов и в ассимилирующих органах доминирующих видов кустарничков, мхов и лишайников определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Выявлена высокая внутри- и межценотическая вариабельность уровня загрязнения ТМ органогенного горизонта почв, что вызвало пространственно неоднородное разрушение напочвенного покрова. Транслокация ТМ из загрязненной почвы в надземные части растений и лишайников приводит к 1.5–5-кратному увеличению содержания ТМ во всех видах, что не превышает порога токсичности и не препятствует их произрастанию на экспериментальных площадях. Пятилетнее внесение металлургической пыли привело к уровню загрязнения органогенного горизонта почв, сопоставимому с таковым в буферной зоне комбината «Североникель». Это позволило сравнить содержание ТМ в растениях и лишайниках в условиях почвенного и аэротехногенного загрязнения и выявить особенности накопления ТМ организмами с разной стратегией минерального питания. Соотношение концентраций Ni < Cu в органогенном горизонте почвы изменяется на обратное в листьях кустарничков, зеленых и бурых частях мха *Pleurozium schreberi* как при почвенном, так и аэротехногенном загрязнении.

Ключевые слова: сосновые леса, напочвенный покров, северная тайга, Мурманская область, тяжелые металлы, загрязнение окружающей среды

DOI: 10.31857/S0367059720060050

В конце 1970-х годов в странах Европы и США наблюдалось массовое усыхание хвойных лесов, и многие исследователи пришли к выводу, что основная причина этого явления — воздействие атмосферного промышленного загрязнения, особенно диоксида серы и кислотных дождей, в наибольшей мере оказывающих негативное влияние на леса северного полушария. В связи с этим такие исследования стали очень активно развиваться как в лабораторных условиях, так и в природных растительных сообществах [1–6]. К настоящему времени негативные последствия воздействия атмосферо-

го промышленного загрязнения на наземные экосистемы в окрестностях предприятий цветной металлургии хорошо известны. Многолетнее воздействие загрязняющих веществ на лесные экосистемы привело к трансформации их состава, структуры, продуктивности, изменению минерального состава растений, а также накоплению тяжелых металлов (ТМ) в почвах и растениях.

Однако, как хорошо известно, атмосферные выбросы промышленных предприятий представляют собой сложные смеси различных по химическому составу газов и твердых пылевых частиц,

которые могут оказывать синергическое, аддитивное или антагонистическое действие на растения. Различия в химическом составе загрязнителей, их концентрации, длительности воздействий вызывают неодинаковые ответные реакции растений, при этом их внешнее отображение часто неспецифично (или недостаточно специфично), поэтому без специальных химических анализов не всегда возможно отличить влияние одного загрязнителя от другого. Из этого следует, что в условиях аэротехногенного загрязнения окружающей среды при одновременном воздействии газообразных и твердых поллютантов на наземные экосистемы невозможно разделить токсическое действие диоксида серы и тяжелых металлов (ТМ) на различные компоненты биогеоценозов. Наиболее адекватным подходом для решения указанной проблемы является постановка полевых экспериментов, которые позволяют смоделировать в природных условиях влияние металлургической пыли на наземные экосистемы без сопутствующего воздействия сернистого ангидрида.

Цель настоящего исследования – оценка транслокации ТМ из загрязненных техногенными соединениями Ni, Cu, Co Al-Fe-гумусовых подзолов в доминирующие виды напочвенного покрова средневозрастных северотаежных сосновых лесов в условиях полевого эксперимента. Проверляли несколько гипотез.

Первая – внесение полиметаллической пыли, выбрасываемой в атмосферу комбинатом “Североникель”, вызывает разрушение напочвенного покрова даже при отсутствии токсического воздействия диоксида серы. В ряде работ [5–11] было показано, что повышенное содержание ТМ в почве вызывает хлороз и некроз листьев растений, снижает скорость роста, особенно корневых систем, сокращает прирост биомассы и может служить причиной гибели растений. Поэтому логично предположить, что трансформация состава, структуры и продуктивности лесных экосистем при аэротехногенном загрязнении обусловлена не только воздействием газообразных ингредиентов выбросов, в частности сернистого ангидрида, но сопровождается и негативными последствиями накопления ТМ в почвах.

Вторая – разрушение напочвенного покрова обусловлено высокими концентрациями ТМ в надземных органах растений и лишайников, приводящими к их отмиранию. Гипотеза базируется на известных фактах влияния повышенных доз ТМ в субстрате на ответную реакцию растительных организмов [12, 13]. Повышенные дозы ТМ в среде ингибируют фотосинтез, нарушают транспорт ассимилятов и элементов минерального питания, изменяют водный и гормональный статус растительного организма, а также тормозят его

рост, что в конечном итоге может привести к гибели растения.

Третья – уровень накопления ТМ разными таксонами напрямую связан со стратегией минерального питания. Гипотеза базируется на предположении, что мхи и лишайники, для которых характерно поступление минеральных веществ преимущественно из атмосферы, в условиях полевого эксперимента будут накапливать ТМ меньше по сравнению с высшими растениями, которые поглощают минеральные вещества, в том числе ТМ, из почвы. Именно способность мхов и лишайников накапливать поллютанты из воздуха, как известно, и лежит в основе лишайно- и бриоиндикации загрязнения окружающей среды.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для оценки воздействия полиметаллической пыли, выбрасываемой в атмосферу комбинатом “Североникель” (г. Мончегорск), на северотаежные лесные экосистемы в 1992 г. в фоновом районе Кольского полуострова, где отсутствуют признаки повреждения растений диоксидом серы, был заложен полевой эксперимент по искусственному загрязнению окружающей среды ТМ. Перед началом эксперимента на выбранных участках были проведены учет и маркировка всех деревьев с фиксацией высоты, диаметра, жизненного состояния, геоботаническое описание напочвенной растительности всех ярусов, а также описание и учет эпифитных лишайников.

Фоновый район Кольского полуострова, где был заложен полевой эксперимент, расположен в среднем течении р. Ливы на расстоянии 80 км от источника аэротехногенного загрязнения – комбината “Североникель” (г. Мончегорск). В сосновых лесах с разной степенью повреждения древостоя последним пожаром, но имеющих одинаковую давность последнего пожара (на данный момент времени 90 лет), были выбраны четыре однородных участка, каждый из которых был разделен пополам на контрольную и экспериментальную пробные площади (ПП). Все исследуемые сосновые леса произрастают на Al-Fe-гумусовых подзолах (Albic Rustic Podzols, согласно WRB). Характеристики древостоев сосны и напочвенного покрова исследуемых участков на начало полевого эксперимента приведены в табл. 1, 2. Размеры контрольных и экспериментальных ПП в зависимости от плотности древостоя сосны варьировали в пределах 0.06–0.15 га (табл. 3). Все пробные площади закладывали с таким расчетом, чтобы на каждой ПП было не менее 200 взрослых деревьев сосны. Изначально экспериментальные ПП закладывали как повторности, однако, как показали дальнейшие исследования, не всегда их можно рассматривать в таком качестве.

Таблица 1. Таксационная характеристика древесного яруса сосновых лесов на исследуемых участках на начало эксперимента (по данным [23])

Сообщество (№ ПП)	Степень повреждения древостоя пожаром, %	Компонент*	Состав**	Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр на высоте 1.3 м, см	Плотность, экз/га	Сумма площадей сечений, м ² /га
Сосняк лишайниково-зеленомошный (ПП1)	98	II	93С7Б ²	40–65	8.7	11.6	935	10.0
Сосняк лишайниковый (ПП2)	15	I	100С	240–330	15.4	28.0	195	12.9
		II	100С	55–65	7.5	11.7	88	
Сосняк лишайниковый (ПП3)	67	I	100С	335	18.2	46.5	26	13.2
		II	96С4Б	50–65	10.0	9.0	1375	
Сосняк лишайниковый (ПП4)	86	I	100С	240–330	15.0	37.0	11	8.3
		II	98С2Б	30–65	8.5	13.0	527	

* I – деревья, выросшие до последнего пожара, II – послепожарные особи высотой более 1.3 м; ** С – сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., Б – береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh.

Таблица 2. Проективное покрытие (%) травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов и доминирующих видов на исследуемых участках на начало эксперимента (по данным [23])

Ярус, вид	Проективное покрытие, %			
	сосняк лишайниково-зеленомошный		сосняк лишайниковый	
	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4
Травяно-кустарничковый ярус	17.2	15.6	10.5	14.4
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	5.0	2.9	4.6	3.2
<i>V. myrtillus</i>	0.9	1.6	0.1	0.2
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	0.3	0.5	3.9	0.3
<i>Calluna vulgaris</i>	10.3	10.5	0.9	9.7
Мохово-лишайниковый ярус	70.9	88.2	89.0	77.5
<i>Cladonia stellaris</i>	2.2	3.5	4.3	9.2
<i>Cl. rangiferina</i>	11.7	21.4	15.5	8.8
<i>Cl. mitis</i>	34.4	52.9	45.9	39.6
<i>Cl. uncialis</i>	7.1	7.7	13.4	8.4
<i>Pleurozium schreberi</i>	6.9	0.4	1.5	0.9

На момент закладки полевого эксперимента было известно, что максимальное валовое содержание Ni и Cu в лесной подстилке импактной зоны комбината “Североникель” составляло 6700 и 3350 мг/кг соответственно. Для достижения такого уровня накопления ТМ в органогенном горизонте почв полевого эксперимента необходимо было в течение 10 лет вносить ежегодно по 10 кг полиметаллической пыли на 1 га, однако пыль вносили ежегодно лишь в течение 5 лет (см. табл. 3). За период 1992–1997 гг. на поверхность снежного покрова экспериментальных ПП вручную было рассыпано на ПП1 – 563, на ПП2 – 352, на ПП3 – 433, на ПП4 – 404 кг/га полиметаллической пыли,

отобранной с электрофильтров цеха рудной плавки комбината “Североникель”. В состав пыли, использованной для рассыпания на экспериментальных ПП, входили, %: Ni – 1.3–2.1, Cu – 1.3–1.8, Co – 0.06–0.09, Fe – 11.2–13.0, Si – 14.1–17.6, Ca – 1.0–2.3, Mg – 2.3–5.1, Zn – 0.8–1.4, Al – 1.3–3.8, Pb – 0.015–0.35, Cr – 0.08, As – 0.1–0.33, Se – 0.03, V – 0.003, Mn – 0.07, W – 0.05, Ti – 0.05–0.16, Mo – 0.03, Cd – 0.02 [14, 15].

Рассыпание полиметаллической пыли на экспериментальных ПП привело к пространственно очень неравномерному разрушению напочвенного покрова. В течение 2013–2016 гг. каждый год на одной экспериментальной ПП было заложено по

Таблица 3. Характеристика экспериментальных пробных площадей

Сообщество (№ ПП)	Координаты	Размер ПП, га	Внесено пыли, кг				
			1992 г.	1993 г.	1994 г.	1996 г.	1997 г.
Сосняк лишайниково-зелено-мошный (ПП1)	67°51'00"N 31°24'00"E	0.06	–	6.8	13	5	9
Сосняк лишайниковый (ПП2)	67°51'30"N 31°24'30"E	0.15	12	10.3	14	9	7.5
Сосняк лишайниковый (ПП3)	67°51'00"N 31°24'30"E	0.1	10	6.8	12.5	5	9
Сосняк лишайниковый (ПП4)	67°51'30"N 31°23'00"E	0.1	10	6.9	11.5	5	7

50 учетных площадок размером 50 × 50 см в местах с разной степенью нарушенности напочвенного покрова по грациям проективного покрытия кустистых лишайников рода *Cladonia*: 0–10% (максимальная степень разрушения напочвенного покрова), 10–30%, 30–60%, 60–80%, 80–100% (ненарушенный напочвенный покров), т.е. для каждой градации по 10 площадок. На каждой учетной площадке были взяты образцы наземной биомассы травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов и растительного опада, за исключением ПП3. Все образцы, кроме опада, были разобраны по видам растений и лишайников и высушены до воздушно-сухого состояния.

С каждой площадки также были отобраны образцы подстилки (органогенный горизонт – O) Al-Fe-гумусового подзола, которые растирали и просеивали через почвенное сито с диаметром отверстий 1 мм. В соответствии с принятыми методиками [16] навеску подстилки (1 г) заливали 1.0 н HCl в соотношении 1 : 25 и встряхивали взвеси на ротаторе в течение 1 ч, затем фильтровали и в фильтрате определяли содержание кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Навески листьев *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Calluna vulgaris*, *Empetrum hermaphroditum*, живых и отмирающих частей лишайников *Cladonia stellaris*, *Cl. rangiferina*, *Cl. mitis*, *Cl. uncialis*, зеленых и бурых частей мха *Pleurozium schreberi*, а также опада озоляли в муфельной печи при температуре 450°C, растворяли золу в HCl (1 : 1), затем фильтровали, разбавляли дистиллированной водой и в растворе определяли содержание Ni, Cu, Co методом атомно-абсорбционной спектроскопии. В связи с наиболее низким содержанием Co в исследуемых образцах эти данные не всегда приводятся в тексте. Химический анализ всех образцов проводили в 2–3-кратной повторности.

Математическую обработку данных проводили в статистических пакетах программ Statistica 10.0 и свободного языка программирования R с исполь-

зованием описательной статистики, ANOVA, регрессионного и корреляционного анализов. В большинстве случаев проверка распределений исследуемых параметров показывала значимое отличие от закона нормального распределения, поэтому использовали значения медианы и ее доверительных интервалов (66 и 95%), найденных с помощью модуля “bootstrap”, в остальных случаях использовали среднее арифметическое и стандартную ошибку. Значимость различий оценивали по непараметрическим критериям Краскела-Уоллиса (H), Вилкоксона (Z) и Манна-Уитни (z). На рис. 1 и 3 приведены медианы и их доверительные интервалы (66 и 95%).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание ТМ в органогенном горизонте почв.

На контрольных участках полевого эксперимента концентрации кислоторастворимых форм ТМ в органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов составляют, мг/кг: Ni – от 5 до 11, Cu – от 10 до 17, Co – от 1 до 1.3, а их среднее содержание в этом горизонте почв равно, мг/кг: Ni – 9.0 ± 0.4, Cu – 12.0 ± 0.5, Co – 1.0 ± 0.1, что соответствует региональным фоновым значениям.

В пределах каждой экспериментальной ПП содержание кислоторастворимых форм ТМ в органогенном горизонте почв варьирует в широком интервале. Например, в сосняке лишайниково-зеленомошном (ПП1) диапазон концентраций составляет: Ni – 9.4–114, Cu – 29.2–616, Co – 1.0–8.1 мг/кг, а в сосняке лишайниковом (ПП2) Ni – 14.4–534, Cu – 22.1–864, Co – 0.8–24.2 мг/кг. Иными словами, максимальные концентрации превышают минимальные в 12–37 (Ni), 21–39 (Cu) и 8–30 (Co) раз, что свидетельствует о высокой степени внутриценотического варьирования содержания ТМ в органогенном горизонте исследуемых почв. Анализ распределений содержания кислоторастворимых форм ТМ в органогенном горизонте почв экспериментальных ПП выявил значимые отличия от закона нормального рас-

пределения: значения χ^2 варьируют в пределах 47.5–155 ($p = 0.0000$), коэффициента асимметрии – 0.72–1.66, эксцесса – 0.21–4.49, поэтому использовать средние арифметические с их стандартной ошибкой некорректно.

Согласно непараметрическому критерию Краскела-Уоллиса, органогенные горизонты почв экспериментальных ПП значимо (в 1.7–2.3-кратно) различаются по содержанию ТМ ($H_{Ni} = 48.9$, $p = 0.000$; $H_{Cu} = 9.2$, $p = 0.03$; $H_{Co} = 27.5$, $p = 0.000$), что не позволяет объединить данные по отдельным ПП в одну выборку (рис. 1). Максимальные значения медиан содержания Ni и Cu отмечаются на ПП3, а минимальные – на ПП1 (Ni) и ПП4 (Cu), интервал межценотического варьирования содержания Co значительно меньше.

Содержание кислоторастворимых форм ТМ располагается в убывающем ряду: $Cu > Ni > Co$, что обусловлено, с одной стороны, химической природой различных металлов, различиями в минералогии пылевых частиц, с другой – различиями в гидротермическом режиме верхних горизонтов почв в разных типах леса, а также степенью закрепления ТМ в органоминеральных комплексах почв.

Результаты корреляционного анализа показали, что между содержанием кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co в органогенном горизонте почвы и количеством внесенной полиметаллической пыли на экспериментальные ПП связь отсутствует ($r = -0.46$ – -0.44 , $p > 0.05$), что можно объяснить достаточно узким диапазоном количества внесенной полиметаллической пыли.

В связи с тем, что полевой эксперимент не был доведен до логического завершения и полиметаллическую пыль вносили лишь в течение 5 лет, уровень загрязнения ТМ органогенного горизонта почв экспериментальных ПП оказался сопоставим с наблюдаемым в буферной зоне, расположенной в 30 км от комбината “Североникель”. За весь период исследования (1981–2017 гг.) на этой территории средние значения содержания ТМ в органогенном горизонте почв равны для Ni – 88 ± 5 , для Cu – 170 ± 6 мг/кг, а интервал варьирования составляет соответственно 42–195 и 34–540 мг/кг (рис. 2).

Содержание ТМ в опаде. Интервал внутриценотического варьирования концентраций ТМ в растительном опаде так же широк, как и в органогенном горизонте почв. Например, в пределах сосняка лишайниково-зеленомошного (ПП1) содержание ТМ варьирует: Ni – 1.7–57, Cu – 6–127, Co – 0.5–6.0 мг/кг, а в лишайниковом сосняке (ПП2) этот интервал составляет соответственно 4–258, 5–495 и 0.2–18 мг/кг, что свидетельствует о высокой степени внутриценотического варьирования. Проверка на нормальность распределения показала значимые отличия содержания ТМ

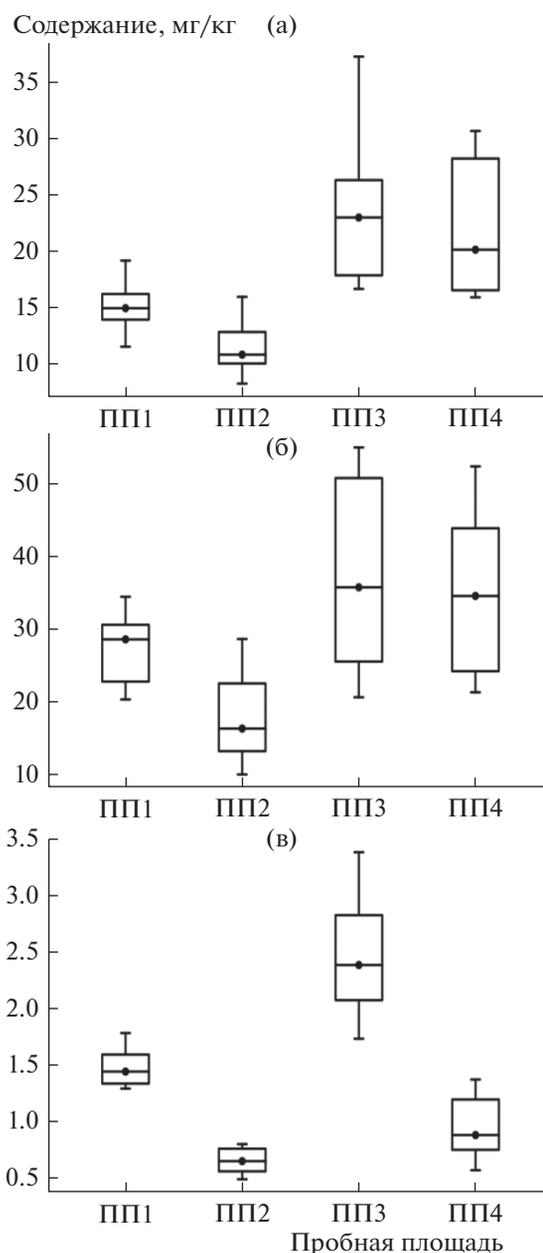


Рис. 1. Содержание кислоторастворимых форм Ni (а), Cu (б), Co (в) в органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов экспериментальных пробных площадей.

в опаде от нормального закона, поэтому на рис. 3 приведены медианы и их доверительные интервалы. Согласно критерию Краскела-Уоллиса, все экспериментальные ПП значимо различаются по содержанию Ni и Co в растительном опаде ($H_{Ni} = 19.9$, $p = 0.000$; $H_{Co} = 41.2$, $p = 0.000$), что не позволяет объединить данные по отдельным экспериментальным ПП в одну выборку, а содержание Cu значимо не различается ($H_{Cu} = 6.8$, $p = 0.08$).

Оценка транслокации ТМ из загрязненной лесной подстилки в растительный опад показала,

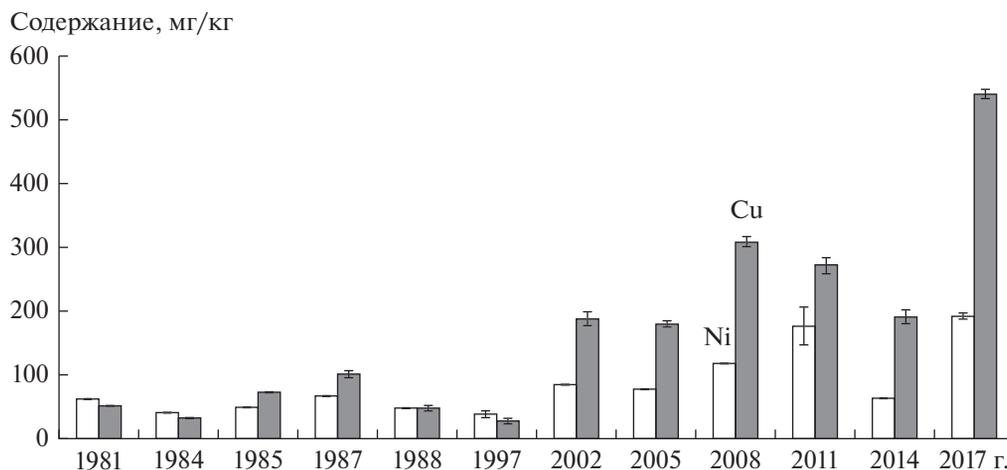


Рис. 2. Динамика содержания кислоторастворимых форм Ni и Cu в органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов сосняков лишайниково-зеленомошных в буферной зоне комбината “Североникель”.

что на всех экспериментальных ПП соотношение концентраций ТМ в органогенном горизонте почв и опаде варьирует в довольно узком интервале. Содержание Ni в опаде составляет лишь 14–20%, а Cu – 19–33% от содержания их кислоторастворимых форм в органогенном горизонте почвы, что может свидетельствовать об одинаковых закономерностях перехода ТМ из почвы в растительный опад. Подтверждение этому предположению мы получили в результате корреляционного анализа. Во всех исследуемых сообществах сосновых лесов выявлена тесная связь между концентрациями ТМ в органогенном горизонте почв и растительном опаде ($r_{Ni} = 0.64–0.90$, $r_{Cu} = 0.65–0.81$, $r_{Co} = 0.72–0.88$, $p < 0.05$). Концентрации ТМ в опаде убывают в том же порядке, что и в органогенном горизонте почв: $Cu > Ni > Co$.

Содержание ТМ в листьях кустарничков. На контрольных участках полевого эксперимента содержание ТМ в листьях растений травяно-кустарничкового яруса (*Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Calluna vulgaris*, *Empetrum hermaphroditum*) варьирует в узком интервале и в среднем составляет для Ni – 1.7 ± 0.1 , для Cu – 3.0 ± 0.1 мг/кг, что находится в пределах региональных фоновых значений [7, 17, 18], а содержание Co часто меньше предела его обнаружения. Содержание ТМ в ассимиляционных органах кустарничков значимо не различается в зависимости от их видовой принадлежности ($H = 5.3–6.8$, $p > 0.05$), но на всех контрольных участках содержание Cu всегда выше содержания Ni (табл. 4), что неудивительно, так как Cu является микроэлементом, необходимым для жизнедеятельности растений.

Дисперсионный анализ данных по критерию Краскела-Уоллиса не выявил значимых различий в средних концентрациях ТМ в листьях всех исследуемых видов кустарничков между экспери-

ментальными ПП, поэтому в табл. 4 приведены средние величины содержания ТМ в листьях кустарничков, которые лишь в 1.5–4 раза больше их фоновых значений. Значимо бóльшим накоплением Ni ($H = 46.4$, $p = 0.000$) отличаются листья *Empetrum hermaphroditum* и *Calluna vulgaris* по сравнению с их концентрацией в листьях других исследуемых кустарничков. Диапазон варьирования содержания ТМ в листьях исследуемых кустарничков довольно узкий (см. табл. 4), причем концентрации Ni значимо больше, чем Cu ($z = 2.21–3.48$, $p = 0.01–0.03$). Корреляционный анализ данных показал, что значимая связь между содержанием ТМ в листьях кустарничков и органогенном горизонте почвы выявляется не всегда: в большинстве случаев она регистрируется только для Ni, при этом коэффициенты корреляции не превышают 0.65.

При современных объемах атмосферных выбросов комбинатом “Североникель” содержание Cu в листьях исследуемых видов кустарничков на территории буферной зоны приближается к фоновым значениям (см. табл. 4), в то время как содержание Ni остается в 5–6 раз больше его фоновой величины, причем повышенным накоплением ТМ отличаются листья *Empetrum hermaphroditum*.

Содержание ТМ в лишайниках и мхах. На контрольных участках ПП интервал варьирования содержания Ni и Cu в живых частях талломов 4 доминирующих видов лишайников (*Cladonia stellaris*, *Cl. rangiferina*, *Cl. mitis*, *Cl. uncialis*) достаточно узок (см. табл. 4), и средние концентрации ТМ находятся в пределах региональных фоновых значений [7, 17, 19]. На всех экспериментальных ПП интервал варьирования содержания ТМ в исследуемых видах лишайников достаточно широк: максимальные значения превышают минимальные соответственно для Ni в 15, для Cu – в 32, для

Со – в 5 раз, что обусловлено пространственной неоднородностью уровня почвенного загрязнения ТМ. Однако среднее содержание ТМ в живых частях всех исследуемых видов лишайников не более чем в 2 раза выше, чем в лишайниках контрольных ПП, и соотношение концентраций Ni : Cu сохраняется таким же, как в контроле. Видовая специфичность в накоплении ТМ доминирующими видами лишайников не выявлена, так как, согласно критерию Краскела-Уоллиса, отсутствуют значимые различия в уровне накопления ТМ живыми частями лишайников исследуемых видов как на контрольных участках, так и на экспериментальных ПП ($H_{Ni} = 4.8-6.1, p > 0.05$; $H_{Cu} = 2.9-3.6, p > 0.05$). В отмирающих частях слоевищ *Cl. stellaris* содержание ТМ в среднем в 2.5 раза превышает уровень их накопления живыми частями талломов, при этом соотношение концентраций Ni и Cu близко к 1 (см. табл. 4). Корреляционный анализ данных содержания ТМ в живых частях лишайников и органогенном горизонте почвы выявил значимые связи между этими параметрами в большинстве случаев ($r_{Ni} = 0.35-0.69, p < 0.05$; $r_{Cu} = 0.35-0.78, p < 0.05$). Таким образом, в условиях полевого эксперимента несущественное возрастание концентраций Ni и Cu в живых частях лишайников свидетельствует о незначительной миграции ТМ из загрязненной почвы в слоевища лишайников и минимальном контакте живых частей лишайников с загрязненной почвой.

В сосновых лесах лишайникового типа как контрольных, так и экспериментальных ПП моховой покров представлен небольшими куртинами мхов, поэтому химический анализ доминирующего в моховом покрове вида *Pleurozium schreberi* проводили только в сосняке лишайниково-зеленомошном (ПП1). На контрольном участке ПП1 содержание ТМ в зеленых частях *Pl. schreberi* сопоставимо с их содержанием в доминирующих видах лишайников (см. табл. 4). На экспериментальной части ПП1 содержание ТМ во мхе варьирует в нешироком диапазоне и в 2–6 раз превышает их количество в зеленых частях мха контрольной ПП1. Значимое 1.5-кратное превышение содержания Ni, Cu, Со в бурых частях мха *Pl. schreberi* по сравнению с его зелеными частями выявлено по критерию Манна-Уитни ($z = 2.0-2.9, p = 0.003-0.04$), что вполне логично, так как бурые части более плотно контактируют с загрязненной подстилкой по сравнению с зелеными частями мха. Корреляционный анализ данных выявил достаточно тесную связь между содержанием ТМ в зеленых и бурых частях мха с концентрациями их кислоторастворимых форм в органогенном горизонте почвы ($r_{Ni} = 0.59-0.67, p = 0.001-0.03$; $r_{Cu} = 0.61-0.73, p = 0.000-0.01$). Согласно литературным данным [7, 17, 20], фоновые концентрации ТМ в зеленых мхах

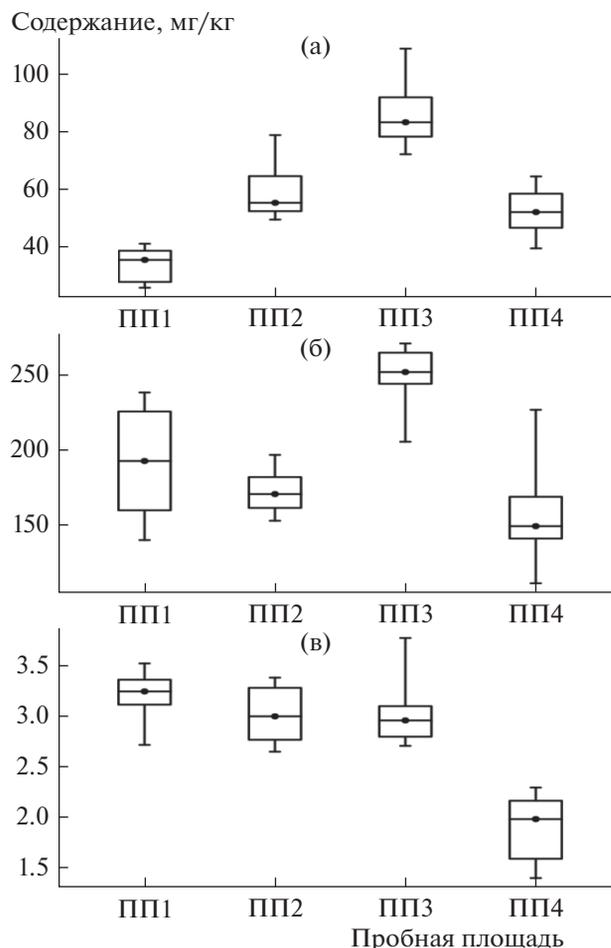


Рис. 3. Содержание Ni (а), Cu (б), Со (в) в растительном опаде на экспериментальных пробных площадях.

Мурманской области варьируют в достаточно широком диапазоне: Ni – 17–33, Cu – 6–32 мг/кг. В условиях полевого эксперимента содержание ТМ даже в бурых частях мха *Pl. schreberi* не превышает их фоновое содержание (см. табл. 4).

Соотношение концентраций Ni : Cu в талломах всех исследуемых видов лишайников как контрольных, так и экспериментальных ПП сохраняется примерно равным 1 (см. табл. 4), в то время как в зеленых и бурых частях мха содержание Ni в среднем в 2 раза больше, чем Cu, что связано с большей скоростью миграции ионов Ni^{+2} по сравнению с ионами Cu^{+2} из загрязненной почвы в надземные части растений [10, 21].

Принципиально иная картина наблюдается при аэротехногенном загрязнении окружающей среды (см. табл. 4). Средние концентрации Ni и Cu в живых частях доминирующих видов лишайников превышают фоновые значения соответственно в 13–36 и 5–35 раз, а в зеленых частях мха *Pl. schreberi* – в 27 и 12 раз соответственно. В 2011 г. при сниженных объемах атмосферных выбросов

Таблица 4. Среднее содержание (мг/кг) тяжелых металлов в кустарничках (листья), мхах и лишайниках на контрольных и экспериментальных пробных площадях и на территории буферной зоны комбината “Североникель”

Вид	Контрольные ПП		Экспериментальные ПП		Буферная зона	
	Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	1.2 ± 0.1	2.5 ± 0.1	4.8 ± 0.2 (1.3–7.8)*	3.8 ± 0.2 (1.6–5.9)	7.6 ± 0.5	3.5 ± 0.1
<i>V. myrtillus</i>	1.4 ± 0.1	3.5 ± 0.1	3.6 ± 0.3 (1.5–9.6)	4.4 ± 0.4 (1.4–15.0)	8.0 ± 0.5	3.4 ± 0.1
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	2.5 ± 0.1	3.8 ± 0.1	9.8 ± 0.4 (5.0–14.7)	3.4 ± 0.3 (2.1–5.8)	13.2 ± 0.6	6.0 ± 0.2
<i>Calluna vulgaris</i>	1.8 ± 0.1	2.4 ± 0.1	7.7 ± 0.3 (2.4–13.7)	4.0 ± 0.2 (1.8–12.6)	н.д.	н.д.
<i>Cladonia stellaris</i> , живая часть	2.0 ± 0.2	2.1 ± 0.1	2.5 ± 0.1 (1.1–11.8)	2.3 ± 0.1 (1.2–6.4)	48 ± 2	35 ± 1
<i>Cl. stellaris</i> , отмирающая часть	н.д.	н.д.	6.5 ± 1.4 (4.7–13.7)	5.8 ± 1.7 (3.4–14.3)	н.д.	н.д.
<i>Cl. rangiferina</i> , живая часть	1.8 ± 0.1	1.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1 (1.2–9.2)	2.3 ± 0.1 (0.8–14.7)	50 ± 2	10 ± 2
<i>Cl. mitis</i> , живая часть	2.7 ± 0.1	1.5 ± 0.1	2.8 ± 0.1 (0.9–9.4)	2.3 ± 0.1 (1.1–11.4)	35 ± 4	24 ± 1
<i>Cl. uncialis</i> , живая часть	1.4 ± 0.3	1.7 ± 0.1	2.4 ± 0.2 (0.8–6.3)	2.5 ± 0.2 (0.9–8.2)	44 ± 1	31 ± 2
<i>Pleurozium schreberi</i> , зеленая часть	2.0 ± 0.1	3.2 ± 0.2	11.4 ± 0.7 (5.9–27.9)	6.1 ± 0.4 (3.8–15.8)	54 ± 3	40 ± 2
<i>Pl. schreberi</i> , бурая часть	н.д.	н.д.	16.6 ± 1.0 (8.9–26.7)	7.3 ± 1.0 (4.9–12.0)	н.д.	н.д.

Примечание.* Пределы варьирования; н.д. – нет данных.

комбината “Североникель” содержание ТМ в талломах лишайников *Cladonia stellaris*, *Cl. rangiferina*, *Cl. mitis*, *Cl. uncialis* на территории буферной зоны варьировало для Ni в пределах 20–70 мг/кг, для Cu – 10–35 мг/кг [19, 22], а в зеленых частях мха *Pl. schreberi* для Ni – 31–68 мг/кг, для Cu – 29–47 мг/кг [23]. Соотношение концентраций ТМ сдвинуто в сторону превышения Ni над Cu, что обусловлено составом атмосферных выбросов комбината “Североникель”.

Сопоставление уровней накопления ТМ напочвенными лишайниками и мхами в условиях почвенного и аэротехногенного загрязнения показало, что даже максимальные концентрации Ni и Cu, накапливаемые талломами в первом случае, составляют лишь 10–15% от их содержания в слоевищах лишайников из буферной зоны. В полевом эксперименте средние значения концентраций ТМ в *Pl. schreberi* не превышают 15–20% от их количества в зеленых частях мха из буферной зоны.

Связь степени разрушения напочвенного покрова с содержанием ТМ в лесной подстилке. На рис. 4 представлены данные о содержании ТМ в органо-генном горизонте почвы в местах с разной степенью нарушения напочвенного покрова на

ПП4. Даже при отсутствии нарушения напочвенного покрова (проективное покрытие лишайников р. *Cladonia* 80–100%) концентрации ТМ в органо-генном горизонте почвы превышают их фоновое содержание в 2–10 раз, а при максимальной степени разрушения (проективное покрытие лишайников 0–10%) это превышение составляет 35–60 раз. Корреляционный анализ данных выявил значимую связь содержания кислоторастворимых форм Ni и Cu в органо-генном горизонте подзолов со степенью нарушения напочвенного покрова сосновых лесов лишайникового типа ($r_{Ni} = -0.64-72$, $r_{Cu} = -0.64-79$, $p < 0.05$). Однако в сосняке лишайниково-зеленомошном (ПП1) корреляция между указанными параметрами очень слабая ($r = -0.27-0.30$, $p < 0.05$), что, по-видимому, объясняется более благоприятным гидротермическим режимом почвы на ПП1 по сравнению с более сухими лишайниковыми сосновыми лесами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пространственная неоднородность уровня загрязнения почв экспериментальных ПП. Изначально мы предполагали, что при таком узком диапа-

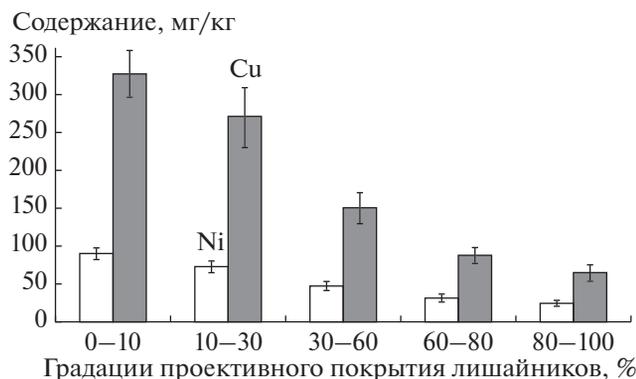


Рис. 4. Изменение содержания кислоторастворимых форм Ni и Cu в органогенном горизонте подзолов в зависимости от степени нарушенности напочвенного покрова сосняка лишайникового на экспериментальной ПП4.

зоне внесенных доз полиметаллической пыли в однотипные почвы пространственное варьирование уровня загрязнения будет незначительным. Однако результаты проведенного исследования показывают, что процесс трансформации полиметаллической пыли происходит неодинаково как в разных типах растительных сообществ, так и внутри биогеоценоза, что приводит к высокой степени мозаичности уровня загрязнения почвы.

Внутриценотическая вариабельность содержания ТМ в органогенном горизонте почв, скорее всего, обусловлена методикой постановки эксперимента. Во-первых, при рассыпании полиметаллической пыли по снежному покрову вручную очень трудно достичь равномерного ее распределения по площади биогеоценоза. Во-вторых, при весеннем таянии снега происходит перемещение полиметаллической пыли талыми водами, и в микропонижениях скапливается больше твердых частиц по сравнению с микроповышениями.

Межценотическая вариабельность уровня загрязнения органогенного горизонта почв экспериментальных ПП может быть обусловлена несколькими причинами. Во-первых, разной типологической принадлежностью сосновых лесов. Как отмечалось выше, связь степени разрушения напочвенного покрова с уровнем загрязнения почвы выражена слабее в сосняке лишайниково-зеленомошном по сравнению с лишайниковым типом сосняков. Во-вторых, все исследования проводились не одновременно, а в течение 4 лет (2013–2016 гг.). Многолетний мониторинг содержания кислоторастворимых форм ТМ в органогенном горизонте подзолов в буферной зоне показал, с одной стороны, высокую степень его варьирования в разные годы исследования (см. рис. 2), с другой стороны, значимое увеличение концентраций как Ni, так и Cu в период 2002–2017 гг. по отношению к периоду 1981–1997 гг., когда объем атмосфер-

ных выбросов твердых веществ в 5–8 раз превышал соответствующие значения в настоящее время. При сравнении собственных результатов с литературными данными [21, 26–30] выявлена сходная картина в пространственной мозаичности уровня загрязнения почвы ТМ в полевом эксперименте с наблюдаемой в окрестностях комбинатов цветной металлургии. Наиболее важными факторами варьирования концентраций Ni, Cu и Co являются содержание органического вещества в отобранном образце, а также количество атмосферных осадков, выпавших за предшествующий отбору образца год; обратная зависимость содержания элементов в почве от количества атмосферных осадков свидетельствует о динамичности и обратимости процесса аккумуляции тяжелых металлов почвами [28, 29].

Растительный опад — экран при транслокации ТМ из почвы в растения и лишайники. Закономерности накопления ТМ в растительном опаде и их внутри- и межценотическая вариабельность в целом схожи с таковыми для органогенного горизонта почв экспериментальных ПП. Такой характер связи и соотношения ТМ вполне очевиден, поскольку отмершие части растений и лишайников плотно контактируют с лесной подстилкой. Растительный опад выступает в роли экрана на пути миграции ТМ из органогенного горизонта почв в надземные органы растений и лишайников. В опад постоянно поступают хвоя, шишки, кора и мелкие веточки сосны, листья кустарничков, отмирающие части мхов и лишайников, которые накапливают значительно меньшие количества ТМ по сравнению с органогенным горизонтом почвы, что приводит к 2–6-кратному снижению содержания ТМ в опаде. Кроме того, растительный опад является субстратом для поселения лишайников и мхов.

Накопление ТМ организмами с разной стратегией минерального питания. Как хорошо известно, все исследуемые виды — *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Calluna vulgaris*, *Empetrum hermaphroditum* — относятся к вегетативно-подвижным кустарничкам с почвенным типом минерального питания, т.е. все минеральные вещества, в том числе и ТМ, кустарнички поглощают корнями из почвы и транспортируют в надземные органы растений. Согласно литературным данным [31], пределы нормального содержания ТМ в листьях растений составляют: Ni — 0.1–5.0, Cu — 5–30 мг/кг, а избыточность или токсичность ТМ варьирует в следующих пределах: Ni — 10–100, Cu — 20–100 мг/кг. Содержание ТМ в листьях исследуемых видов кустарничков не превышает порога токсичности ТМ для растений как на экспериментальных ПП, так и на территории буферной зоны (см. табл. 4). Повышенное накопление ТМ *Empetrum hermaphroditum* и *Calluna vulgaris*, по-видимому, связано с

особенностями аккумуляции металлов исследуемыми видами.

В полевом эксперименте слабая связь или ее отсутствие между содержанием ТМ в органогенном горизонте почвы и листьях кустарничков обусловлены тем, что площадь питания отдельных парциальных кустов достаточно велика и вследствие пространственной неравномерности уровня загрязнения лесной подстилки ТМ их накопление в ассимиляционных органах кустарничков весьма ограничено. В условиях аэротехногенного загрязнения всегда выявляется значимая корреляция между содержанием ТМ в листьях кустарничков и их кислоторастворимых форм в органогенном горизонте подзолов [11, 21].

В условиях как почвенного, так и аэротехногенного загрязнения окружающей среды ТМ изменяется нормальное соотношение концентраций Ni : Cu в листьях кустарничков, что обусловлено более быстрым передвижением ионов Ni⁺² из загрязненной почвы в надземные части растений по сравнению с ионами Cu⁺² [10, 11, 21].

Для организмов, имеющих преимущественно атмосферную стратегию минерального питания (лишайники и мхи), в условиях полевого эксперимента так же, как и для кустарничков, летальные концентрации ТМ не достигнуты. Среднее содержание ТМ в 4 доминирующих видах лишайников на экспериментальных ПП не более чем в 1.5 раза превышает их региональные фоновые концентрации [7, 17, 19], а содержание ТМ даже в бурых частях мха не выходит за пределы диапазона их фонового варьирования [7, 17, 20]. Очень слабая степень миграции ТМ из лесной подстилки в живые части лишайников была подтверждена в лабораторном эксперименте [32]. Нижнюю часть воздушно-сухих живых талломов *Cl. stellaris* помещали в растворы с концентрациями ионов Ni⁺² или Cu⁺² в интервале 125–500 мг/л и выдерживали в течение 14 сут. Результаты эксперимента показали следующее: 1) в исследуемом интервале концентраций ионов Ni⁺² или Cu⁺² не обнаружено влияния ТМ на скорость отмирания нижней части лишайника, возможно, вследствие их недолговременного воздействия; 2) поступление солевого раствора в таллом контролируется капиллярными силами и не зависит от концентрации ионов металлов в растворе; 3) в верхние части подстилки ионы ТМ не поступают из солевого раствора, что подтверждается отсутствием их повышенных концентраций в сухих частях талломов. В то же время известно, что мертвые части подстилки выполняют функции капилляров, по которым происходит поднятие водно-минерального раствора из субстрата к живой части [33–35], что объясняет повышенное содержание ТМ в отмирающих частях лишайников вследствие более

плотного контакта этих частей слоевищ с загрязненной подстилкой.

При аэротехногенном загрязнении поступление ТМ в лишайники и мхи происходит одновременно из загрязненного воздуха и загрязненной почвы. Пылевые частицы оседают на поверхности, а также проникают внутрь лишайника или мха, поэтому содержание Ni и Cu в надземных частях представителей мохово-лишайникового яруса на территории буферной зоны многократно превышает их фоновые значения (см. табл. 4). Полученные результаты свидетельствуют о преимущественном поступлении ТМ в слоевища лишайников и зеленые части мха из загрязненного воздуха, что согласуется с данными других исследователей [19, 22, 36, 37]. При сопоставимых уровнях загрязнения органогенного горизонта почв экспериментальных ПП и буферной зоны содержание ТМ в надземных частях лишайников и мха в полевом эксперименте составляет лишь 10–20% от их количества в тех же частях мха и лишайников, произрастающих на территории буферной зоны. Кроме того, совместное воздействие ТМ и диоксида серы приводит к выпадению чувствительных к аэротехногенному загрязнению видов лишайников и мхов, смене видового состава и сокращению проективного покрытия мохово-лишайникового яруса [5, 6, 11, 38].

Оценку зависимости содержания ТМ в исследуемых видах растений и лишайников от уровня загрязнения органогенного горизонта почвы проводили на основе регрессионного анализа. Полученные результаты показали, что линейная зависимость содержания ТМ в листьях кустарничков, живых и отмирающих частях лишайников, зеленых и бурых частях мха от концентраций кислоторастворимых форм Ni и Cu в органогенном горизонте почвы не всегда значима, поэтому в табл. 5 приведены параметры только значимых уравнений линейной регрессии. Однако низкие значения коэффициентов детерминации и корреляции между рассматриваемыми показателями могут свидетельствовать о том, что, с одной стороны, исследуемый диапазон содержания ТМ в органогенном горизонте почвы недостаточно широк для выявления линейной зависимости, а с другой — слишком велико варьирование концентраций ТМ в исследуемых объектах.

Таким образом, можно заключить, что в условиях полевого эксперимента в исследуемом интервале содержания кислоторастворимых форм ТМ в органогенном горизонте Al-Fe-гумусовых подзолов (Ni – 10–535, Cu – 20–865, Co – 1.0–24 мг/кг) уровень накопления ТМ в растениях и лишайниках весьма невысок. Содержание Ni и Cu в ассимиляционных органах кустарничков, зеленых и бурых частях мха, живых и отмирающих частях лишайников в большинстве случаев превышает лишь в

Таблица 5. Результаты регрессионного анализа зависимости содержания тяжелых металлов в растениях и лишайниках от содержания их кислоторастворимых форм в подстилке, аппроксимируемых линейными уравнениями вида $y = a + bx$

Содержание	<i>N</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>r</i>	<i>p</i>
Ni листьях <i>Vaccinium vitis-idaea</i>	165	3.66	0.02	0.30	0.52	0.001
Cu листьях <i>V. vitis-idaea</i>	165	3.15	0.003	0.27	0.49	0.000
Ni листьях <i>Calluna vulgaris</i>	110	5.32	0.04	0.19	0.44	0.001
Cu листьях <i>C. vulgaris</i>	110	3.43	0.003	0.15	0.39	0.001
Ni в живых частях <i>Cladonia stellaris</i>	120	1.82	0.012	0.13	0.37	0.000
Cu в живых частях <i>Cl. stellaris</i>	120	1.53	0.005	0.30	0.55	0.000
Ni в живых частях <i>Cl. rangiferina</i>	164	1.94	0.012	0.11	0.33	0.000
Cu в живых частях <i>Cl. rangiferina</i>	164	0.87	0.01	0.21	0.45	0.000
Ni в живых частях <i>Cl. mitis</i>	147	2.19	0.01	0.11	0.33	0.000
Cu в живых частях <i>Cl. mitis</i>	147	1.60	0.004	0.13	0.36	0.000
Ni в зеленых частях <i>Pleurozium schreberi</i>	29	6.84	0.17	0.35	0.59	0.001
Cu в зеленых частях <i>Pl. schreberi</i>	29	4.16	0.01	0.37	0.61	0.000

Примечание. Приведены параметры регрессионных уравнений только при уровне значимости $p < 0.05$: *N* – объем выборки; *a*, *b* – коэффициенты регрессионного уравнения; *R*² – коэффициент детерминации; *r* – коэффициент корреляции; *p* – уровень значимости.

1.5–5 раз их фоновые значения, но не превышает порога их избыточности или токсичности [31]. Следовательно, такой уровень накопления ТМ не является летальным для произрастания кустарничков, мхов и лишайников при почвенном загрязнении в указанном интервале содержания ТМ в лесной подстилке. Однако, как было показано выше, неравномерное рассыпание полиметаллической пыли по территории экспериментальных ПП привело к нарушению вплоть до полного разрушения мохово-лишайникового яруса и существенному снижению запаса его биомассы [24, 25]. Каково же может быть объяснение столь парадоксальной ситуации? Можно предположить следующее развитие событий. В период внесения полиметаллической пыли (1992–1997 гг.) ее попадание на поверхность лишайников и мхов в токсических для жизнедеятельности концентрациях привело к их частичной или полной гибели, поэтому резко снизилось проективное покрытие, уменьшился запас биомассы мохово-лишайникового яруса. Впоследствии (период 1997–2013 гг.) не происходило дополнительного поступления полиметаллической пыли на поверхность лишайников и мхов, осадки (в виде дождя и талого снега) частично вымыли пылевые частицы с их поверхности, и у них появилась возможность беспрепятственного роста, однако этот процесс очень продолжителен во времени. Согласно литературным данным [39], на побережье Белого моря в северотаежных сосновых лесах среднегодовой прирост лишайника *Cladonia rangiferina* составляет 5.5 мм/год, а *Cl. mitis* – 4.6 мм/год. Исходя из приведенных значений, можно подсчитать, что за 16

лет (1997–2013 гг.) лишайники могли подрасти максимально на 7–8 см, поэтому накопления ТМ в верхней живой части лишайников почти не происходит, а незначительное повышение содержания ТМ в живых частях лишайников не является летальным. В то же время для стабилизации проективного покрытия и высоты мохово-лишайникового яруса северотаежных сосновых лесов после катастрофического нарушения необходимо от 60 до 200 лет [11]. Иными словами, в условиях полевого эксперимента восстановление мохово-лишайникового яруса только начинается.

Для доминирующих видов кустарничков, слагающих травяно-кустарничковый ярус, попадание частиц полиметаллической пыли на их наземную часть не столь катастрофично, как для представителей мохово-лишайникового яруса. Листья вечнозеленых кустарничков *Vaccinium vitis-idaea*, *Calluna vulgaris*, *Empetrum hermaphroditum* защищены плотной кутикулой с восковым слоем, препятствующим проникновению пылевых частиц внутрь, а *Vaccinium myrtillus* – летне-зеленый кустарничек, листья которого раскрываются уже после таяния снега. Кроме того, площадь питания вегетативно-подвижных кустарничков достаточно велика, и поступление ТМ из загрязненной почвы в листья растений весьма ограничено. Указанные свойства кустарничков обусловили низкую миграцию ТМ из почвы в ассимиляционные органы, в результате степень нарушения травяно-кустарничкового яруса оказалась не такой значительной по сравнению с мохово-лишайниковым ярусом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель постановки полевого эксперимента — моделирование в природных условиях воздействия металлургической пыли на лесные экосистемы без сопутствующего воздействия сернистого ангидрида, в целом была достигнута, хотя некоторые полученные результаты оказались неожиданными. Изначально предполагалось, что внесение практически равных доз полиметаллической пыли, отобранной с электрофильтров комбината “Североникель” (Мурманская обл.), в однотипные Al-Fe-гумусовые подзолы вызовет примерно одинаковую ответную реакцию основных биогеоценозов. Однако в процессе исследования были выявлены общие закономерности и особенности воздействия загрязнения ТМ на разные компоненты лесных экосистем.

Рассыпание вручную полиметаллической пыли по поверхности снежного покрова в фоновых средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова привело к пространственно неравномерному загрязнению Al-Fe-гумусовых подзолов, что нашло отражение в высокой степени внутриценотической вариабельности содержания ТМ в лесной подстилке. Межценотическая вариабельность уровня загрязнения органогенного горизонта почв может быть связана с различиями в гидротермическом режиме разных типов сосновых лесов, а также с одновременным проведением исследований.

Гипотеза о разрушении напочвенного покрова под воздействием почвенного загрязнения ТМ полностью подтвердилась. Попадание частиц полиметаллической пыли на поверхность и их проникновение во внутренние ткани вызвало угнетение и гибель мхов и лишайников, что привело к нарушению вплоть до полного разрушения мохово-лишайникового яруса сообществ сосновых лесов. Отсутствие поступления полиметаллической пыли в течение 16 лет (1997–2013 гг.) способствовало росту лишайников и мхов, поэтому содержание Ni и Cu в живых частях доминирующих видов лишайников р. *Cladonia* и мха *Pleurozium schreberi* на экспериментальных ПП лишь незначительно превышает их концентрации в контроле и не достигает порога избыточности или токсичности. Следовательно, в дальнейшем содержание ТМ в лишайниках и мхах не будет лимитирующим фактором восстановления мохово-лишайникового яруса, тем более что растительный опад, служащий субстратом для поселения лишайников и мхов, экранирует их от контакта с органогенным горизонтом почвы, загрязненным ТМ в высоких концентрациях. Однако процесс полного восстановления видового состава и структуры мохово-лишайникового яруса может занять не один десяток лет [11].

В условиях полевого эксперимента транслокация ТМ из загрязненного органогенного горизонта почвы в опад и надземные части растений и лишайников существенно различается. В растительном опаде содержание ТМ варьирует в пределах 14–33%, а в надземных частях кустарничков, мха и лишайников — лишь 1–14% от концентрации кислоторастворимых форм ТМ в органогенном горизонте почвы. Можно предположить, что скорость миграции ТМ из загрязненной почвы в надземные части растительных организмов убывает в соответствии с их содержанием в ряду опад \gg зеленые части мха *Pleurozium schreberi* $>$ листья всех исследуемых видов кустарничков $>$ живые части кустистых лишайников р. *Cladonia*.

Уровень загрязнения ТМ органогенного горизонта почв на экспериментальных ПП в результате пятилетнего внесения полиметаллической пыли оказался сопоставим с таковым, наблюдаемым в буферной зоне комбината “Североникель”. Это позволило сравнить воздействие почвенного и аэротехногенного загрязнения на компоненты лесных экосистем. В соответствии со стратегией минерального питания при аэротехногенном загрязнении в буферной зоне доминирующие виды лишайников и мхов накапливают в 5–10 раз больше ТМ по сравнению с их содержанием в тех же видах на экспериментальных ПП при почвенном загрязнении ТМ. Для представителей травяно-кустарничкового яруса эти различия не так ярко выражены: концентрации Cu практически одинаковы, а содержание Ni не более чем в 2 раза больше в листьях кустарничков из буферной зоны по отношению к таковому в листьях тех же видов на экспериментальных ПП.

Соотношение Ni : Cu различается в почве и растительных организмах и лишайниках: в органогенном горизонте почвы, равно как и в растительном опаде, содержание Cu всегда больше, чем Ni. В листьях большинства видов кустарничков и зеленых частях мха соотношение меняется на обратное при почвенном загрязнении ТМ. Эти различия обусловлены рядом причин: химической природой металла; степенью закрепления ТМ в почве с образованием органо-минеральных комплексов разной прочности; скоростью транслокации ТМ из загрязненной почвы в надземные органы растительных организмов; возможным антагонизмом в аккумуляции разных металлов. При аэротехногенном загрязнении к этим причинам добавляется состав атмосферных выбросов комбината “Североникель”.

Результаты проведенного исследования дополняют и углубляют наши знания о воздействии почвенного и аэротехногенного загрязнения окружающей среды на уровень накопления ТМ разными видами растений и лишайников. Они могут быть использованы в целях биоиндикации

и мониторинга окружающей среды, а также для оценки роли разных таксонов в миграции ТМ в системе почва–растение в бореальных экосистемах.

Авторы благодарят В.В. Горшкова и И.Ю. Баккал за помощь в сборе полевого материала и выражают признательность анонимному рецензенту за ценные замечания, советы и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Linzon S.N.* Effects of airborne sulfur pollutants on plants // *Sulfur in the environment. Pt. 2. Ecological impacts.* N. Y.: Willey, 1978. P. 109–162.
2. *Mudd J.B.* Sulfur dioxide // *Responses of plants to air pollution.* N. Y., 1975. P. 9–22.
3. *Garsed S.G., Rutter A.J.* Relation performance of conifer populations in various tests for sensitivity to SO₂ and the implications for selecting trees for planting in polluted areas // *New Phytologist.* 1982. V. 92. P. 349–367.
4. *Хальбваш Г.* Реакция организмов высших растений на загрязнение атмосферы двуокисью серы и фторидами // *Загрязнение воздуха и жизнь растений.* Л.: Наука, 1988. С. 206–246.
5. *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение.* Л.: Наука, 1990. 200 с.
6. *Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова.* Л.: БИН АН СССР, 1990. 195 с.
7. *Раменская М.Л.* Микроэлементы в растениях Крайнего Севера. Л.: Наука, 1974. 159 с.
8. *Растения в экстремальных условиях минерального питания.* Л.: Наука, 1983. 177 с.
9. *Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов.* Л.: БИН РАН, 1991. 214 с.
10. *Проблемы экологии растительных сообществ Севера.* СПб.: ООО “ВВМ”, 2005. 450 с.
11. *Динамика лесных сообществ Северо-Запада России.* СПб.: ООО “ВВМ”, 2009. 276 с.
12. *Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А.* Физиология растений. М.: Абрис, 2011. 783 с.
13. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.
14. *Barcan V.* Leaching of nickel and copper from a soil contaminated by metallurgical dust // *Environmental International.* 2002. V. 28. № 1–2. P. 63–68.
15. *Barcan V.* Nature and origin of multicomponent aerial emissions of the copper-nickel smelter complex // *Environment International.* 2002. V. 28. № 1–2. P. 451–456.
16. *Методы изучения лесных сообществ /* Под ред. Ярмишко В.Т. и Лянгузовой И.В. СПб.: Изд-во НИИХимии, 2002. 240 с.
17. *Рассеянные элементы в бореальных лесах /* Отв. ред. Исаев А.С. М.: Наука, 2004. 616 с.
18. *Артемкина Н.А.* Содержание фенольных соединений и элементный состав в *Vaccinium vitis-idaea* (Ericaceae) в еловых лесах Кольского полуострова в условиях техногенного загрязнения // *Растительные ресурсы.* 2010. Т. 46. Вып. 2. С. 86–98.
19. *Сухарева Т.А.* Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // *Труды Карельского НЦ РАН.* 2016. № 4. С. 70–82. <https://doi.org/10.17076/eeco259>
20. *Артемкина Н.А.* Химический состав мхов Мурманской области // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН.* 2017. № 4. С. 382–385.
21. *Лянгузова И.В.* Динамические тренды содержания тяжелых металлов в растениях и почвах при разном режиме аэротехногенной нагрузки // *Экология.* 2017. № 4. С. 250–260. [*Lyanguzova I.V.* Dynamic trends of heavy metal contents in plants and soil under different industrial air pollution regimes // *Rus. J. of Ecology.* 2017. V. 48. № 4. P. 311–320.] <https://doi.org/10.7868/S0367059717040114>
22. *Лянгузова И.В., Катаева М.Н., Беляева А.И.* Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов лишайниками в экстремальных условиях существования // *Современная микология в России.* 2015. Т. 4. № 3. С. 339–341.
23. *Баркан В.Ш., Лянгузова И.В.* Содержание тяжелых металлов в доминантных видах мхов как индикатор аэротехногенной нагрузки // *Экология.* 2018. № 2. С. 119–126. doi: [*Barkan V. Sh., Lyanguzova I.V.* Concentration of heavy metals in dominant moss species as an indicator of aerial technogenic load // *Russ. J. of Ecology.* 2018. V. 49. № 2. P. 128–134. 10.1134/S1067413618020030] <https://doi.org/10.7868/S0367059718020051>
24. *Лянгузова И.В., Горшков В. В., Баккал И. Ю., Бондаренко М.С.* Воздействие полиметаллической пыли на напочвенный покров сосняка лишайниково-зеленомошного // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование.* 2015. № 3. С. 74–86.
25. *Бондаренко М.С., Лянгузова И.В., Горшков В.В., Баккал И.Ю.* Изменение фитомассы нижних ярусов северотаежных сосновых лесов при экспериментальном загрязнении почв тяжелыми металлами // *Растительные ресурсы.* 2018. Т. 54. Вып. 1. С. 59–74.
26. *Копчик Г.Н., Копчик С.В., Ливанцова С.Ю. и др.* Пространственная изменчивость свойств подзолов лесных биогеоценозов Кольского полуострова в условиях атмосферного загрязнения // *Вестник Московского гос.ун-та. Сер. 17: Почвоведение.* 2003. № 2. С. 37.
27. *Шималина Н.С., Позолотина В.Н., Орехова Н.А., Антонова Е.В.* Оценка биологических эффектов у семенного потомства *Plantago major* L. в зоне воздействия медеплавильного производства // *Экология.* 2017. № 6. С. 420–430. <https://doi.org/10.7868/S0367059717060038>
28. *Кашулина Г.М.* Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // *Почвоведение.* 2017. № 7. С. 860–873. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070036>
29. *Кашулина Г.М.* Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никеле-

- вого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. № 4. С. 493–505. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X>
30. Баркан В.Ш., Лянгузова И.В. Изменение уровня загрязнения органогенного горизонта Al-Fe-гумусовых подзолов при уменьшении аэротехногенной нагрузки (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2018. № 3. С. 338–346. [Barkan V.Sh., Lyanguzova I.V. Changes in the degree of contamination of organic horizons of Al-Fe-humus podzols upon a decrease in aerotechnogenic loads, the Kola peninsula // Eurasian Soil Sci. 2018. V. 51. № 3. P. 327–335. doi 10.1134/S106422931803002X] <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030085>
31. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soil and plants. London: CRC Press, 2001. 413 p.
32. Lyanguzova I.V., Bondarenko M.S. The influence of heavy metals (Ni, Cu) on the growth of *Cladina stellaris* (Opiz) Brodo in experimental conditions // Proceeding of 4th International Symposium “Plant Signaling and Behavior”. St. Petersburg: SINELCo. Ltd., 2016. P. 49.
33. Андреев В.Н. Прирост кормовых лишайников и приемы его регулирования // Труды БИН АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. Л.: БИН АН СССР, 1954. Вып. 9. С. 11–74.
34. Барашикова Э.А. Питание кладонии оленьей через мертвую часть подцелиев // Ботан. журн. 1963. Т. 48. № 4. С. 588–591.
35. Малышева Т.В. Влияние искусственного изменения влажности почвы на рост наземных лесных мхов и лишайников // Экология. 1981. № 4. С. 12–18.
36. Московченко Д.В., Валеева Э.И. Содержание тяжелых металлов в лишайниках на севере Западной Сибири // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2011. № 11. С. 162–172.
37. Purvis O.W., Williamson B.J., Spiro B. et al. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia // Geological Society Special Publication. 2013. V. 384. № 1. С. 133–146.
38. Горшков В.В., Баккал И.Ю., Лянгузова И.В., Баркан В.Ш. Прогноз восстановления напочвенного покрова в сосновом лесу с давностью пожара 65 лет при искусственном загрязнении полиметаллической пылью // Живые и биокосные системы. 2013. № 3. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-14>
39. Толпышева Т.Ю., Тимофеева А.К. Влияние субстрата на рост и размножение лишайников *Cladonia rangiferina* и *C. mitis* // Вестн. Московского гос. ун-та. Сер. № 16. Биология. 2008. № 4. С. 34–41.