

УДК 582.475:630*416.9:504.5

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОПАДА ХВОИ СОСНЫ В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ НА СЕВЕРНОМ ПРЕДЕЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ¹

© 2022 г. Е. А. Иванова^а, *, Н. В. Лукина^б, В. Э. Смирнов^б, Л. Г. Исаева^а

^аИнститут проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ КНЦ РАН,
ул. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., 184209 Россия

^бЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

*E-mail: ea.ivanova@ksc.ru

Поступила в редакцию 10.03.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принята к публикации 06.10.2021 г.

Оценивался химический состав опада хвои сосны обыкновенной в северотаежных сосновых лесах в фоновых условиях и под воздействием аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината “Североникель”. В хвойном опаде в лесах, подверженных влиянию воздушного загрязнения, снижается содержание элементов питания (Ca, Mg, Mn, Zn), увеличивается содержание тяжелых металлов (Ni, Cu) и расширяются стехиометрические соотношения C/P и N/P. Это свидетельствует о снижении качества растительного материала для разложения почвенной биотой. Внутрибиогеоценотические различия в химическом составе опада хвои в фоновых условиях проявляются в более высоком содержании в нем K и P, поступающих с кроновыми и стволовыми водами под кронами, тогда как в межкроновых пространствах выше содержание Fe, Zn, Ni и Cu из-за фоновое воздушного загрязнения. В дефолирующих лесах хвойный опад под кронами деревьев содержит больше Ca, Mg, K, Mn, P, N и S из-за интенсивного выщелачивания элементов питания из крон деревьев кислотными осадками и, как в случае с S, поступления в составе кислотных выпадений. Повышенные содержания N, P и K в опаде хвои дефолирующих лесов могут быть связаны с высокими концентрациями этих подвижных элементов в живой хвое, опадающей не только в фенологические сроки. Сезонная изменчивость химического состава опада хвои в фоновых условиях и дефолирующих лесах проявляется в высоком содержании в хвое Ca и Mn, накапливающихся к концу теплого периода года. В техногенных редколесьях в опаде хвои к концу вегетационного сезона накапливаются Mg и K, что свидетельствует о нарушении процессов ретранслокации в условиях загрязнения. Значительное снижение содержания Fe и Zn в опаде в конце теплого периода года во всех изученных сосняках и содержания Ni и Cu в сосняках в условиях воздушного загрязнения объясняется антагонизмом с Mn и выщелачиванием из хвои в теплый период подкисленными осадками.

Ключевые слова: хвойный опад, химический состав, сосновые леса, аэротехногенное загрязнение, внутрибиогеоценотическая изменчивость, сезонная вариабельность.

DOI: 10.31857/S002411482201003X

Опад ассимилирующих органов представляет активную фракцию опада деревьев и является источником доступных для биоты элементов питания. Оценка элементного состава листового/хвойного опада деревьев представляет интерес для понимания закономерностей циклов элементов и почвообразования (Meier et al., 2005; Wood et al., 2006; Wood et al., 2009; Vesterdal et al., 2012; Осипов, 2017). За счет особенностей химического состава листовой и хвойный опад способствует формиро-

ванию фитогенных зон влияния деревьев, подавляет рост травянистых растений, влияет на микробную активность, состав почв (Решетникова, 2011; Aponte et al., 2013; Chavez-Vergara et al., 2014; Уфимцев, Егорова, 2016; Колмогорова, Уфимцев, 2018). Исходное качество опада регулирует скорость его разложения (Berg, 2000; Wardle et al., 2003; De Marco et al., 2007; Berg, McClaugherty, 2008; Zhang et al., 2008; Rahman et al., 2013; Tu et al., 2014; Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019). Содержание элементов в опаде зависит от древесной породы (Preston et al., 2006; Ukonmaanaho et al., 2008; Aponte et al., 2013; Jonczak, Parzych, 2014; Боев и др., 2018; Becker et al., 2018; Neumann et al., 2018),

¹ Исследование выполнялось в рамках Государственного задания Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН № 0226-2018-0111 (AAAA-A18-118021490070-5).

возраста древостоя (Trap et al., 2013), топографии (Бессонова и др., 2017). Сезонные особенности химического состава опада изучены довольно слабо (Rautio et al., 1998b; Portillo-Estrada et al., 2013; Jonczak, Parzych, 2014; Чульдиене, 2017).

На Кольском полуострове и материковой части Мурманской обл. на лесные экосистемы оказывают влияние как природные факторы среды (короткий вегетационный период, низкие температуры), так и аэротехногенное загрязнение. В центральной части области расположено крупное горно-металлургическое предприятие — комбинат “Североникель” (АО “Кольская ГМК”), основными компонентами выбросов которого являются сернистый ангидрид и полиметаллическая пыль (Ni, Cu). В 1990-е годы наблюдалось снижение объема выбросов загрязняющих веществ на Мончегорской площадке Кольской ГМК (Цветков В., Цветков И., 2012). По данным АО “Кольская ГМК”, выбросы Ni, Cu и SO₂ в 1995 г. составляли 1.4, 0.7 и 129.3 тыс. т год⁻¹, а уже в 2014 г. — 0.3, 0.6 и 33.5 тыс. т год⁻¹ соответственно. Атмосферное загрязнение приводит к деградации лесов, усилению дефолиации деревьев, нарушению процессов ретранслокации элементов внутри деревьев (Лукина, Никонов, 1996, 1998; Nieminen, Helmisääri, 1996; Rautio et al., 1998a; Steinnes et al., 2000; Kiiikkilä, 2003; Тарханов, 2009; Ярмишко, Лянгузова, 2013; Сухарева, Лукина, 2014; Vasek et al., 2016). В зоне воздействия Среднеуральского медеплавильного завода было зафиксировано увеличение поступления Са с опадом хвои сосны, по сравнению с контрольной зоной (Юсупов и др., 1995). Длительное влияние кислотных осадков и насыщение азотом в еловых лесах Чехии привело к снижению концентраций Са, Mg и Mn и соотношений Са/Al и Mg/Al, увеличению содержания N и соотношения N/Mg в опаде (Koráček et al., 2010). В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях в зоне действия комбината “Североникель” зафиксировано снижение скорости разложения опада ели и сосны при ухудшении качества растительного материала: повышении исходного содержания тяжелых металлов Ni и Cu и снижении содержания Са, Mn, K, Mg (Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019). Сравнительных оценок химического состава компонентов древесного опада по широкому спектру элементов и показателей на северном пределе распространения при влиянии аэротехногенного загрязнения и с учетом сезонности и внутрибиогеоценотической изменчивости ранее не проводилось. Эти данные важны для оценки состояния и функционирования древостоев, динамики биогеохимических циклов углерода, элементов питания и тяжелых металлов в лесах.

Цель данной работы: оценить влияние аэротехногенного загрязнения комбината “Северо-

никель” на химический состав опада хвои сосны с учетом внутрибиогеоценотической и сезонной изменчивости в сосновых лесах на северном пределе распространения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились на постоянных пробных площадях Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН в северотаежных сосняках кустарничково-лишайниковых, подверженных влиянию выбросов медно-никелевого комбината “Североникель” (г. Мончегорск) на Кольском п-ове и материковой части Мурманской обл. Постоянные мониторинговые площадки в соответствии с уровнем загрязнения и состоянием растительности характеризуют различные стадии дигрессионной сукцессии и расположены по градиенту загрязнения в юго-юго-западном направлении от комбината на расстоянии 7–10 км от источника выбросов в техногенных редколесьях (Р), в 20–100 км в дефолирующих лесах (Д) и в 100–200 км — в лесах, формирующихся в фоновых автоморфных условиях (Лукина, Никонов, 1998). По составу древостоя все объекты исследований — сосновые леса с примесью березы и ели, в прошлом подвергались действию пожаров.

Опад на площадках собирается круглогодично в соответствии с рекомендациями международной программы ICP-Forests (Ukonmaanaho et al., 2016) в хлопковые мешки, прикрепленные к прочной раме в нижней части собирающей воронки опадоуловителя. Диаметр верхней части воронок составляет 82 см, глубина опадоуловителей — более 0.5 м для предотвращения выдувания опада из ловушек. Коллекторы установлены над землей на высоте 1–1.3 м для отвода из них воды. Опадоуловители на площадках были установлены в 1994 г. случайным образом в межкروновых пространствах (по 10–15 шт. на площадку), с 2013 г. — с учетом межкروновых и подкروновых пространств. В настоящее время на площадках между крон установлено по 7–8 опадоуловителей, под кронами — по 4–5. Отбор образцов проводится дважды в год: в начале октября перед залеганием снега и начале июня после снеготаяния. В лабораторных условиях из общей массы древесного опада выделялась фракция опада хвои сосны.

После разбора образцов опада в лабораторных условиях для характеристики химического состава опада хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в 2014–2017 гг. для каждого из сезонов отбора (“октябрь–май” и “июнь–сентябрь”) для подкروновых и межкروновых пространств отдельно на анализ отбирали по возможности по три смешанные пробы, общее количество проб составило 99 шт. Данные были дополнены результатами анализа исходного состава опада

хвои, отобранной однократно в сентябре 1997 г. для эксперимента по разложению 1997–1999 гг. – анализ этих проб проводился в 1–4-кратной повторности. Расчеты проводились на абсолютно сухой вес. Коэффициент гигроскопии в пробах определяли, взвешивая образцы до и после их высушивания при температуре 105°C в сушильном шкафу. Перед проведением химического анализа растительный материал измельчали и подвергали мокрому озолению концентрированной HNO_3 . Концентрации металлов (Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni) определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе AAnalyst 800. Общее содержание N определялось методом Кьельдаля, органического C ($\text{C}_{\text{орг}}$) – методом Тюрина, P – методом колориметрии (Воробьева, 1998).

Оценку внутрибиогеоценотической и сезонной изменчивости химического состава опада хвои сосны, а также влияния воздушного загрязнения (через стадию дигрессии) проводили с применением V-критерия (Husson et al., 2017). Степень влияния воздушного загрязнения (через стадии дигрессии), сезонной изменчивости (теплый и холодный периоды года) и внутрибиогеоценотического пространственного варьирования с учетом основных элементов микромозаики (подкروновые/межкروновые пространства) на состав хвойного опада сосны оценивали по величине коэффициента детерминации R^2 , показывающего вклад фактора в общую дисперсию рассматриваемого параметра. Расчет V-критерия выполнялся в среде статистического программирования R (R Core Team ..., 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав опада хвои сосны в северотаежных сосновых лесах на разных стадиях дигрессии. Воздушное загрязнение оказывает наиболее существенное влияние на содержание в опаде хвои сосны обыкновенной Mn, Ni, Cu, S, Fe ($R^2 = 0.4–0.7$), P, Ca, Al, Mg и величину соотношения C/P ($R^2 = 0.2–0.3$). В меньшей степени влияние аэротехногенного загрязнения проявилось для Zn и соотношения N/P ($R^2 = 0.1$) (табл. 1). В сосновых лесах, формирующихся в фоновых условиях, опад хвои сосны характеризуется относительно высоким содержанием Mg, Mn и Zn и низким – Al, Fe, Ni, Cu, S ($p < 0.05$) (табл. 2).

В сосняках, подверженных влиянию воздушного промышленного загрязнения, наблюдаются изменения в элементном составе опада хвои. В дефолирующих лесах опад отличается самым низким содержанием Ca и Mg, что соответствует закономерностям, выявленным для живой хвои в сходных условиях (Лукина, Никонов, 1998), но при этом высоким содержанием P ($p < 0.05$) (табл. 2). Обеднение опада хвои сосны элементами пита-

ния (Ca, Mg) и возрастание в нем содержания способного к ретранслокации P можно объяснить влиянием воздушного загрязнения: вблизи металлургических предприятий возраст хвои на ветвях снижается по причине опадания ее не только в фенологические сроки, нарушаются процессы ретранслокации подвижных элементов (Niemenen, Helmisaari, 1996; Лукина, Никонов, 1998; Rautio et al., 1998a; Никонов и др., 2004). Увеличение содержания P может быть связано и с повышенными концентрациями K и N как проявление связи в соотношении N : P : K – рост концентрации одного ведет к увеличению содержания других (Сазонова и др., 2005). Кальций и магний – менее подвижные элементы, и уменьшение их содержания может быть связано с их выщелачиванием еще из хвои на деревьях кислотными осадками (Лукина, Никонов, 1998). В техногенных редколесьях опад ассимилирующих органов сосны характеризуется высокими концентрациями Ca, Al, Fe, Ni, Cu, S и низкими – Mn, Zn и P ($p < 0.05$) (табл. 2). Повышение содержания тяжелых металлов – основных компонентов выбросов комбината “Североникель” (Ni, Cu Fe) – и снижение содержания Mn и Zn наблюдается также у живой хвои (Сухарева, 2013) и может объясняться проявлением антагонизма между этими элементами (Rautio et al., 1998b; Steinnes et al., 2000; Лукина и др., 2005), а также антагонизмом между Mn и Fe (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Лукина, Никонов, 1996; Барбер, 1998; Сухарева, Лукина, 2014). В условиях загрязнения процессы перераспределения подвижных элементов нарушаются, что приводит к увеличению их содержания в ассимилирующих органах (Сухарева, 2013). Однако в хвойном опаде техногенных редколесий наблюдается низкое содержание P, что, предположительно, может быть связано с его изначально дефицитным уровнем в хвое сосны (Сухарева, Лукина, 2014), а также может быть обусловлено антагонизмом с Ca, как в еловой хвое на стадии интенсивной дефолиации (Лукина и др., 2008). Высокое содержание Ca в опаде хвои сосны, как и в живой, в техногенных редколесьях может быть связано с поглощением кальция из почвенных вод, сформированных в богатых этим элементом горизонтах, и поступлением минеральных частиц с пылящих поверхностей техногенных пустошей. Вблизи комбината, где формируются техногенные редколесья, почвообразующие породы содержат габбро- и габбронориты, обогащенные основными катионами (Лукина, Никонов, 1996; Лукина, Никонов, 1998; Лукина и др., 2008; Аманьева и др., 2012).

Воздушное загрязнение в значительной степени влияет на величину соотношения C/P и в меньшей – N/P, характеризующих качество растительного материала для почвенной биоты, в том числе микроорганизмов-деструкторов (табл. 1).

Таблица 1. Оценка влияния аэротехногенного загрязнения (через стадии дигрессии), внутрибиогеоценотической и сезонной изменчивости на параметры химического состава опада ассимилирующих органов сосны обыкновенной

Фактор		Параметр															
		Ca	Mg	K	Al	Fe	Mn	Zn	Ni	Cu	S	P	N	C _{орг}	C/N	C/P	N/P
Аэротехноген- ное загрязнение N = 99–111	R ²	0.26	0.18	0.01	0.20	0.37	0.71	0.10	0.70	0.63	0.47	0.29	0.03	0.01	0.03	0.26	0.08
	p	0	0	0.75	0	0	0	0.003	0	0	0	0	0.21	0.54	0.28	0	0.01
	Фон																
ВнутриБГЦ изменчивость N = 32–34	R ²	0.11	<0.01	0.28	0.04	0.20	<0.01	0.34	0.23	0.17	0.01	0.14	0.05	0.02	0.01	0.11	0.02
	p	0.06	0.76	0.001	0.27	0.01	0.81	0.001	0.004	0.02	0.55	0.03	0.21	0.42	0.51	0.06	0.40
	Дефолирующие леса																
	R ²	0.45	0.31	0.17	<0.01	0.01	0.18	0.10	0	<0.01	0.14	0.35	0.15	<0.01	0.13	0.31	0.01
	p	0	0.001	0.02	0.76	0.59	0.02	0.07	1.00	0.92	0.03	<0.001	0.03	0.93	0.04	0.001	0.71
	Техногенные редколесья																
	R ²	0.30	<0.01	0.08	<0.01	0.01	0.08	<0.01	0.01	0.04	<0.01	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	0.09	0.07
	p	0.001	0.85	0.12	0.73	0.66	0.11	0.71	0.61	0.26	0.73	0.12	0.86	0.77	0.83	0.10	0.13
	Фон																
Сезонная изменчивость N = 32–34	R ²	0.21	0	<0.01	0.05	0.49	0.57	0.22	<0.01	0.26	0.14	0.29	0.08	0.01	0.02	0.23	0.02
	p	0.01	0.98	0.84	0.20	0	0	0.01	0.73	0.002	0.03	0.001	0.10	0.59	0.46	0.004	0.42
	Дефолирующие леса																
	R ²	0.19	0.03	<0.01	0.17	0.74	0.51	0.39	0.87	0.66	0.12	0.01	0.11	0.08	0.06	0.01	0.20
	p	0.01	0.32	0.87	0.02	0	0	<0.001	0	0	0.05	0.57	0.06	0.11	0.17	0.63	0.01
	Техногенные редколесья																
	R ²	0.06	0.34	0.26	<0.01	0.43	0.35	0.65	0.67	0.47	0.01	0.09	0.10	0.04	0.03	0.04	<0.01
	p	0.16	<0.001	0.003	0.76	0	<0.001	0	0	0	0.52	0.08	0.07	0.28	0.36	0.25	0.70

Примечание: R² – коэффициент детерминации, показывающий вклад фактора в дисперсию параметра, p – вероятность ошибки 1-го рода.

Таблица 2. Химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии ($N = 32-38$)

Параметр		v-критерий			Среднее по стадии			Стандартное отклонение по стадии			Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p		
		Ф	Д	Р	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р			Ф	Д	Р
Ca	мг/кг	-0.40	-4.40	4.77	4398	3875	5056	1154	584	591	4448	950	0.69	0	0
Mg		3.18	-4.24	1.02	445	311	407	162	111	80	389	134	<0.01	0	0.31
K		-0.09	0.70	-0.60	684	725	658	198	505	389	689	380	0.93	0.49	0.55
Al		-4.67	2.15	2.56	376	549	558	72	167	237	493	191	0	0.03	0.01
Fe		-4.93	-1.01	5.97	135	213	356	65	125	159	234	153	0	0.31	0
Mn		7.42	0.44	-7.90	1072	755	367	282	126	99	734	347	0	0.66	0
Zn		2.48	0.67	-3.15	941	776	426	902	559	332	715	671	0.01	0.50	<0.01
Ni		-5.61	-3.02	8.64	4	69	387	3	22	193	153	202	0	<0.01	0
Cu		-5.72	-2.36	8.11	2	20	78	2	6	43	33	41	0	0.02	0
S		-6.00	0.24	5.80	207	411	597	187	187	141	403	235	0	0.81	0
P		-0.72	5.23	-4.47	307	371	267	79	68	51	314	79	0.47	0	0
N		0.30	1.38	-1.65	3434	3599	3156	1203	973	932	3393	1053	0.77	0.17	0.10
C _{орг}	%	0.36	0.74	-1.10	57	57	56	4	7	4	57	5	0.72	0.46	0.27
C/N		1.28	-1.48	0.19	210	173	196	143	57	55	193	96	0.20	0.14	0.85
C/P		0.70	-4.76	4.02	1982	1618	2199	491	268	418	1937	467	0.48	0	<0.01
N/P		0.65	-2.80	2.10	11	10	12	4	2	3	11	3	0.52	0.01	0.04

Примечание. Ф – фоновые леса, Д – дефолирующие леса, Р – техногенные редколесья, p – вероятность ошибки 1-го рода.

Согласно литературным данным, соотношения C/P и N/P в опаде сосновой хвои *Pinus banksiana* Lamb. в Канаде составили 391 и 10 соответственно (Moore et al., 2006). В хвойном опаде сосны обыкновенной на объектах наших исследований в фоновых условиях соотношения C/P и N/P составили в среднем 1982 и 11 соответственно. В дефолирующих лесах соотношения C/P и N/P имеют достоверно самые низкие значения, тогда как в техногенных редколесьях наблюдаются высокие значения данных соотношений. При сходном содержании N и C в опаде это может объясняться большой разницей в концентрации фосфора: высокой – в дефолирующих лесах и низкой – в техногенных редколесьях.

Таким образом, воздушное промышленное загрязнение оказывает значительное влияние на изменение химического состава опада ассимилирующих органов сосновых деревьев, снижая качество растительного материала для разложения организмами-деструкторами за счет уменьшения содержания элементов питания (Ca, Mg, Mn, Zn), повышения содержания тяжелых металлов и расширения соотношений C/P и N/P.

Внутрибиогеоценотическая изменчивость химического состава опада хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии. Известно, что опад ассимилирующих органов растений за счет элементного состава и содержания вторичных метаболитов способствует формированию фитогенных зон влияния деревьев (Aponte et al., 2013; Колмогорова, Уфимцев, 2018). Внутрибиогеоценотическая пространственная изменчивость состава хвойного опада в фоновых условиях наибольшим образом проявилась для Zn, K ($R^2 = 0.3$), Ni, Cu и Fe ($R^2 = 0.2$) и в наименьшей степени для P ($R^2 = 0.1$) (табл. 1). Растительный материал, отобранный под кронами деревьев, отличается более высоким содержанием подвижных K и P ($p < 0.05$), что может быть связано как с поступлением калия с кроновыми и стволовыми водами, так и, возможно, большей долей в опаде под кронами молодой хвои (табл. 3). В межкрупных пространствах опад хвои сосны содержит больше Fe, Zn, Ni и Cu ($p < 0.05$), что может быть связано с фоновым аэротехногенным загрязнением, вызванным переносом поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния (Ершов и др., 2019).

Таблица 3. Внутрибиогеоценотическая изменчивость химического состава опада хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии

Параметр		v-критерий		Среднее		Стандартное отклонение		Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p
		МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК			
Фон (N = 15–17)										
Ca	мг кг ^{−1}	1.88	−1.88	4357	3848	977	436	4103	788	0.06
Mg		0.31	−0.31	397	391	66	56	394	61	0.75
K		−3.07	3.07	555	745	113	187	650	180	<0.01
Al		−1.11	1.11	354	381	67	75	367	71	0.27
Fe		2.57	−2.57	156	99	80	26	128	65	0.01
Mn		0.25	−0.25	1000	986	190	143	993	166	0.80
Zn		3.23	−3.23	1533	504	1009	145	1051	899	<0.01
Ni		2.77	−2.77	4	2	3	1	3	2	0.01
Cu		2.34	−2.34	2	2	1	1	2	1	0.02
S		0.61	−0.61	227	188	190	187	207	187	0.54
P		−2.16	2.16	273	334	60	91	303	82	0.03
N		−1.28	1.28	3025	3531	916	1332	3278	1155	0.20
C _{орг}	%	−0.82	0.82	56	57	4	4	57	4	0.41
C/N		0.68	−0.68	230	196	177	105	213	144	0.50
C/P		1.86	−1.86	2150	1834	478	472	1992	494	0.06
N/P		0.85	−0.85	12	11	4	3	11	4	0.39
Дефолирующие леса (N = 15–17)										
Ca	мг кг ^{−1}	−3.75	3.75	3405	4213	319	548	3835	607	<0.01
Mg		−3.10	3.10	246	304	38	50	277	53	<0.01
K		−2.29	2.29	497	606	81	152	555	134	0.02
Al		0.32	−0.32	587	570	171	144	578	155	0.75
Fe		0.55	−0.55	239	215	154	100	226	127	0.59
Mn		−2.34	2.34	713	818	140	93	768	127	0.02
Zn		1.80	−1.80	1046	710	667	300	867	526	0.07
Ni		−0.0002	0.0002	70	70	24	23	70	23	1.00
Cu		0.10	−0.10	20	20	6	7	20	6	0.92
S		−2.09	2.09	338	476	149	196	411	187	0.04
P		−3.30	3.30	322	384	37	48	355	53	<0.01
N		−2.16	2.16	3134	3858	783	968	3519	946	0.03
C _{орг}	%	0.09	−0.09	57	57	8	6	57	7	0.93
C/N		2.00	−2.00	196	155	68	40	174	57	0.05
C/P		3.08	−3.08	1783	1493	268	178	1629	265	<0.01
N/P		−0.38	0.38	10	10	2	2	10	2	0.70
Техногенные редколесья (N = 16–17)										
Ca	мг кг ^{−1}	−3.08	3.08	4703	5374	407	630	5049	626	<0.01
Mg		0.20	−0.20	395	390	79	61	392	69	0.84
K		1.58	−1.58	582	492	173	146	536	163	0.11
Al		0.35	−0.35	599	570	230	252	584	239	0.73
Fe		0.45	−0.45	387	362	168	156	374	160	0.65
Mn		−1.62	1.62	322	366	81	71	344	78	0.10
Zn		0.38	−0.38	500	457	358	279	479	317	0.70
Ni		0.52	−0.52	416	379	220	190	397	202	0.60
Cu		1.15	−1.15	88	70	58	31	79	46	0.25
S		0.35	−0.35	605	588	128	156	597	141	0.72
P		1.58	−1.58	271	246	36	52	258	46	0.11
N		−0.18	0.18	2950	2996	690	779	2974	726	0.86
C _{орг}	%	0.30	−0.30	56	55	4	5	56	4	0.77
C/N		0.22	−0.22	200	196	55	53	198	53	0.82
C/P		−1.65	1.65	2097	2332	331	453	2218	410	0.10
N/P		−1.53	1.53	11	12	3	3	12	3	0.13

Примечание: МК – межкروновые пространства, ПК – подкroновые пространства, p – вероятность ошибки 1-го рода.

В дефолирующих сосновых лесах пространственное варьирование наиболее ярко выражено для Ca и P ($R^2 = 0.4-0.5$), Mg, Mn, K, N и соотношения C/P ($R^2 = 0.2-0.3$) и практически не проявляется для S и соотношения C/N (табл. 1). Опад хвои в подкروновых пространствах характеризуется более высоким содержанием Ca, Mg, K, Mn, P, N и S ($p < 0.05$) (табл. 3), что связано с их интенсивным поступлением с кроновыми и стволовыми водами в результате выщелачивания элементов питания из крон деревьев (Ca, Mg, K, Mn, P) и поступления с кислотными атмосферными осадками (S). Соотношения C/N и C/P выше в межкروновых пространствах ($p < 0.05$) (табл. 3) за счет меньшей концентрации P при сходном с подкроновыми пространствами содержании C в опаде. Содержание общего P в опаде сосны обыкновенной в условиях породного отвала (на рекультивированных территориях размещения вскрышных пород угольного разреза) также достигало максимума в подкроновых и прикroновых зонах сомкнутых насаждений (Колмогорова, Уфимцев, 2018).

В техногенных редколесьях пространственное варьирование наиболее ярко выражено только для Ca ($R^2 = 0.3$), содержание которого в хвойном опаде выше под кронами деревьев ($p < 0.05$) (табл. 3), что может быть связано с интенсивным выщелачиванием Ca из хвои с последующим поступлением его с осадками в опад. Отсутствие различий в содержании других элементов и их соотношений в основном редколесье можно объяснить большой сквозистостью крон из-за их повреждения.

Сезонная изменчивость химического состава опада хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии. В сосняках фоновых условий сезонная изменчивость проявилась наибольшим образом для Mn и Fe ($R^2 = 0.5-0.6$), в наименьшей степени – для P, Cu, Zn, Ca и соотношения C/P ($R^2 = 0.2-0.3$) и почти не проявилась для S (табл. 1). Растительный материал, отобранный после холодного периода (октябрь-май), отличается высоким содержанием Fe, Zn, Cu, P и S, тогда как после теплого периода (июнь-сентябрь) характеризуется высокими концентрациями Ca и Mn и более высоким соотношением C/P ($p < 0.05$) (табл. 4). В литературных источниках показано, что опад лиственницы, отобранный весной, был на 10% обогащен N и на 40% обеднен Ca по сравнению с опадом, отобранным осенью (Чульдиев, 2017). В лесах Финляндии наблюдалось два основных периода поступления C и N с опадом сосны обыкновенной в почву: май-октябрь и ноябрь-апрель, причем в первый период поступление было выше с максимумом в сентябре (Portillo-Estrada et al., 2013). В сосняках Польши показано, что содержание Mn и Zn в опаде хвои сосны в 2007 г. было выше осенью, тогда как в 2009 –

весной (Jonczak, Parzych, 2014). В исследовании финских ученых (Rautio et al., 1998b) хвоя сосны первого года на российской территории так же, как и в нашем случае, отличалась высоким содержанием Fe, Cu, P и S весной и Ca и Mn – осенью. Следует заметить, что повышение содержания Zn, Fe в опаде хвои за зимний период не соответствует закономерностям, отмечаемым для живой хвои в фоновых условиях Кольского п-ова: содержание цинка и железа в живой хвое 2 года было выше в августе по сравнению с июнем (Лукина, Никонов, 1996).

В дефолирующих сосновых лесах сезонная изменчивость более ярко выражена для содержания Ni, Fe, Cu, Mn, Zn ($R^2 = 0.4-0.9$), Ca, Al и соотношения N/P ($R^2 = 0.2$) (табл. 1). Хвойный опад холодного периода года характеризуется более высокими концентрациями Al, Fe, Zn, Ni, Cu и широким отношением N/P, опад теплого периода, как и в фоновых условиях, отличается высоким содержанием Ca и Mn ($p < 0.05$) (табл. 4). Повышение содержания элементов питания в опаде, отбираемом после периода вегетации, обусловлено тем, что в теплый период поглощение элементов из почвы и их перераспределение внутри дерева более активно. Не способные к ретранслокации внутри деревьев Ca и Mn, накопленные за теплый сезон, остаются в опадающей хвое в фоновых условиях и в дефолирующих сосняках, что соответствует закономерностям, отмеченным для живой хвои (Лукина, Никонов, 1996).

В техногенных редколесьях сезонные различия проявились наибольшим образом для Ni, Zn, Cu, Fe ($R^2 = 0.4-0.7$), в меньшей степени – для Mn, Mg и K ($R^2 = 0.3$) (табл. 1). Опад хвои холодного периода года содержит больше Fe, Zn, Ni и Cu, теплого периода – больше Mg, K и Mn ($p < 0.05$) (табл. 4), тогда как в живой хвое K и Mg проявляют подвижность, и их содержание снижается в конце лета (Лукина, Никонов, 1996). Накопление K и Mg к концу вегетационного сезона может свидетельствовать о нарушении процессов ретранслокации в условиях загрязнения (Nieminen, Helmisaari, 1996).

Значительное (почти в два раза) снижение содержания Fe и Zn в опаде после завершения вегетационного периода во всех изученных сосняках и Ni и Cu ($p < 0.05$) (табл. 4) – в сосняках, подверженных воздушному загрязнению, не характерно для стареющей, но еще живой хвои. Это может объясняться возможным антагонизмом с ионами Mn (Лукина и др., 2008) в фоне, а в условиях аэротехногенного загрязнения дополняется выщелачиванием и смывом с поверхности хвои в летний период подкисленными осадками.

Таблица 4. Сезонная изменчивость химического состава опада хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях депрессии

Параметр		v-критерий		Среднее по периоду		Стандартное отклонение по периоду		Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p
		ХП	ТП	ХП	ТП	ХП	ТП			
Фон (N = 13–20)										
Ca	мг кг ^{−1}	−2.64	2.64	3675	4402	455	842	4103	788	0.01
Mg		−0.03	0.03	394	394	64	60	394	61	0.98
K		−0.20	0.20	643	655	241	130	650	180	0.84
Al		1.29	−1.29	386	354	48	83	367	71	0.20
Fe		4.01	−4.01	181	90	65	29	128	65	<0.01
Mn		−4.35	4.35	846	1096	149	71	993	166	0
Zn		2.59	−2.59	1547	711	1196	370	1051	899	0.01
Ni		0.35	−0.35	4	3	2	3	3	2	0.72
Cu		2.91	−2.91	3	2	1	1	2	1	<0.01
S		2.14	−2.14	289	150	183	171	207	187	0.03
P		3.11	−3.11	355	266	99	40	303	82	<0.01
N		1.64	−1.64	3666	3006	1397	890	3278	1155	0.10
C _{опр}	%	−0.55	0.55	56	57	5	4	57	4	0.58
C/N		−0.75	0.75	191	229	117	162	213	144	0.46
C/P		−2.78	2.78	1710	2189	515	378	1992	494	0.01
N/P		−0.83	0.83	10	12	3	4	11	4	0.41
Дефолирующие леса (N = 12–20)										
Ca	мг кг ^{−1}	−2.44	2.44	3496	4038	449	607	3835	607	0.01
Mg		1.02	−1.02	289	269	68	42	277	53	0.31
K		0.17	−0.17	560	552	205	71	555	134	0.86
Al		2.31	−2.31	659	529	145	142	578	155	0.02
Fe		4.78	−4.78	364	143	106	21	226	127	0
Mn		−3.97	3.97	654	837	120	67	768	127	<0.01
Zn		3.46	−3.46	1283	618	644	190	867	526	<0.01
Ni		5.20	−5.20	97	53	11	7	70	23	0
Cu		4.53	−4.53	26	16	5	2	20	6	0
S		1.95	−1.95	495	361	176	179	411	187	0.05
P		−0.58	0.58	348	359	62	47	355	53	0.56
N		1.87	−1.87	3922	3277	1262	611	3519	946	0.06
C _{опр}	%	−1.59	1.59	54	58	3	8	57	7	0.11
C/N		−1.39	1.39	156	185	68	48	174	57	0.16
C/P		−0.50	0.50	1599	1647	232	288	1629	265	0.62
N/P		2.46	−2.46	11	9	3	2	10	2	0.01

Таблица 4. Окончание

Параметр		v-критерий		Среднее по периоду		Стандартное отклонение по периоду		Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p
		ХП	ТП	ХП	ТП	ХП	ТП			
Техногенные редколесья (N = 12–20)										
Ca	мг кг ^{−1}	−1.42	1.42	4857	5174	651	592	5049	626	0.16
Mg		−3.31	3.31	343	424	49	62	392	69	<0.01
K		−2.87	2.87	435	602	130	151	536	163	<0.01
Al		0.32	−0.32	601	574	208	261	584	239	0.75
Fe		3.70	−3.70	502	292	156	96	374	160	<0.01
Mn		−3.33	3.33	288	381	74	57	344	78	<0.01
Zn		4.48	−4.48	802	284	260	135	479	317	0
Ni		4.62	−4.62	599	266	169	70	397	202	0
Cu		3.86	−3.86	117	54	53	11	79	46	<0.01
S		−0.65	0.65	577	609	145	141	597	141	0.52
P		1.73	−1.73	275	247	49	41	258	46	0.08
N		1.81	−1.81	3258	2789	921	511	2974	726	0.07
C _{орг}	%	1.11	−1.11	57	55	3	5	56	4	0.27
C/N		−0.94	0.94	188	205	56	51	198	53	0.35
C/P		−1.16	1.16	2115	2285	356	437	2218	410	0.25
N/P		0.39	−0.39	12	12	3	3	12	3	0.70

Примечание: ХП — холодный учетный период года с октября по май включительно, ТП — теплый учетный период года с июня по сентябрь включительно, p — вероятность ошибки 1-го рода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздушное промышленное загрязнение оказывает значительное влияние на химический состав опада ассимилирующих органов деревьев сосны. Выявлено, что в северотаежных сосновых лесах в опаде хвои сосны обыкновенной под влиянием аэротехногенного загрязнения выбросами металлургического комбината “Североникель” снижается содержание элементов питания (Ca, Mg, Mn, Zn), увеличивается содержание тяжелых металлов (Ni, Cu), а также наблюдается расширение стехиометрических соотношений C/P и N/P, что свидетельствует о снижении качества растительного материала для разложения почвенными организмами.

Химический состав опада ассимилирующих органов сосны характеризуется значительной внутрибиогеоценотической изменчивостью как в условиях фона, так и при аэротехногенном загрязнении. В фоне под кронами деревьев хвойный опад отличается более высоким содержанием K и P, поступающих с кроновыми и стволовыми водами, а в межкروновых пространствах содержит

больше Fe, Zn, Ni и Cu, что связано с фоновым воздушным загрязнением. Более высокое содержание Ca, Mg, K, Mn, P, N и S в опаде хвои дефолирующих лесов под кронами деревьев связано с их повышенным поступлением с кроновыми и стволовыми водами в результате выщелачивания соединений элементов кислотными осадками.

Сезонная вариабельность химического состава опада хвои сосны имеет общие черты у сосняков фоновых условий и сосняков, функционирующих в условиях аэротехногенного загрязнения. Хвойный опад, поступивший в опадоуловители за теплый период (“июнь–сентябрь”), в фоновых условиях и дефолирующих лесах отличается высоким содержанием не способных к ретранслокации внутри деревьев Ca и Mn, которые накапливаются в течение вегетационного сезона. В опаде хвои деревьев сосновых редколесий отмечаются высокие концентрации Mg и K, накопление которых в конце теплого периода года может свидетельствовать о нарушении процессов ретранслокации внутри деревьев в условиях загрязнения. Значительное снижение содержания Fe и Zn в

опале после завершения вегетационного периода во всех изученных сосняках и снижение содержания Ni и Cu в сосняках в условиях воздушного загрязнения может объясняться антагонизмом между элементами и выщелачиванием и смывом с поверхности хвои в летний период подкисленными осадками.

Таким образом, аэротехногенное загрязнение способствует изменению химического состава хвойного опада в сосновых лесах северотаежной лесной зоны, сезонной изменчивости перераспределения элементов внутри деревьев и пространственных особенностей поступления элементов с опадом, что может оказывать непосредственное влияние на состояние лесных экосистем Севера и выполнение ими экосистемных функций.

Авторы благодарят Елену Александровну Белову, инженера лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, за работу по поддержке мониторинговой сети института, организацию и отбор образцов компонентов экосистем, в том числе древесного опада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева С.И., Белова Е.А., Булычев А.Г., Булычева И.А., Заколдаева А.А., Зацаринный И.В., Исаева Л.Г., Косякова А.Ю., Ларькова М.С., Лукина Н.В., Мерциев А.В., Поликарпова Н.В., Трушицына О.С., Собчук И.С., Сухарева Т.А., Хлебосолова О.А. Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки “Никель” и “Заполярный”): влияние на наземные экосистемы. Рязань: Голос губернии, 2012. 92 с.
- Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
- Бессонова В.П., Немченко М.В., Ткач В.В. Запас макроэлементов (Р, К, Са, Mg) и азота в опаде и подстилке в противоэрозионном насаждении *Robinia pseudoacacia* L. // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2017. Вып. № 1(23.1). Ч. 1. Сельскохозяйственные науки. С. 42–50.
- Боев В.А., Барановская Н.В., Боев В.В. Ртуть в листовом опаде подтаежных лесов на фоновой территории // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 8. С. 124–131.
- Воробьева Л.А. Химический анализ почв: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.
- Еришов В.В., Лукина Н.В., Данилова М.А., Исаева Л.Г., Сухарева Т.А., Смирнов В.Э. Оценка состава дождевых выпадений в хвойных лесах на северном пределе распространения при аэротехногенном загрязнении // Экология. 2020. № 4. С. 265–274.
- Иванова Е.А., Лукина Н.В., Данилова М.А., Артемкина Н.А., Смирнов В.Э., Еришов В.В., Исаева Л.Г. Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения // Лесоведение. 2019. № 6. С. 533–546.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Колмогорова Е.Ю., Уфимцев В.И. Некоторые особенности химического состава опада сосны обыкновенной, произрастающей в условиях породного отвала // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. Ч. 2. С. 267–272.
- Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения: в 2-х ч. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с.; Ч. 2. 192 с.
- Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
- Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. М.: Наука, 2005. 245 с.
- Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С., Бельский Е.А., Беспалова А.Ю., Головченко А.В., Горбачева Т.Т., Добровольская Т.Г., Добровольский В.В., Зукерт Н.В., Исаева Л.Г., Лапенис А.Г., Максимова И.А., Марфенина О.Е., Паникова А.Н., Пинский Д.Л., Полянская Л.М., Стайннес Е., Уткин А.И., Фронтасьева М.В., Цибульский В.В., Чернов И.Ю., Яценко-Хмелевская М.А. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.
- Осипов А.Ф. Запасы и потоки органического углерода в экосистеме спелого сосняка черничного средней тайги // Сибирский лесной журн. 2017. № 2. С. 70–80.
- Решетникова Т.В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 74–81.
- Сазонова Т.А., Придача В.Б., Теребова Е.Н., Шредерс С.М., Колосова С.В., Таланова Т.Ю. Морфофизиологическая реакция деревьев сосны обыкновенной на промышленное загрязнение // Лесоведение. 2005. № 3. С. 11–19.
- Сухарева Т.А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия ВУЗов. Лесной журн. 2013. № 6(336). С. 19–28.
- Сухарева Т.А., Лукина Н.В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104.
- Тарханов С.Н. Поврежденность хвойных древостоев устья и дельты Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1(3). С. 394–399.
- Уфимцев В.И., Егорова И.Н. Роль растительного опада в формировании фитогенных полей сосны обыкновенной на техногенных элювиях Кузбасса // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 116–120.
- Цветков В.Ф., Цветков И.В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. Архангельск: Изд-во Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, 2012. 312 с.

- Чульдиене Д., Алейниковиене Ю., Мурашкиене М., Марозас В., Армолайтис К. Распад и сохранность органических соединений и питательных элементов в листовном опаде после зимнего сезона под лесопосадками лиственных европейской, бука обыкновенного и дуба красного в Литве // Почвоведение. 2017. № 1. С. 56–63.
- Юсупов И.А., Залесов С.В., Шавнин С.А., Луганский Н.А. Особенности динамики и структуры древесного опада в сосновых молодняках в зоне действия аэропромвыбросов на Среднем Урале // Леса Урала и хозяйство в них: сб. науч. тр. Екатеринбург: Изд-во УГЛТА. 1995. Вып. 18. С. 59–74.
- Ярмишко В.Т., Лянгузова И.В. Многолетняя динамика параметров и состояния хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере // Известия СПбЛТА. 2013. № 2(203). С. 30–46.
- Aponte C., García L.V., Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence // Forest Ecology and Management. 2013. V. 309. P. 36–46.
- Becker H., Aosaar J., Varik M., Morozov G., Aun K., Mander Ü., Soosaar K., Uri V. Annual net nitrogen mineralization and litter flux in well-drained downy birch, Norway spruce and Scots pine forest ecosystems // Silva Fennica. 2018. V. 52. № 4. Article id 10013. 18 p. <https://doi.org/10.14214/sf.10013> (February 25, 2021).
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // Forest Ecology and Management. 2000. V. 133. P. 13–22.
- Berg B., McClaugherty C. Plant Litter – Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 340 p.
- Chavez-Vergara B., Merino A., Vázquez-Marrufo G., García-Oliva F. Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico // Geoderma. 2014. V. 235–236. P. 133–145.
- De Marco A., Vittozzi P., Rutigliano F.A., Virzo de Santo A. Nutrient dynamics during decomposition of four different pine litters // Proceedings of the International Workshop MEDPINE 3: Conservation, Regeneration and Restoration of Mediterranean Pines and Their Ecosystems. Bari: CIHEAM, 2007. P. 73–77.
- Husson F., Le S., Pages J. Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R. 2nd ed. London: Chapman & Hall/CRC Press. 2017. 248 p.
- Jonczak J., Parzych A. The content of heavy metals in the soil and litterfall in a beech-pine-spruce stand in northern Poland // Archives of environmental protection. 2014. V. 40. № 4. P. 67–77.
- Kiikkilä O. Heavy-metal pollution and remediation of forest soil around the Harjavalta Cu-Ni smelter, in SW Finland // Silva Fennica. 2003. V. 37. № 3. P. 399–415.
- Kopáček J., Cudlín P., Svoboda M., Chmelikova E., Kaňa J., Píček T. Composition of Norway spruce litter and foliage in atmospherically acidified and nitrogen-saturated Bohemian Forest stands, Czech Republic // Boreal Environment Research. 2010. V. 15. № 4. P. 413–426.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Smirnov V.E., Belova E.A. 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. 2017. V. 24. Iss. 24. P. 19874–19887.
- Meier I.C., Leuschner Ch., Hertel D. Nutrient return with leaf litter fall in *Fagus sylvatica* forests across a soil fertility gradient // Plant Ecology. 2005. V. 177. Iss. 1. P. 99–112.
- Moore T.R., Trofymow J.A., Prescott C.E., Fyles J., Titus B.D. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests // Ecosystems. 2006. V. 9. № 1. P. 46–62.
- Neumann M., Ukonmaanaho L., Johnson J., Benham S., Vesterdal L., Novotný R., Verstraeten A., Lundin L., Thimonier A., Michopoulos P., Hasenauer H. Quantifying carbon and nutrient input from litterfall in European forests using field observations and modeling // Global Biogeochemical Cycles. 2018. V. 32. № 5. P. 784–798.
- Nieminén, T., Helmisaari H.-S. Nutrient retranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient // Tree Physiology. 1996. V. 16. Iss. 10. P. 825–831.
- Portillo-Estrada M., Korhonen J., Pihlatie M., Pumpanen J., Frumau A., Morillas L., Tosens T., Niinemets Ü. Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests // Annals of Forest Science. 2013. V. 70. Iss. 4. P. 367–379.
- Preston C.M., Bhatti J.S., Flanagan L.B., Norris C. Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the Canadian boreal forest transect case study // Climatic Change. 2006. V. 74. P. 233–251.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2017. URL: <http://www.R-project.org>
- Rahman M.M., Tsukamoto J., Rahman M.M., Yoneyama A., Mostafa K.M. Lignin and its effects on litter decomposition in forests ecosystems // Chemistry & Ecology. 2013. V. 29. Iss. 6. P. 540–553.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J. Effects of sulphur and heavy metal deposition on foliar chemistry of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula // Chemosphere. 1998a. V. 36. Iss. 4. P. 979–984.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J. Seasonal foliar chemistry of northern Scots pines under sulphur and heavy metal pollution // Chemosphere. 1998b. V. 37. Iss. 2. P. 271–287.
- Steinnes E., Lukina N., Nikonov V., Aamlid D., Røyset O. A gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula // Environmental Monitoring and Assessment. 2000. V. 60. Iss. 1. P. 71–88.
- Trap J., Hättenschwiler S., Gattin I., Aubert M. Forest ageing: an unexpected driver of beech leaf litter quality variability in European forests with strong consequences on soil processes // Forest Ecology and Management. 2013. V. 302. P. 338–345.
- Tu L.-H., Hu H.-L., Chen G., Peng Y., Xiao Y.-L., Hu T.-X., Zhang J., Li X.-W., Liu L., Tang Y. Nitrogen addition significantly affects forest litter decomposition under high levels of ambient nitrogen deposition // PLoS ONE. 2014. V. 9. Iss. 2. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088752> (February 25, 2021).

Ukonmaanaho L., Merila P., Nöjd P., Nieminen T.M. Litter-fall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland // *Boreal Environment Research*. 2008. V. 13 (Suppl. B). P. 67–91.

Ukonmaanaho L., Pitman R., Bastrup-Birk A., Breda N., Rautio P. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests // Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Eberswald. 2016. 15 p.

Vacek S., Vacek Z., Bílek L., Simon J., Remeš J., Hůnová I., Král J., Putalová T., Mikeska M. Structure, regeneration and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution // *Silva Fennica*. 2016. V. 50. № 4. Article id 1564. 21 p. <https://doi.org/10.14214/sf.1564> (February 25, 2021).

Vesterdal L., Elberling B., Christiansen J.R., Callesen I., Schmidt I.K. Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species // *Forest Ecology and Management*. 2012. V. 264. P. 185–196.

Wardle D.A., Nilsson M.-C., Zackrisson O., Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. V. 35. Iss. 6. P. 827–835.

Wood T.E., Lawrence D., Clark D.A. Determinants of leaf litter nutrient cycling in a tropical rain forest: soil fertility versus topography // *Ecosystems*. 2006. V. 9. № 5. P. 700–710.

Wood T.E., Lawrence D., Clark D.A., Chazdon R.L. Rain forest nutrient cycling and productivity in response to large-scale litter manipulation // *Ecology*. 2009. V. 90. № 1. P. 109–121.

Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // *J. Plant Ecology*. 2008. V. 1. Iss. 2. P. 85–93.

Industrial Airborne Pollution's Impact on the Chemical Composition of Pine's Needles in Forests on the Northern Boundaries of Its Areal

Ye. A. Ivanova¹, *, N. V. Lukina², V. E. Smirnov², and L. G. Isayeva¹

¹*Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Akademgorodok st., 14a, Apatity, Murmansk Oblast, 184209 Russia*

²*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997 Russia*

E-mail: ea.ivanova@ksc.ru

The chemical composition of Scots pine needles litter in northern taiga pine forests was assessed in northern tundra pine forests and under the influence of airborne pollution by emissions from the “Severonikel” copper-nickel plant. Coniferous litter in forests, exposed to air pollution, has the content of nutrients (Ca, Mg, Mn, Zn) decreases, while the content of heavy metals (Ni, Cu) and the stoichiometric C/P and N/P ratios increase. This indicates a decrease in the quality of plant material for decomposition by soil biota. Intra-biogeocenotic differences in the chemical composition of needle litter under normal conditions are manifested in a higher content of K and P in it, supplied with crown and stem waters under the crowns, while in the inter-crown spaces, the contents of Fe, Zn, Ni, and Cu are higher due to background airborne pollution. In defoliating forests, coniferous litter under tree crowns contains more Ca, Mg, K, Mn, P, N, and S due to the intensive leaching of nutrients from tree crowns by acid precipitation and, as in the case of S, from acid precipitation. The increased contents of N, P, and K in the litter of needles of defoliating forests may be associated with high concentrations of these mobile elements in living needles, falling off before normal phenological terms. Seasonal variability of the needle litter chemical composition under normal conditions and in defoliating forests is manifested in a high content of Ca and Mn in needles, which accumulate by the end of the warm season. In man-made sparse forests the needle litter accumulates Mg and K by the end of the growing season, which indicates a violation of the retranslocation processes under the conditions of pollution. A significant decrease in the content of Fe and Zn in litter by the end of the warm season in all the studied pine forests, as well as the content of Ni and Cu in pine forests under the conditions of airborne pollution can be explained by the antagonism with Mn and leaching from needles during the warm period by acidified precipitation.

Keywords: coniferous litter, chemical composition, pine forests, airborne technogenic pollution, intra-biogeocenotic variability, seasonal variability.

Acknowledgements: The study has been carried out within the framework of the State contract with the Institute of Industrial Ecology Problems of the North № 0226-2018-0111 (AAAA-A18-118021490070-5).

REFERENCES

Anan'eva S.I., Belova E.A., Bulychev A.G., Bulycheva I.A., Zakoldaeva A.A., Zatsarinnyi I.V., Isaeva L.G., Kosyakova A.Y., Lar'kova M.S., Lukina N.V., Mershchiev A.V., Po-

likarpova N.V., Trushitsyna O.S., Sobchuk I.S., Sukhareva T.A., Khlebosolova O.A., *Kol'skaya gorno-metallurgicheskaya kompaniya (promyshlennye ploshchadki “Nikel” i “Zapolyarnyi”): vliyaniye na nazemnyye ekosistemy* (Kola Mining and Metallurgical Company (industrial sites

- "Nickel" and "Zapolyarny"): impact on terrestrial ecosystems), Ryazan: Golos gubernii, 2012, 92 p.
- Aponte C., García L.V., Marañón T., Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 309, pp. 36–46.
- Barber S.A., *Biologicheskaya dostupnost' pitatel'nykh veshchestv v pochve. Mekhanisticheskii podkhod* (Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach), Moscow: Agropromizdat, 1988, 375 p.
- Becker H., Aosaar J., Varik M., Morozov G., Aun K., Mander Ü., Soosaar K., Uri V., Annual net nitrogen mineralization and litter flux in well-drained downy birch, Norway spruce and Scots pine forest ecosystems, *Silva Fennica*, 2018, Vol. 52, No. 4, Article id 10013, 18 p. Available at: <https://doi.org/10.14214/sf.10013> (February 25, 2021).
- Berg B., Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils, *Forest Ecology and Management*, 2000, Vol. 133, pp. 13–22.
- Berg B., McClaugherty C., *Plant Litter – Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*, Germany Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 340 p.
- Bessonova V.P., Nemchenko M.V., Tkach V.V., Zapas makroelementov (P, K, Ca, Mg) i azota v opade i podstilke v protivoerozionnom nasazhdenii *Robinia pseudoacacia* L. (Stock of macroelements (P, K, Ca, Mg) and of nitrogen in litter fall and bedding in the antierosion stands robinia pseudoacacia lstock of macroelements (P, K, Ca, Mg) and of nitrogen in litter fall and bedding in the antierosion stands *Robinia pseudoacacia* L.), *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, Sel'skokhozyaistvennye nauki*, 2017, Vol. 1(23.1), Part 1, pp. 42–50.
- Boev V.A., Baranovskaya N.V., Boev V.V., Rtut' v listvom opade podtaezhnykh лесов на fonovoi territorii (Mercury in leaf litter of subtaiga forests on the natural territory), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Inzhiniring georesursov*, 2018, Vol. 329, No. 8, pp. 124–131.
- Chavez-Vergara B., Merino A., Vázquez-Marrufo G., García-Oliva F., Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico, *Geoderma*, 2014, Vol. 235–236, pp. 133–145.
- Chul'diene D., Aleinikoviene Y., Murashkiene M., Marozas V., Armolaitis K., Raspad i sokhrannost' organicheskikh soedinenii i pitatel'nykh elementov v listvennom opade posle zimnego sezona pod lesoposadkami listvennitsy evropeiskoi, buka obyknovennogo i duba krasnogo v Litve (Decay and preservation of organic compounds and nutrients in deciduous litter after the winter season under forest plantations of European larch, common beech and red oak in Lithuania), *Pochvovedenie*, 2017, No. 1, pp. 56–63.
- De Marco A., Vittozzi P., Rutigliano F.A., Virzo de Santo A., Nutrient dynamics during decomposition of four different pine litters, *Proceedings of the International Workshop MEDPINE 3: Conservation, Regeneration and Restoration of Mediterranean Pines and Their Ecosystems*, Bari: CIHEAM, 2007, pp. 73–77.
- Ershov V.V., Isaeva L.G., Sukhareva T.A., Lukina N.V., Danilova M.A., Smirnov V.E., Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the northern tree line subject to air pollution, *Russian J. Ecology*, 2020, Vol. 51, No. 4, pp. 319–328.
- Husson F., Le S., Pages J., *Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R*, London: Chapman & Hall/CRC Press, 2017, 248 p.
- Ivanova E.A., Lukina N.V., Danilova M.A., Artemkina N.A., Smirnov V.E., Ershov V.V., Isaeva L.G., Vliyanie aerotekhnogenogo zagryazneniya na skorost' razlozheniya rastitel'nykh ostatkov v osnovnykh lesakh na severnom predele rasprostraneniya (The effect of air pollution on the rate of decomposition of plant litter at the northern limit of pine forests), *Lesovedenie*, 2019, No. 6, pp. 533–546.
- Jonczak J., Parzych A., The content of heavy metals in the soil and litterfall in a beech-pine-spruce stand in northern Poland, *Archives of environmental protection*, 2014, Vol. 40, No. 4, pp. 67–77.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* (Trace elements in soil & plants), Moscow: Mir, 1989, 440 p.
- Kiikkilä O., Heavy-metal pollution and remediation of forest soil around the Harjavalta Cu-Ni smelter, in SW Finland, *Silva Fennica*, 2003, Vol. 37, No. 3, pp. 399–415.
- Kolmogorova E.Y., Ufimtsev V.I., Nekotorye osobennosti khimicheskogo sostava opada sosny obyknovennoi, proizrastayushchei v usloviyakh porodnogo otvala (Some peculiarities of the chemical composition of Scotch pine debris, growing under conditions of coal pit), *Uspekhi sovremennoy estestvoznaniya*, 2018, No. 11-2, pp. 267–272.
- Kopáček J., Cudlín P., Svoboda M., Chmelikova E., Kaňa J., Pícek T., Composition of Norway spruce litter and foliage in atmospherically acidified and nitrogen-saturated Bohemian Forest stands, Czech Republic, *Boreal Environment Research*, 2010, Vol. 15, No. 4, pp. 413–426.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., *Biogekhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya* (Biogeochemical cycles in the Northern forests subjected to air pollution), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1996, Vol. 1, 216 p.; Vol. 2, 194 p.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., *Pitel'nyi rezhim lesov severnoi taigi: prirodnye i tekhnogennye aspekty* (Nutrient status of north taiga forests), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1998, 316 p.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Smirnov V.E., Belova E.A., 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*, 2017, Vol. 24, Issue 24, pp. 19874–19887.
- Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A., *Pitel'nyi rezhim pochv severotaezhnykh лесов* (Nutritional regime of the north taiga soils), Moscow: Nauka, 2008, 342 p.
- Lukina N.V., Sukhareva T.A., Isaeva L.G., *Tekhnogennyye digressii i vosstanovitel'nye suksessii v severotaezhnykh lesakh* (Technogenic digression and secondary successions in the northern taiga forests), Moscow: Nauka, 2005, 245 p.
- Meier I.C., Leuschner Ch., Hertel D., Nutrient return with leaf litter fall in *Fagus sylvatica* forests across a soil fertility gradient, *Plant Ecology*, 2005, Vol. 177, Issue 1, pp. 99–112.
- Moore T.R., Trofymow J.A., Prescott C.E., Fyles J., Titus B.D., Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dy-

- namics in decomposing foliar litter in Canadian forests, *Ecosystems*, 2006, Vol. 9, No. 1, pp. 46–62.
- Neumann M., Ukonmaanaho L., Johnson J., Benham S., Vesterdal L., Novotný R., Verstraeten A., Lundin L., Thimonier A., Michopoulos P., Hasenauer H., Quantifying carbon and nutrient input from litterfall in European forests using field observations and modeling, *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, Vol. 32, No. 5, pp. 784–798.
- Nieminén, T., Helmisaari H.-S., Nutrient retranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient, *Tree Physiology*, 1996, Vol. 16, Issue 10, pp. 825–831.
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Bezel' V.S., Bel'skii E.A., Bessalova A.Y., Golovchenko A.V., Gorbacheva T.T., Dobrovol'skaya T.G., Dobrovol'skii V.V., Zukert N.V., Isaeva L.G., Lapenis A.G., Maksimova I.A., Marfenina O.E., Panikova A.N., Pinskii D.L., Polyanskaya L.M., Stainnes E., Utkin A.I., Frontas'eva M.V., Tsubul'skii V.V., Chernov I.Y., Yatsenko-Khmelevskaya M.A., *Rasseyannyye elementy v boreal'nykh lesakh* (Sparse elements in boreal forests), Moscow: Nauka, 2004, 616 p.
- Osipov A.F., Zapasy i potoki organicheskogo ugleroda v ekosisteme spelogo sosnyaka chernichnogo srednei taigi (Stocks and fluxes of organic carbon in the ecosystem of mature bilberry pine forest of the middle taiga), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 2, pp. 70–80.
- Portillo-Estrada M., Korhonen J., Pihlatie M., Pumpanen J., Frumau A., Morillas L., Tosens T., Niinemets Ü., Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests, *Annals of Forest Science*, 2013, Vol. 70, Issue 4, pp. 367–379.
- Preston C.M., Bhatti J.S., Flanagan L.B., Norris C., Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the Canadian boreal forest transect case study, *Climatic Change*, 2006, Vol. 74, pp. 233–251.
- R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017. Available at: <http://www.R-project.org>
- Rahman M.M., Tsukamoto J., Rahman M.M., Yoneyama A., Mostafa K.M., Lignin and its effects on litter decomposition in forests ecosystems, *Chemistry & Ecology*, 2013, Vol. 29, Issue 6, pp. 540–553.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J., Effects of sulphur and heavy metal deposition on foliar chemistry of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula, *Chemosphere*, 1998a, Vol. 36, Issue 4, pp. 979–984.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J., Seasonal foliar chemistry of northern Scots pines under sulphur and heavy metal pollution, *Chemosphere*, 1998b, Vol. 37, Issue. 2, pp. 271–287.
- Reshetnikova T.V., Lesnye podstilki kak depo biogennykh elementov (Forest litters as the biogenic element depo), *Vestnik KrasGAU*, 2011, No. 12, pp. 74–81.
- Sazonova T.A., Pridacha V.B., Terebova E.N., Shreders S.M., Kolosova S.V., Talanova T.Y., Morfofiziologicheskaya reaktsiya derev'ev sosny obyknovЕННОI na promyshlennoe zagryaznenie (Morphophysiological response of Scots pine trees to industrial pollution), *Lesovedenie*, 2005, No. 3, pp. 11–19.
- Steinnes E., Lukina N., Nikonov V., Aamlid D., Røyset O., A gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, Vol. 60, Issue 1, pp. 71–88.
- Sukhareva T.A., Lukina N.V., Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula, *Russian J. Ecology*, 2014, Vol. 45, No. 2, pp. 95–102.
- Sukhareva T.A., Prostranstvenno-vremennaya dinamika mikroelementnogo sostava khvoynykh derev'ev i pochvy v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya (Spatio-temporal dynamics of microelement composition of conifers and soils under industrial pollution), *Izvestiya VUZov. Lesnoi zhurnal*, 2013, No. 6(336), pp. 19–28.
- Tarkhanov S.N., Povrezhdennost' khvoynykh drevostoev ust'ya i del'ty Severnoi Dviny v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya (Damaged coniferous forest stands of Northern Dvina mouth and deltas in conditions of atmospheric pollution), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2009, Vol. 11, No. 1(3), pp. 394–399.
- Trap J., Hättenschwiler S., Gattin I., Aubert M., Forest ageing: an unexpected driver of beech leaf litter quality variability in European forests with strong consequences on soil processes, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 302, pp. 338–345.
- Tsvetkov V.F., Tsvetkov I.V., *Promyshlennoe zagryaznenie okruzhayushchei sredy i les* (Industrial pollution of environment and forest), Arkhangelsk: Izd-vo SAFU, 2012, 312 p.
- Tu L.-H., Hu H.-L., Chen G., Peng Y., Xiao Y.-L., Hu T.-X., Zhang J., Li X.-W., Liu L., Tang Y., Nitrogen addition significantly affects forest litter decomposition under high levels of ambient nitrogen deposition, *PLoS ONE*, 2014, Vol. 9, Issue. 2. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088752> (February 25, 2021).
- Ufimtsev V.I., Egorova I.N., Rol' rastitel'nogo opada v formirovaniy fitogennykh polei sosny obyknovЕННОI na tekhnogennykh elyuviyakh Kuzbassa (Role of the vegetable debris in formation of phytogenous fields of the Scots pine on technogenic eluviums of Kuzbass), *Uspekhi sovremenno-goe estestvoznaniya*, 2016, No. 4, pp. 116–120.
- Ukonmaanaho L., Merila P., Nöjd P., Nieminén T.M., Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland, *Boreal Environment Research*, 2008, Vol. 13 (Suppl. B), pp. 67–91.
- Ukonmaanaho L., Pitman R., Bastrup-Birk A., Breda N., Rautio P., *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*, Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Eberswald, 2016, 15 p.
- Vacek S., Vacek Z., Bílek L., Simon J., Remeš J., Hůnová I., Král J., Putalová T., Mikeska M., Structure, regeneration and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution, *Silva Fennica*, 2016, Vol. 50, No. 4, Article id 1564, 21 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1564> (February 25, 2021).
- Vesterdal L., Elberling B., Christiansen J.R., Callesen I., Schmidt I.K., Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species, *Forest Ecology and Management*, 2012, Vol. 264, pp. 185–196.

- Vorob'eva L.A., *Khimicheskii analiz pochvy* (Chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1998, 271 p.
- Wardle D.A., Nilsson M.-C., Zackrisson O., Gallet C., Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest, *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, Vol. 35, Issue 6, pp. 827–835.
- Wood T.E., Lawrence D., Clark D.A., Chazdon R.L., Rain forest nutrient cycling and productivity in response to large-scale litter manipulation, *Ecology*, 2009, Vol. 90, No. 1, pp. 109–121.
- Wood T.E., Lawrence D., Clark D.A., Determinants of leaf litter nutrient cycling in a tropical rain forest: soil fertility versus topography, *Ecosystems*, 2006, Vol. 9, No. 5, pp. 700–710.
- Yarmishko V.T., Lyanguzova I.V., Mnogoletnyaya dinamika parametrov i sostoyaniya khvoi *Pinus sylvestris* L. v usloviyakh aerotekhnogenного zagryazneniya na Evropeiskom Severe (Long-term dynamics of indices and needle state of *Pinus sylvestris* L. in conditions of air industrial pollution on European North), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2013, No. 203, pp. 30–46.
- Yusupov I.A., Zalesov S.V., Shavnin S.A., Luganskii N.A., Osobennosti dinamiki i struktury drevesnogo opada v sosnovykh molodnyakakh v zone deistviya aeropromvybrosov na Srednem Urale (Features of the dynamics and structure of tree litter in young pine forests in the area of airborne emissions in the Middle Urals), In: *Lesa Urala i khozyaistvo v nikh* (Forests of the Urals and forestry in them), Ekaterinburg: Izd-vo UGLTA, 1995, Vol. 18, pp. 59–74.
- Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G., Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors, *J. Plant Ecology*, 2008, Vol. 1, Issue 2, pp. 85–93.