

DOI 10.31509/2658-607x-202363-132
УДК 630*114.351:58.072:57.042:502.055 (470.21)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА В ЕЛОВЫХ И СОСНОВЫХ ЛЕСАХ НА СЕВЕРНОМ ПРЕДЕЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

© 2023 г. Е. А. Иванова^{1,2*}, М. А. Данилова², В. Э. Смирнов², В. В. Ершов¹¹ Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Академгородок, 14а² Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

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

Поступила в редакцию 16.08.2023
После рецензирования: 19.09.2023
Принята к печати: 20.09.2023

Проведена сравнительная оценка процессов разложения растительных остатков (хвоя сосны, хвоя ели, листья бореальных кустарничков, слоевища мхов) на начальных этапах в сосняках лишайниково-кустарничковых и ельниках кустарничково-зеленомошных, формирующихся в естественных условиях на северном пределе распространения. Изучались особенности исходного состава опада, темпы разложения и изменения химического состава растительных остатков в процессе деструкции, обусловленные формацией леса. Более высокое исходное содержание $C_{орг}$ в тканях растений сосновых лесов связано с благоприятными условиями освещенности под пологом леса, тогда как высокое содержание Mn в тканях растений напочвенного покрова в ельниках обусловлено непосредственным влиянием богатого этим элементом питания опада хвои ели. Результаты исследования наглядно продемонстрировали, что формация леса оказывает значительное влияние как на исходное качество опада одних и тех же видов растений, так и на скорость разложения: хвоя ели и листья брусники с более высоким содержанием элементов питания (Mg, Mn, P) и узкими соотношениями элементов (C:N, C:P) в еловом лесу характеризовались и более активными процессами разложения. Однако опад зеленых мхов, несмотря на более высокое качество в ельниках, разлагался активнее в сосновых лесах, что может быть связано с большим количеством осадков в сосновых лесах. Таким образом, на различия в скорости разложения растительных остатков влияет сочетание качества растительного материала, температурного режима и количества осадков, связанных с формацией леса.

Ключевые слова: формация леса, разложение опада, растительные остатки, качество опада

Опад древесных растений и растений напочвенного покрова — листья, хвоя, почки, побеги, плоды, корни и др., отмирающие в течение определенного времени, является одним из важнейших компонентов, влияющих на формирование биогеохимических циклов лесных экосистем. Растительный опад является источником органического углерода и элементов минерального питания, которые становятся доступными для биоты в ходе его разложения и минерализации.

Скорость разложения опада и поступления углерода в почву во многом зависят от гидротермических условий почв (Кузнецов, 2010; Кузнецов, Осипов, 2011), активности и состава почвенной биоты (Воробьева, Наумова, 2009; Högberg et al., 2017), фракционного состава поступающего опада (Бобкова, 2000; Fang et al., 2015), климатических условий (температуры воздуха и количества осадков) (Pausas, 1997; Portillo-Estrada et al., 2016). По современным представлениям ведущим фактором регионального масштаба считается климат, локального — качество опада, тогда как деятельность организмов-деструкторов регулируется климатом и качеством опада (Bradford et al., 2016), определяемого концентрациями элементов питания и вторичных метаболитов. Так, на ранних стадиях разложения наибольшие эффекты оказывают N, P и водорастворимые органические соединения, на более поздних основным детерминантом динамики разложения является лигнин (Berg, 2000; Wardle

et al., 2003; Zhang et al., 2008; Rahman et al., 2013; Ларионова и др., 2017). Величина стехиометрических отношений элементов и веществ (C:N, лигнин:N) в разлагающемся опаде также связана с качеством растительного материала: чем уже отношения, тем выше скорость деструкции (Berg, McClaugherty, 2008; Rahman et al., 2013; Tu et al., 2014; Lukina et al., 2017). Исходный химический состав опада, определяющий его качество, а соответственно и процесс его разложения, проявляет видовые особенности. У четырех различных видов сосны (*Pinus pinea*, *P. laricio*, *P. sylvestris* и *P. nigra*) скорость разложения регулировалась исходным содержанием элементов питания (N, K, Mn) (De Marco et al., 2007). Хвоя сосны (*P. contorta*) по сравнению с еловой хвоей (*Picea engelmannii*) содержала больше C и N и меньше лигнина, что говорит о более высоком качестве растительного материала, однако потери углерода были выше для ели (Leonard et al., 2020). В другом исследовании показано, что опад хвои ели с более высоким содержанием элементов питания и относительно узкими отношениями C:N и лигнин:N разлагался заметно быстрее, чем опад хвои сосны, тогда как опад листьев березы повислой (*Betula pendula*) в сосновых лесах, с более низким соотношением N:P, разлагался быстрее по сравнению с опадом березы пушистой (*B. pubescens*) в ельниках (Иванова и др., 2019).

Древесные растения способны формировать типы леса со своими особенными условиями местообитания и плодородием

почв, в том числе через опад, химический состав которого влияет на микробную активность и состав почв (Рахлеева и др., 2011; Aronte et al., 2013; Chavez-Vergara et al., 2014; Колмогорова, Уфимцев, 2018; Помогайбин, Помогайбин, 2018; Цандекова, 2018). Полог древостоя в зависимости от видового состава, строения и сомкнутости крон изменяет состав атмосферных выпадений, влияет на уровень освещенности (Лукина и др., 2008; Кищенко, 2019). Лесные экосистемы на территории Мурманской области представляют собой стадии сукцессий, в ходе которых происходит смена древесных пород (сосна, ель, береза), которые на почвообразующих породах сходного состава создают разные условия среды в экосистемах. Так, ель в большей степени по сравнению с сосной подкисляет проходящие через кроны осадки, препятствует проникновению их под кроны деревьев, создавая более ярко выраженную мозаичность. Ель за счет большей сомкнутости крон препятствует проникновению солнечного света под полог леса. В еловых лесах плодородие почв значительно выше, чем в сосновых, формирующихся на тех же почвообразующих породах и позициях в рельефе (Лукина и др., 2002, 2006, 2008, 2010; Цветков, 2004; Орлова и др., 2011). Это может определять и различия в составе опада одних и тех же видов растений в различных типах леса, и оказывать влияние на скорость их разложения.

Цель данной работы — оценить влияние формации леса на исходный состав и скорость разложения опада в доминирующих в северотаежной подзоне еловых и сосновых лесах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на площадках постоянного наблюдения (ППН) в Мурманской области в сосняках лишайниково-кустарничковых (10С) на подзолах иллювиально-железистых (Rustic podzols) в 1997–1999 гг. и в ельниках зеленомошно-кустарничковых (8Е2Б) на подзолах иллювиально-гумусовых (Carbic podzols) в автоморфных условиях в 1996–1998 гг. Более подробные описания объектов исследования даны в ранних работах (Лукина, Никонов, 1996, 1998; Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019). Основными почвообразующими породами на территории исследования являются ледниковые отложения — моренные и водно-ледниковые, по гранулометрическому составу — песчаные и супесчаные (Белов, Барановская, 1969; Переверзев, 2004). В процессе сукцессии хвойных лесов при смене сосняков ельниками наблюдаются закономерности изменения химического состава почв: в еловых лесах увеличивается содержание доступных соединений биофильных элементов во всем почвенном профиле, при этом в органогенных горизонтах снижается отношение С:N и наблюдается на-

копление гумуса. В сосновых лесах органические горизонты подкроновых пространств характеризуются более высокой кислотностью, чем межкроновых, тогда как в еловых лесах наблюдается обратная картина. В минеральных горизонтах почв наблюдается увеличение содержания кислотных компонентов, в частности в иллювиальных горизонтах отмечено увеличение содержания фульвокислот на фоне снижения содержания гуминовых кислот (Орлова и др., 2011).

Эксперименты по изучению процессов разложения опада на ППН в разных типах леса проводились с соблюдением единообразия методов и статистической обработки данных. Образцы активной фракции опада (листья и хвоя) доминирующих видов сосудистых растений (*P. sylvestris*, *P. abies*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus* и *Empetrum hermaphroditum*) и образцы стареющей бурой части мхов (*Pleurozium schreberi*) отбирались в сентябре 1997 г. на мониторинговом стационаре в сосняках, в октябре 1996 г. — в ельниках.

Растительный материал (10 г сухого вещества) для разложения закладывали в пакеты из синтетического материала с размером пор 30 мкм, которые размещали на поверхности почвы (в подгоризонт L подстилки) в подкроновых и межкроновых пространствах на мониторинговых площадках. Пробы отбирались ежегодно в октябре через 1 и 2 года после начала каждого эксперимента. Всего за два пери-

ода отбора было отобрано 32 пакета в сосновых лесах и 49 — в еловых.

Перед проведением химического анализа растительный материал измельчали и подвергали мокрому озолению концентрированной HNO_3 . Концентрации металлов (Ca, Mg, K, Mn) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Aanalyst 800. Общее содержание азота определялось методом Кьельдаля, органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) — методом Тюрина, фосфора — методом колориметрии (Воробьева, 1998). Содержание лигнина определяли путем обработки пробы 72%-ной H_2SO_4 после предварительного кипячения в растворе цетилтриметиламмония бромида в 0.5-молярном растворе H_2SO_4 (Rowland, Roberts, 1994).

Расчеты проводились на абсолютно сухой вес. Потери массы рассчитывались как разница между массой образцов до закладки и через 1 или 2 года и выражались в процентах. Коэффициент обогащения, демонстрирующий изменение состава растительного материала в процессе разложения, вычислялся для каждого элемента как отношение концентрации после первого или второго года разложения к исходной. Потери элементов питания и лигнина с учетом темпов потери массы выражались в процентах и рассчитывались как разница произведений концентрации компонента на массу образца до начала эксперимента и через 1 или 2 года соответственно. Качество опада характеризо-

вали на основе содержания лигнина (вторичные метаболиты), элементов питания (N, Ca, Mg, K, P, Mn), и стехиометрических соотношений C:N, C:P, лигнин:N, N:P.

Статистический анализ данных проводился различными методами. Оценка влияния формации лесов (еловые и сосновые) на исходный химический состав растительного материала проводилась для отдельных видов растений с применением V-критерия (Husson et al., 2017) в среде статистического программирования R (R Core Team ..., 2017). При этом матрица данных по химическому составу опада была дополнена имеющимися данными по составу живых растений: хвои сосны и ели последних лет жизни, многолетних листьев брусники, вороники, многолетних и отмерших побегов зеленых мхов *P. schreberi* и *Hylocomium splendens*. Сравнение параметров разложения (потери массы и элементов, коэффициент обогащения) в сосновых и еловых лесах проводилось для каждой фракции опада (хвоя сосны и ели, листья брусники, вороники, мхи) с помощью U-теста Манна-Уитни в программе Statistica. Возможное влияние внутри- и межбиогеоценотической изменчивости температур почвы и воздуха в еловых и сосновых лесах проводилось с использованием данных, полученных в период 2015–2021 гг. с помощью температурных логгеров под кронами деревьев, в межкروновых пространствах и на деревьях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходный состав растительного материала — неразложившегося опада и еще живых растений (их многолетних частей) — характеризует качество растительного материала для последующего разложения его организмами-деструкторами.

Сравнение состава отдельных фракций опада, а также живого растительного материала соответствующих видов растений показало, что хвоя ели последних лет жизни богаче элементами питания Ca, Mg, Mn, P и характеризуется более узкими соотношениями C:P и N:P ($p < 0.05$), что подтверждает ранее полученные данные (Сухарева, Лукина, 2014), тогда как хвоя сосны характеризуется более высоким содержанием C и N (табл. 1), что согласуется с результатами других авторов (Leonard et al., 2020). При этом следует заметить, что, в отличие от ранее полученных результатов, концентрации K в данном исследовании оказались выше в многолетней хвое ели. Более высокое содержание азота в хвое сосны последних лет жизни (7-8 лет) по сравнению с 11-13-летней хвоей ели объяснялось ранее (Сухарева, Лукина, 2014) различиями в возрасте: N, как и K и P, относится к подвижным элементам питания (Helmisaari, 1990; Rautio, 1998), то есть происходит транслокация его соединений в более молодые ткани и обеднение более старой хвои. Содержание других

Таблица 1. Химический состав живых и отмерших многолетних частей растений в северотаежных сосновых и еловых лесах

Параметр	Среднее		Стандартное отклонение		Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p	n		
	Е-БГЦ	С-БГЦ	Е-БГЦ	С-БГЦ				Е-БГЦ	С-БГЦ	
Хвоя ели и сосны последних лет жизни*										
Ca	мг/кг	13 878	4077	3904	941	11 321	5497	0	51	18
Mg		674	495	249	112	628	235	0.01	51	18
K		3527	3212	604	340	3445	563	0.04	51	18
Mn		2149	977	923	295	1844	958	0	51	18
P		1139	928	243	104	1084	234	0.001	51	18
N		8805	10 162	1248	1579	9159	1459	0.001	51	18
C _{орг}	%	52	56	4	6	53	5	0.01	51	18
C:N		61	56	10	8	59	10	0.07	51	18
C:P		478	607	97	96	511	112	0	51	18
N:P		8	11	2	2	9	2	0	51	18
Брусника — многолетние листья (живые части)										
Ca	мг/кг	6535	6878	1420	1063	6699	1260	0.37	23	21
Mg		1291	1089	306	127	1195	257	0.01	23	21
K		3917	3629	482	507	3780	509	0.06	23	21
Mn		2091	1704	371	426	1907	439	0.004	23	21
P		952	725	204	81	844	194	0.0001	23	21
N		8832	8397	1716	2275	8625	1991	0.47	23	21
C _{орг}	%	51	55	3	3	53	4	0.001	23	21
C:N		60	69	10	17	64	14	0.03	23	21
C:P		556	760	106	85	653	140	0	23	21
N:P		9	12	1	3	10	2	0.002	23	21
Вороника — многолетние листья (живые части)										
Ca	мг/кг	8167	8755	1285	1455	8342	1345	0.22	26	11
Mg		2381	2710	273	300	2479	317	0.004	26	11
K		4571	3823	1279	593	4349	1163	0.07	26	11
Mn		1016	995	464	187	1009	399	0.88	26	11
P		959	1038	180	113	982	166	0.19	26	11
N		9610	10 895	2388	2900	9992	2579	0.17	26	11
C _{орг}	%	57	58	3	1	57	3	0.64	26	11
C:N		63	56	16	15	61	16	0.23	26	11
C:P		613	561	109	63	597	100	0.14	26	11
N:P		10	11	2	3	10	2	0.66	26	11

Параметр	Среднее		Стандартное отклонение		Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p	n		
	Е-БГЦ	С-БГЦ	Е-БГЦ	С-БГЦ				Е-БГЦ	С-БГЦ	
Вороника — многолетние листья (отмершие части)										
Ca	мг/кг	8132	8453	605	847	8315	744	0.43	6	8
Mg		1950	1774	332	86	1850	234	0.16	6	8
K		3106	2034	1296	293	2493	998	0.05	6	8
Mn		1212	678	293	49	907	331	0.003	6	8
P		720	1020	175	22	891	189	0.003	6	8
N		7577	9204	2685	825	8507	1959	0.12	6	8
C _{орг}	%	57	62	5	5	60	5	0.08	6	8
C:N		81	69	19	10	74	15	0.14	6	8
C:P		825	613	161	49	704	152	0.01	6	8
N:P		10	9	1	1	10	1	0.04	6	8
Мхи — живые части										
Ca	мг/кг	2519	2315	543	292	2481	508	0.38	26	6
Mg		974	743	502	80	931	461	0.27	26	6
K		5160	4280	1136	776	4995	1122	0.08	26	6
Mn		558	483	266	128	544	246	0.50	26	6
P		1168	852	268	121	1109	275	0.01	26	6
N		7338	5784	2013	728	7046	1932	0.08	26	6
C _{орг}	%	45	51	2	4	46	4	0.0001	26	6
C:N		65	91	18	18	70	20	0.01	26	6
C:P		400	616	89	120	440	127	0.0002	26	6
N:P		6	7	1	1	6	1	0.33	26	6
Мхи — отмершие части										
Ca	мг/кг	4288	4456	1129	1095	4384	1069	0.77	6	8
Mg		668	1884	139	788	1363	855	0.01	6	8
K		3434	2645	855	887	2983	932	0.12	6	8
Mn		922	615	302	135	747	264	0.03	6	8
P		952	898	135	122	922	126	0.43	6	8
N		6656	8600	497	2602	7767	2177	0.10	6	8
C _{орг}	%	45	51	4	8	49	7	0.14	6	8
C:N		69	62	8	10	65	9	0.17	6	8
C:P		485	566	82	39	531	72	0.04	6	8
N:P		7	9	2	2	8	2	0.04	6	8

Примечание: Е-БГЦ — еловый биогеоценоз; С-БГЦ — сосновый биогеоценоз; * — в Е-БГЦ представлены данные по составу хвои ели, в С-БГЦ — хвои сосны; p — вероятность ошибки 1-го рода при расчете V-критерия

подвижных элементов питания, которые относятся к элементам минерального питания — К, Р, и Mg (элементы средней подвижности), напротив, оказалось выше в хвое ели. Содержание малоподвижных элементов минерального питания, к которым относятся Са и Mn, как и ожидалось, значительно выше в стареющей хвое ели.

Многолетние живые листья брусники в ельниках, в отличие от листьев в сосняках, характеризуются достоверно более узкими соотношениями элементов (С:N, С:Р, N:Р) и более высоким содержанием элементов питания (Mg, Mn, Р), что согласуется с данными по составу листьев текущего года (Исаева, Сухарева, 2013). Однако содержание углерода выше в многолетних листьях брусники в сосновых лесах ($p < 0.05$).

Опад и материал многолетних живых органов вороники и мхов проявили отчетливые различия в химическом составе в зависимости от типа леса только в отношении Mn и С: содержание марганца выше в еловых лесах, а углерода — в сосновых. Примечательно, что живая стареющая хвоя сосны также содержит больше углерода, чем еловая, которая оказалась богата марганцем. Известно, что ассимилирующие органы сосны обыкновенной показывают более высокую интенсивность процессов фотосинтеза по сравнению с еловыми (Тужилкина, 1984; Суворова, 2006; Молчанов, 2020; Yang et al., 2020). Более высокое содержание углерода в расти-

тельных тканях кустарничков и мхов в сосновых лесах может быть связано с более высокой интенсивностью фотосинтеза растений под пологом сосновых деревьев: густые низкоопущенные кроны ели перехватывают солнечную радиацию гораздо более эффективно, чем высоко поднятые ажурные кроны сосны обыкновенной (Кищенко, 2019). Соответственно, в условиях лучшей освещенности при меньшей сомкнутости крон растения напочвенного покрова эффективнее продуцируют органическое вещество и накапливают больше углерода в тканях (Аткина, 2000; Зубкова и др., 2022). В еловых лесах повышенное содержание Mn в растениях напочвенного покрова может быть связано с влиянием опада хвои ели, богатого этим элементом питания, на его содержание в почвах.

Содержание остальных элементов питания не проявляло четких зависимостей от типа леса. В отмерших листьях вороники содержание К также выше в ельниках, но содержание Р выше в сосняках. Согласно данным, полученным ранее на этих объектах исследования, листья вороники текущего года характеризуются более высоким содержанием К, Mn и Р в сосняках кустарничково-лишайниковых, по сравнению с ельниками кустарничково-зеленомошными (Исаева, Сухарева, 2013). Соотношения элементов в многолетних отмерших листьях вороники также проявляли различия: соотношение С:Р было уже в ельниках, N:Р — в сосняках. Зеленые мхи

(живые многолетние части) в ельниках богаче фосфором, в сосняках — углеродом, что согласуется с литературными данными по составу зеленых мхов (Сухарева, 2018). При этом величина соотношений С:N и С:P меньше в ельниках. Отмершие части мхов характеризовались различиями в содержании других элементов: Mg в мхах больше в сосняках, Mn — в ельниках, соотношения С:P и N:P уже в ельниках.

Таким образом, содержание элементов питания и углерода в стареющих и отмерших листьях кустарничков, так же как и в тканях мхов, различается в зависимости от типа леса, что наиболее отчетливо проявляется в отношении Mn и $C_{орг}$: в еловых лесах растительный материал кустарничков и мхов обогащен марганцем, в сосновых — углеродом. Это можно объяснить различиями в условиях произрастания, формируемыми доминирующими древесными растениями: плодородие и влажность почв еловых лесов выше, чем сосновых, в тех же климатических условиях и на тех же почвообразующих породах (Лукина и др., 2008). Однако в сосновых лесах за счет ажурности крон создаются более благоприятные условия освещенности для активного фотосинтеза растений напочвенного покрова и, соответственно, более активного накопления углерода. Также вероятно непосредственная связь химического состава растений напочвенного покрова с составом опада ассимилирующих органов древесных растений-эдикаторов: на повышенное содержание

Mn в растениях напочвенного покрова влияет его поступление в почву с опадом хвои ели, богатым марганцем.

Скорость разложения и изменения химического состава растительных остатков в процессе деструкции

Различия в скорости потерь массы могут быть обусловлены исходным качеством и условиями внешней среды. По скорости потерь массы после первого года разложения опад изучаемых видов распределяется в ряду: брусника > хвоя ели > вороника > мхи; после второго года: хвоя ели > вороника > брусника > мхи. В сосновых биогеоценозах ряды скорости разложения выглядят следующим образом: после первого года: вороника > брусника > хвоя сосны > мхи; после второго года: хвоя сосны > брусника > вороника > мхи (табл. 2). Как в более раннем исследовании, проведенном в еловых лесах, при относительно высокой исходной величине соотношения С:N в опаде мхов как в ельниках, так и в сосняках, скорость потери их массы была ниже, чем у остальных видов (Lukina et al., 2017). В других работах также показано, что моховой опад разлагается медленно (Wardle et al., 2003; Cornelissen et al., 2007; Hilli, 2013), что может быть обусловлено высоким содержанием неидентифицированных фенольных соединений в клеточных стенках мохообразных и широким соотношением С:N в растительных остатках (Ligrone et al., 2008; Lukina et al., 2017).

Таблица 2. Потери массы, элементов питания и лигнина (в %), стехиометрические соотношения элементов при разложении активных фракций растительного опада в северотаежных сосновых и еловых лесах

Параметр	Е-БГЦ		С-БГЦ		p	n	
	Среднее	Стандартная ошибка	Среднее	Стандартная ошибка		Е-БГЦ	С-БГЦ
1 год							
Хвоя*							
Масса	20	1	16	1	0.01	5	5
Ca	12	1	8	8	1.00	4	4
Mg	15	3	12	1	0.19	4	4
K	45	1	24	2	0.03	4	4
Mn	-33	7	1	1	0.03	4	4
P	-32	2	-8	2	0.03	4	4
N	4	2	-2	7	0.47	4	4
C _{орг}	15	3	12	3	0.47	4	4
Лигнин	-80	4	-10	3	0.03	4	4
C:N	48	3	99	8	0.03	4	4
C:P	538	20	1365	38	0.03	4	4
N:P	11	0.3	14	1	0.03	4	4
Лигнин:N	32	0.4	45	3	0.03	4	4
Брусника							
Масса	20	1	16	0.3	0.01	5	5
Ca	5	0.1	10	4	0.31	4	4
Mg	5	4	16	1	0.03	4	4
K	36	4	35	2	0.67	4	4
Mn	8	5	-2	2	0.31	4	4
P	-4	7	8	1	0.31	4	4
N	2	3	-3	1	0.31	4	4
C _{орг}	14	6	7	4	0.67	4	4
Лигнин	-172	6	-193	16	0.67	4	4
C:N	44	2	61	5	0.03	4	4
C:P	578	78	693	42	0.67	4	4
N:P	13	1	11	0.4	0.67	4	4
Лигнин:N	42	0.4	52	3	0.03	4	4

Параметр	Е-БГЦ		С-БГЦ		P	n	
	Среднее	Стандартная ошибка	Среднее	Стандартная ошибка		Е-БГЦ	С-БГЦ
Вороника							
Масса	20	3	17	2	0.21	5	5
Ca	14	6	6	2	0.67	4	4
Mg	21	0.3	29	2	0.03	4	4
K	41	4	53	3	0.03	4	4
Mn	10	5	9	3	0.89	4	4
P	9	8	13	4	0.89	4	4
N	10	3	5	6	0.31	4	4
C _{орг}	28	4	12	4	0.03	4	4
Лигнин	7	3	6	1	0.89	4	4
C:N	40	1	62	7	0.03	4	4
C:P	499	14	626	59	0.11	4	4
N:P	12	1	10	0.4	0.03	4	4
Лигнин:N	30	0.01	39	5	0.03	4	4
Мхи							
Масса	4	1	10	0.4	0.01	5	5
Ca	-7	3	8	10	0.31	4	4
Mg	11	7	32	12	0.31	4	4
K	43	4	54	8	0.67	4	4
Mn	1	9	35	6	0.11	4	4
P	5	4	28	4	0.03	4	4
N	-11	5	27	7	0.03	4	4
C _{орг}	-3	7	12	4	0.11	4	4
Лигнин	2	3	4	6	0.89	4	4
C:N	69	4	77	0.3	0.19	4	4
C:P	623	35	684	42	0.47	4	4
N:P	9	0.2	9	1	0.47	4	4
Лигнин:N	26	1	34	3	0.03	4	4

Параметр	Е-БГЦ		С-БГЦ		Р	n	
	Среднее	Стандартная ошибка	Среднее	Стандартная ошибка		Е-БГЦ	С-БГЦ
2 год							
Хвоя*							
Масса	37	1	29	0.5	0.01	5	5
Ca	15	5	4	1	0.06	4	4
Mg	20	5	29	3	0.19	4	4
K	80	1	50	1	0.03	4	4
Mn	-11	14	16	3	0.31	4	4
P	10	14	-1	2	0.89	4	4
N	11	2	19	2	0.06	4	4
C _{орг}	28	4	27	3	0.89	4	4
Лигнин	-35	9	5	1	0.03	4	4
C:N	44	3	103	7	0.03	4	4
C:P	711	91	1215	39	0.03	4	4
N:P	17	3	12	0.4	0.31	4	4
Лигнин:N	26	2	49	2	0.03	4	4
Брусника							
Масса	33	3	26	1	0.21	5	5
Ca	6	0.2	9	1	0.03	4	4
Mg	9	3	30	1	0.03	4	4
K	62	1	74	1	0.03	4	4
Mn	5	2	2	1	0.31	4	4
P	4	1	27	2	0.03	4	4
N	4	1	6	3	0.67	4	4
C _{орг}	28	6	19	3	0.67	4	4
Лигнин	-131	27	-185	17	0.31	4	4
C:N	38	3	59	3	0.03	4	4
C:P	510	47	772	31	0.03	4	4
N:P	13	0.2	13	1	0.89	4	4
Лигнин:N	36	4	55	5	0.03	4	4

Параметр	Е-БГЦ		С-БГЦ		p	n	
	Среднее	Стандартная ошибка	Среднее	Стандартная ошибка		Е-БГЦ	С-БГЦ
Вороника							
Масса	34	3	25	2	0.06	5	5
Ca	26	6	16	4	0.31	4	4
Mg	42	3	40	3	0.67	4	4
K	61	3	72	2	0.11	4	4
Mn	14	1	17	2	0.31	4	4
P	20	3	30	3	0.03	4	4
N	14	2	0.3	2	0.03	4	4
C _{орг}	40	4	28	3	0.11	4	4
Лигнин	22	3	13	0.3	0.03	4	4
C:N	35	2	48	2	0.03	4	4
C:P	459	18	644	40	0.03	4	4
N:P	13	0.1	13	0.3	0.89	4	4
Лигнин:N	26	0.3	34	2	0.03	4	4
Мхи							
Масса	9	2	14	1	0.04	5	5
Ca	-18	2	13	9	0.03	4	4
Mg	20	8	37	12	0.67	4	4
K	62	4	71	3	0.06	4	4
Mn	-19	1	33	11	0.03	4	4
P	11	2	37	3	0.03	4	4
N	-6	1	16	17	0.89	4	4
C _{орг}	-2	10	23	7	0.06	4	4
Лигнин	21	7	14	5	0.31	4	4
C:N	72	8	61	4	0.11	4	4
C:P	655	83	678	15	0.67	4	4
N:P	9	0.2	11	1	0.03	4	4
Лигнин:N	22	2	29	4	0.31	4	4

Примечание: Е-БГЦ — еловый биогеоценоз, С-БГЦ — сосновый биогеоценоз, * — в Е-БГЦ представлены данные по составу хвои ели, в С-БГЦ — хвои сосны; p — вероятность ошибки 1-го рода в U-тесте Манна-Уитни

Как после первого, так и после второго года разложения, хвоя ели по сравнению с хвоей сосны достоверно быстрее теряла массу (20 против 16% и 37 против 29% соответственно), наблюдались более активные потери К и накопление лигнина ($p < 0.05$) (табл. 2, 3). Кроме того, в первый год разложения у хвои ели наблюдалось более активное накопление Р. После первого года у хвои ели были выше коэффициент обогащения для Мп, Р и лигнина, после второго года — для Mg, N и лигнина. Коэффициент обогащения для К был выше для хвои сосны как после первого, так и после второго года разложения. Стехиометрические соотношения С:N, С:Р и лигнин:N после первого и второго года разложения были уже у опада хвои ели.

Опад листьев брусники в первый год достоверно быстрее разлагался в ельнике, на второй год различия сгладились, но стали более выраженными различия в изменении химического состава опада: коэффициенты обогащения для Mg, К и Р были выше в ельнике, и, соответственно, в сосновом лесу листья брусники потеряли больше Са, Mg, К и Р ($p < 0.05$). Соотношения С:N и лигнин:N после первого и второго года были меньше в ельнике. Листья вороники за весь период исследования разлагались в ельниках и сосняках с сопоставимыми скоростями (табл. 2). Но в первый год коэффициенты обогащения Mg и К были выше в ельнике, а потери Mg и К — в сосняке, и, напротив, коэффициент обогащения для С был выше в сосняке, а потери —

в ельнике. На второй год коэффициенты обогащения для К, Мп и Р были выше в ельнике, при этом опад листьев вороники при разложении терял больше N и лигнина в ельнике, Р — в сосняке ($p < 0.05$). В опаде листьев вороники соотношения С:N и лигнин:N на протяжении всего периода исследования были уже в ельнике.

Выявленные для кустарничков различия могут свидетельствовать о более активных процессах трансформации химического состава опада в ельниках по сравнению с сосновыми лесами, что можно объяснить исходными концентрациями элементов. Так, более высокое исходное содержание Мп в хвое ели и тканях растений почвенного покрова и накопление его в процессе разложения может ускорять процессы разложения за счет увеличения содержания фермента Мп-пероксидазы, отвечающего за разложение лигнина (Орлова и др., 2011). Повышенное содержание углерода в растительных тканях может свидетельствовать о высоком содержании органических веществ, например лигнина, устойчивых к разложению. По результатам более ранней работы смешанный опад вечнозеленых растений еловых лесов (хвоя ели, листья брусники и вороники) в течение двух лет разлагался быстрее, чем сосновых (хвоя сосны, листья брусники и вороники), что связывали также с различиями качества растительных остатков — более высоким содержанием элементов питания и более узкими соотношениями С:N и лигнин:N в опаде и в почвах еловых лесов (Лукина и др., 2008; Иванова и др., 2019).

Таблица 3. Коэффициент обогащения активных фракций растительного опада в северотаежных сосновых и еловых лесах

Параметр	Е-БГЦ		С-БГЦ		p	n	
	Среднее	Стандартная ошибка	Среднее	Стандартная ошибка		Е-БГЦ	С-БГЦ
1 год							
Хвоя*							
Ca	1.10	0.01	1.09	0.08	1.00	4	4
Mg	1.06	0.05	1.05	0.02	1.00	4	4
K	0.69	0.01	0.91	0.03	0.03	4	4
Mn	1.67	0.10	1.18	0.01	0.03	4	4
P	1.65	0.03	1.28	0.03	0.03	4	4
N	1.20	0.02	1.22	0.08	0.89	4	4
C _{орг}	1.06	0.04	1.04	0.04	0.67	4	4
Лигнин	2.27	0.03	1.31	0.04	0.03	4	4
Брусника							
Ca	1.19	0.02	1.07	0.04	0.11	4	4
Mg	1.18	0.07	1.00	0.005	0.03	4	4
K	0.80	0.06	0.78	0.03	0.89	4	4
Mn	1.16	0.08	1.21	0.02	0.89	4	4
P	1.30	0.10	1.10	0.01	0.11	4	4
N	1.22	0.02	1.23	0.02	0.31	4	4
C _{орг}	1.07	0.06	1.11	0.05	0.67	4	4
Лигнин	3.39	0.02	3.49	0.18	0.89	4	4
Вороника							
Ca	1.06	0.04	1.13	0.04	0.67	4	4
Mg	0.99	0.03	0.86	0.03	0.03	4	4
K	0.73	0.03	0.57	0.04	0.03	4	4
Mn	1.11	0.03	1.09	0.05	0.67	4	4
P	1.12	0.06	1.05	0.06	0.31	4	4
N	1.11	0.00	1.15	0.08	0.31	4	4
C _{орг}	0.89	0.02	1.05	0.04	0.03	4	4
Лигнин	1.15	0.00	1.13	0.03	0.31	4	4
Мхи							
Ca	1.12	0.03	1.02	0.10	1.00	4	4
Mg	0.94	0.08	0.75	0.13	0.31	4	4
K	0.60	0.05	0.51	0.09	0.67	4	4
Mn	1.04	0.10	0.72	0.07	0.11	4	4
P	0.99	0.03	0.80	0.04	0.03	4	4
N	1.17	0.05	0.81	0.07	0.03	4	4
C _{орг}	1.07	0.06	0.98	0.05	0.67	4	4
Лигнин	1.03	0.04	1.06	0.06	0.89	4	4

Параметр	Е-БГЦ		С-БГЦ		p	n	
	Среднее	Стандартная ошибка	Среднее	Стандартная ошибка		Е-БГЦ	С-БГЦ
2 год							
Хвоя*							
Ca	1.35	0.07	1.36	0.02	0.89	4	4
Mg	1.28	0.07	1.00	0.03	0.03	4	4
K	0.32	0.01	0.70	0.02	0.03	4	4
Mn	1.78	0.23	1.18	0.03	0.11	4	4
P	1.43	0.23	1.42	0.03	0.89	4	4
N	1.41	0.02	1.14	0.03	0.03	4	4
C _{орг}	1.15	0.06	1.03	0.03	0.31	4	4
Лигнин	2.16	0.14	1.34	0.02	0.03	4	4
Брусника							
Ca	1.38	0.06	1.23	0.02	0.11	4	4
Mg	1.33	0.02	0.95	0.02	0.03	4	4
K	0.55	0.01	0.35	0.02	0.03	4	4
Mn	1.40	0.09	1.33	0.03	0.89	4	4
P	1.41	0.07	0.99	0.03	0.03	4	4
N	1.40	0.05	1.28	0.06	0.31	4	4
C _{орг}	1.04	0.04	1.11	0.04	0.31	4	4
Лигнин	3.34	0.24	3.86	0.20	0.31	4	4
Вороника							
Ca	1.10	0.04	1.12	0.03	0.67	4	4
Mg	0.87	0.01	0.80	0.03	0.11	4	4
K	0.59	0.02	0.38	0.02	0.03	4	4
Mn	1.30	0.03	1.11	0.04	0.03	4	4
P	1.21	0.01	0.93	0.06	0.03	4	4
N	1.30	0.02	1.34	0.05	0.67	4	4
C _{орг}	0.89	0.03	0.97	0.06	0.67	4	4
Лигнин	1.17	0.00	1.17	0.03	0.89	4	4
Мхи							
Ca	1.33	0.02	1.01	0.10	0.03	4	4
Mg	0.90	0.09	0.74	0.14	0.89	4	4
K	0.42	0.04	0.34	0.04	0.31	4	4
Mn	1.33	0.01	0.78	0.12	0.03	4	4
P	1.00	0.03	0.73	0.03	0.03	4	4
N	1.19	0.01	0.97	0.19	0.89	4	4
C _{орг}	1.14	0.11	0.90	0.08	0.06	4	4
Лигнин	0.88	0.08	1.00	0.06	0.31	4	4

Примечание: Е-БГЦ — еловый биогеоценоз, С-БГЦ — сосновый биогеоценоз, * — в Е-БГЦ представлены данные по составу хвои ели, в С-БГЦ — хвои сосны; p — вероятность ошибки 1-го рода в U-тесте Манна-Уитни

Различия в активности процессов разложения в еловых и сосновых лесах могут быть обусловлены не только исходным качеством растительного материала. Основными организмами-деструкторами в бореальных лесах являются сапротрофные грибы, наиболее эффективно разлагающие опад (Hobbie et al., 1999; Bödeker et al., 2016). Согласно литературным данным, общая биомасса микроорганизмов, в т. ч. грибов, выше в еловых биогеоценозах в сравнении с сосновыми (Никонов и др., 2001; Полянская и др., 2001), длина грибного мицелия в органогенных горизонтах почв также больше в еловых лесах (Евдокимова, Мозгова, 2001). Это может быть связано с относительно низкой влажностью почв, формируемой в сосновых лесах (Никонов и др., 2004).

Важным фактором, который влияет на скорость разложения, является температура почв, регулирующая деятельность организмов-деструкторов — низкие температуры ограничивают процессы разложения (Воробьева, Наумова, 2009; Rief et al., 2012). Однако по данным измерений, проведенных в 2015–2021 гг. с помощью температурных логгеров, заложенных под органогенными горизонтами почв, среднемесячные температуры в еловых лесах были ниже, чем в сосновых — разница достигала 2 °C (рис. 1). Это позволяет прийти к заключению, что качество опада может оказывать более существенное влияние на скорость разложения, чем температура почвы.

Отмирающие части зеленых мхов, несмотря на их более высокое качество

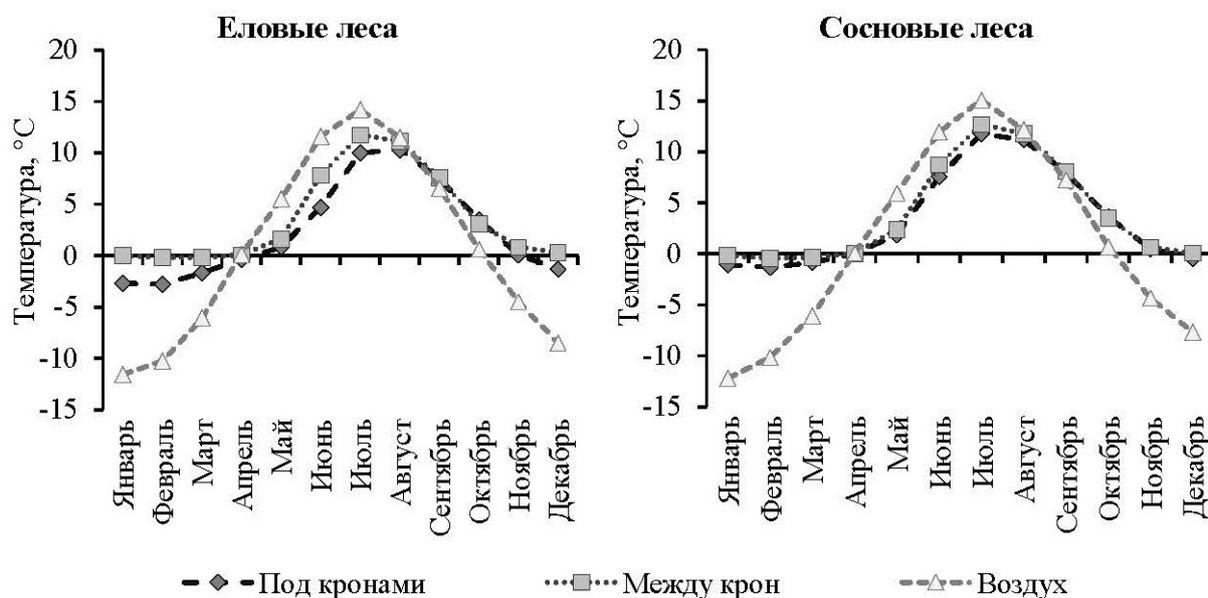


Рисунок 1. Температура почвы и воздуха в еловых и сосновых лесах, измеренные в период 2015–2021 гг. с помощью температурных логгеров под кронами деревьев, в межкروновых пространствах и на деревьях

в ельниках, в отличие от всех остальных видов за весь период разлагались активнее в сосняках ($p < 0.05$) (табл. 2). В первый год коэффициенты обогащения Р и N были выше в ельниках, а потери — в сосняках. При этом в ельниках наблюдалось активное накопление N остатками мхов. На второй год зеленые мхи, так же как и в первый, теряли Р активнее в сосновом лесу. Возможной причиной может быть большее количество осадков в сосновых лесах — 32.6 мм против 26.5 в ельниках (Ершов, 2021), способствующее механической деструкции растительных остатков мхов и вымыванию подвижных элементов. Кроме того, в сосняке наблюдались потери Са и Мп, а в ельнике — их аккумуляция; коэффициенты обогащения для Са, Мп и Р были достоверно выше в ельнике. После первого года в ельниках было достоверно ниже соотношение лигнин:N, после второго года — соотношение N:P (табл. 2).

Таким образом, сочетание таких факторов, как качество опада, активность микроорганизмов, температурный режим и количество осадков, связанных с формацией леса, может определять повышенную скорость разложения и интенсивность изменений химического состава растительного материала в еловых лесах по сравнению с сосновыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что формация леса оказывает значи-

тельное влияние на скорость разложения: в еловых лесах скорость разложения хвои ели выше, чем скорость разложения хвои сосны в сосновых лесах. Существенное влияние на скорость разложения растительных остатков в различных формациях леса оказывало качество растительного материала и, соответственно, активность микроорганизмов. Хвоя ели характеризуется более высоким качеством: содержание Са, Mg, K, P, Мп выше в стареющей хвое ели по сравнению с содержанием этих элементов в хвое сосны последних лет жизни; отношение C:N, C:P уже в хвое ели. Это объясняет более активные процессы разложения опада ели в еловых лесах: 37% потерь массы после двух лет разложения в ельнике против 29% — в сосняке. Стареющие, готовые перейти в опад, отмирающие органы кустарничков и мхов проявили неоднозначные различия в содержании элементов питания в зависимости от формации леса: качество живых стареющих листьев брусники и живых побегов мхов было выше в еловых лесах. Тем не менее, в тканях всех видов растений в еловых лесах оказалось больше Мп, тогда как в сосновых лесах — С. Это может быть связано как с условиями местообитания, которые формируются под действием деревьев-эдификаторов (плодородие почв, влажность, температурный режим), так и непосредственным влиянием древесных растений: в сосновых лесах за счет ажурности крон создаются более благоприятные условия освещенности для активного фото-

синтеза и накопления углерода растениями напочвенного покрова; повышенное содержание Mn в растениях напочвенного покрова ельников связано с поступлением его в почву с опадом хвои ели, также богатым марганцем. Соответственно этому и различия в скорости разложения опада кустарничков и мхов между формациями лесов проявляются не четко. Скорость разложения листьев брусники была выше в еловых лесах после года разложения, что может быть связано с более высоким качеством растительного материала в еловом лесу: узкими соотношениями элементов (C:N, C:P, N:P) и высоким содержанием элементов питания (Mg, Mn, P). В то же время отмершие части зеленых мхов разлагались активнее в сосновых лесах, несмотря на более высокое их качество в ельниках, что может объясняться большим количеством осадков в сосняках. Таким образом, различия в скорости разложения растительных остатков хвои древесных растений, листьев кустарничков и побегов мхов опре-

деляется сочетанием таких факторов, как качество растительного материала, температурный режим и количество осадков, связанных с формацией леса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Артемкину Наталью Александровну, старшего научного сотрудника лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, за проведение анализов на содержание лигнина в образцах опада для экспериментов по разложению на площадках мониторинговой сети ИППЭС КНЦ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках работы молодежной лаборатории ЦЭПЛ РАН «Климаторегулирующие функции и биоразнообразие лесов» (регистрационный номер 122111500023-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аткина Л. И.* Географо-лесотипологические закономерности структуры и запаса напочвенного покрова таежных лесов: автореф. дисс. докт. с-х. наук (спец. 06.03.03). Екатеринбург, 2000. 37 с.
- Атлас Мурманской области. М.: Изд-во Главного Управления Геодезии и Картографии при Совете Министров СССР, 1971. 44 с.
- Белов Н. П., Барановская А. В.* Почвы Мурманской области. Л.: Наука, 1969. 147 с.
- Бобкова К. С.* Роль лесной подстилки в функционировании хвойных экосистем Европейского Севера // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2000. № 9 (35). URL: <https://kurl.ru/oMrnF> (дата обращения 15.11.2023).
- Воробьева И. Г., Наумова А. Н.* Интенсивность процесса деструкции растительного опада в почвах сухих местообитаний // Продуктивность и устойчивость лесных почв: Матер. III междунар. конф., г. Петрозаводск, 7–11 сентября 2009 г. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2009. С. 192–195.
- Воробьева Л. А.* Химический анализ почв: Учебник. М.: Изд-во Московского государственного университета, 1998. 272 с.
- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П.* Микроорганизмы тундровых и лесных подзолов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 2001. 184 с.
- Ершов В. В.* Фитогенное варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод северотаежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 1.5.15). Апатиты, 2021. 188 с.
- Зубкова Е. В., Фролов П. В., Быховец С. С., Надпорожская М. А., Фролова Г. Г.* Мозаичность ценопопуляций черники и брусники, и динамика органического вещества почвы в сосняках Южного Подмосковья // Лесоведение. 2022. № 1. С. 34–46.
- Иванова Е. А., Лукина Н. В., Данилова М. А., Артемкина Н. А., Смирнов В. Э., Ершов 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.
- Исаева Л. Г., Сухарева Т. А.* Элементный состав дикорастущих кустарничков в зоне воздействия комбината «Североникель»: данные многолетнего мониторинга // Цветные металлы. 2013. № 10. С. 87–92.
- Кищенко И. Т.* Лесоведение и лесная экология. Учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 393 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.

- Кузнецов М. А. Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60.
- Кузнецов М. А., Осипов А. Ф. Растительный опад как компонент биологического круговорота углерода в заболоченных хвойных сообществах средней тайги // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 9. С. 10–12.
- Ларионова А. А., Квиткина А. К., Быховец С. С., Лопес де Гереню В. О., Колягин Ю. Г., Каганов В. В. Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опадов в модельном эксперименте // Лесоведение. 2017. № 2. С. 128–139.
- Лукина Н. В., Горбачева Т. Т., Никонов В. В., Лукина М. А. Пространственная изменчивость кислотности Al-Fe-гумусовых подзолов // Почвоведение. 2002. № 2. С. 163–176.
- 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 КНЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В., Исаева Л. Г. Кислотность и питательный режим почв еловых лесов // Коренные еловые леса: биоразнообразии, структура, функции. СПб.: Наука, 2006. 298 с.
- Лукина Н. В., Орлова М. А., Исаева Л. Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва — растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 45–56.
- Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
- Молчанов А. Г. Сравнение экофизиологических показателей сосны и ели в Серебряноборском опытном лесничестве // Лесохозяйственная информация. 2020. № 1. С. 115–124.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Безель В. С., Бельский Е. А., Беспалова А. Ю., ... & Яценко-Хмелевская М. А. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Полянская Л. М., Паникова А. Н. Особенности распространения микроорганизмов в Al-Fe-гумусовых подзолах северотаежных еловых лесов: природные и техногенные аспекты // Микробиология. 2001. Т. 70. № 3. С. 319–328.
- Орлова М. А., Лукина Н. В., Камаев И. О., Смирнов В. Э., Кравченко Т. В. Мозаичность лесных биогеоценозов и продуктивность почв // Лесоведение. 2011. № 6. С. 39–48.
- Переверзев В. Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
- Полянская Л. М., Никонов В. В., Лукина Н. В., Паникова А. Н., Звягинцев В. Г. Микроорганизмы Al-Fe-гумусовых подзолов сосняков лишайниковых в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. 2001. № 2. С. 215–226.

- Помогайбин Е. А., Помогайбин А. В. Влияние деревьев рода *Juglans* L. на целлюлозо-разрушающую активность почвы в условиях дендрария ботанического сада Самарского университета // Самарский научный вестник. 2018. Т. 7. № 1 (22). С. 105–109.
- Рахлеева А. А., Семенова Т. А., Стриганова Б. Р., Терехова В. А. Динамика зоомикробных комплексов при разложении растительного опада в ельниках южной тайги // Почвоведение. 2011. № 1. С. 44–55.
- Суворова Г. Г. Фотосинтетическая активность хвойных деревьев в условиях юга Средней Сибири: автореф. дисс. ... докт. биол. наук (спец. 03.00.12). Иркутск, 2006. 40 с.
- Сухарева Т. А. Элементный состав зеленых мхов фоновых и техногенно нарушенных территорий // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018. № 3 (172). С. 89–96.
- 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.
- Тужилкина В. В. Фотосинтетическая активность сосны и ели в условиях средней подзоны тайги Коми АССР: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 03.00.12). Сыктывкар, 1984. 148 с.
- Федорец Н. Г., Бахмет О. Н. Особенности формирования почв и почвенного покрова Карело-Кольского региона // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 12. С. 39–51.
- Цандекова О. Л. Динамика накопления золы в опаде *Acer negundo* L. в условиях нарушенных пойменных фитоценозов // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 12. С. 148–152.
- Цветков В. Ф. Лесной биогеоценоз (2-е издание, исправленное и дополненное). Архангельск, 2004. 267 с.
- Чертов О. Г., Меньшикова Г. П. Изменение лесных почв под действием кислых осадков // Известия АН СССР. Серия биология. 1983. № 6. С. 110–115.
- Aponte C., García L. V., Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 36–46.
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // Forest Ecology and Management. 2000. Vol. 133. P. 13–22.
- Berg B., McClaugherty C. Plant litter — decomposition, humus formation, carbon sequestration, 2nd ed. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 340 p.
- Bödeker I. T. M., Lindahl B. D., Olson Å., Clementsen K. E. Mycorrhizal and saprotrophic fungal guilds compete for the same organic substrates but affect decomposition differently // Functional Ecology. British Ecological Society. 2016. Vol. 30. No 12. P. 1967–1978.
- Bradford M. A., Berg B., Maynard D. S., Wieder W. R., Wood S. A. Understanding the dominant controls on litter decompos-

- ition // *Journal of Ecology*. 2016. Vol. 104. No 1. P. 229–238.
- Chavez-Vergara B., Merino A., Vázquez-Marufo 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. P. 133–145.
- Cornelissen J. H. C., van Bodegom P. M., Aerts R., Callaghan T. V., van Logtestijn R. S. P., ... & Team M. O. L.* Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf decomposition rates in cold biomes // *Ecology Letters*. 2007. Vol. 10. P. 619–627.
- De Marco A., Vittozzi P., Rutigliano F. A., Virzo de Santo A.* Nutrient dynamics during decomposition of four different pine litters // V. Leone, R. Lovreglio (Eds.). *Proceedings of the International Workshop MED-PINE 3: Conservation, Regeneration and Restoration of Mediterranean Pines and Their Ecosystems*. Bari: CIHEAM, 2007. P. 73–77.
- Fang X., Zhao L., Zhou G., Huang W., Liu J.* Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests // *Plant and Soil*. 2015. Vol. 392. P. 139–153.
- Helmisaari H.-S.* Temporal variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* needles // *Canadian Journal of Forest Research*. 1990. No 5. P. 177–193.
- Hilli S.* Significance of litter production of forest stands and ground vegetation in the formation of organic matter and storage of carbon in boreal coniferous forests // *Forest Condition Monitoring in Finland — National report / P. Merilä, S. Jortikka (Eds.) The Finnish Forest Research Institute*. 2013. P. 77–83.
- Hobbie E. A., Macko S. A., Shugart H. H.* Insights into nitrogen and carbon dynamics of ectomycorrhizal and saprotrophic fungi from isotopic evidence // *Oecologia*. 1999. Vol. 118. No. 3. P. 353–360.
- Högberg P., Näsholm T., Franklin O., Högberg M. N.* Tamm Review: On the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian boreal forests // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 403. P. 161–185.
- Husson F., Le S., Pages J.* *Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R*. 2nd Ed. London: Chapman & Hall/CRC Press. 2017. 248 p.
- Leonard L. T., Mikkelsen K., Hao Z., Brodie E. L., Williams K. H., Sharp J. O.* A comparison of lodgepole and spruce needle chemistry impacts on terrestrial biogeochemical processes during isolated decomposition // *PeerJ*. 2020. Vol. 8. Article: e9538.
- Ligrone R., Carafa A., Duckett J. G., Renzaglia K. S., Ruel K.* Immunocytochemical detection of lignin-related epitopes in cell walls in bryophytes and the charalean alga *Nitella* // *Plant Systematics and Evolution*. 2008. Vol. 270. P. 257–272.

- 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. No 24. P. 19874–19887.
- Pausas J. G. Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests of the eastern Pyrenees // *Journal of Vegetation Science*. 1997. Vol. 8. P. 643–650.
- Portillo-Estrada M., Pihlatie M., Korhonen J. F. J., Levula J., Frumau A. K. F., Ibrom A., Lembrechts J. J., Morillas L., Horváth L., Jones S. K., Niinemets Ü. Climatic controls on leaf litter decomposition across European forests and grasslands revealed by reciprocal litter transplantation experiments // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. P. 1621–1633.
- 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> (дата обращения 15.11.2023)
- Rahman M. M., Tsukamoto J., Rahman M. M., Yoneyama A., Mostafa K. M. Lignin and its effects on litter decomposition in forests ecosystems // *Chemistry and Ecology*. 2013. Vol. 29. No 6. P. 540–553.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J. Seasonal foliar chemistry of northern Scots pine under sulphur and heavy metal pollution // *Chemosphere*. 1998. Vol. 37. No 2. P. 271–287.
- Rief A., Knapp B. A., Seeber J. Palatability of selected alpine plant litters for the decomposer *Lumbricus rubellus* (Lumbricidae) // *PLoS One*. 2012. Vol. 7. Article: e45345.
- Rowland A. P., Roberts J. D. Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1994. Vol. 25. No 3–4. P. 269–277.
- 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. No 2. P. 1–9.
- 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. No 6. P. 827–835.
- Yang Q., Blanco N. E., Hermida-Carrera C., Lehotai N., Hurry V., Strand Å. Two dominant boreal conifers use contrasting mechanisms to reactivate photosynthesis in the spring // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. Article 128.
- Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // *Journal of Plant Ecology*. 2008. Vol. 1. No 2. P. 85–93.

REFERENCES

- 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.
- Atkina L. I., *Geografo-lesotipologicheskie zakonomernosti struktury i zapasa napochvennogo pokrova taezhnykh lesov: avtoref. diss. dokt. s-kh. nauk* (Geographical and forest typological patterns of the structure and reserve of the ground cover of taiga forests, Doctor's agricult. sci. thesis), Ekaterinburg, 2000, 37 p.
- Atlas Murmanskoi oblasti* (Atlas of the Murmansk region), Moscow: Izd-vo Glavnogo Upravleniya Geodezii i Kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1971, 44 p.
- Belov N. P., Baranovskaya A. V., *Pochvy Murmanskoi oblasti* (Soils of the Murmansk region), Leningrad: Nauka, 1969, 147 p.
- 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*, 2nd, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 340 p.
- Bobkova K. S., Rol' lesnoj podstilki v funkcionirovanii khvojnykh ehkosistem Evropejskogo Severa (The role of forest litter in the functioning of coniferous ecosystems of the European North), *Vestnik Instituta biologii Komi NC URO RAN*, 2000, No 9 (35), 2000, available at: <https://kurl.ru/oMrnF> (November 15, 2023)
- Bödeker I. T. M., Lindahl B. D., Olson Å., Clemmensen K. E., Mycorrhizal and saprotrophic fungal guilds compete for the same organic substrates but affect decomposition differently, *Functional Ecology. British Ecological Society*, 2016, Vol. 30, No 12, pp. 1967–1978.
- Bradford M. A., Berg B., Maynard D. S., Wieder W. R., Wood S. A., Understanding the dominant controls on litter decomposition, *Journal of Ecology*, 2016, Vol. 104, No 1, pp. 229–238.
- 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.
- Chertov O. G., Men'shikova G. P., Izmenenie lesnykh pochv pod deistviem kislykh osadkov (Changes in forest soils under the influence of acid precipitation), *Izvestiya AN SSSR. Seriya biologiya*, 1983, No 6, pp. 110–115.
- Cornelissen J. H. C., van Bodegom P. M., Aerts R., Callaghan T. V., van Logtestijn R. S. P., ..., & Team M. O. L., Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf decomposition rates in cold biomes, *Ecology Letters*, 2007, Vol. 10, pp. 619–627.
- De Marco A., Vittozzi P., Rutigliano F. A., Virzo de Santo A. Nutrient dynamics during decomposition of four different pine litters [in:] Leone V., Lovreglio R. (Eds.), *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., *Fitogennoe var'irovanie sostava atmosferykh vyadenii i pochvennykh vod severotaezhnykh lesov v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya*, Diss. ... kand. biol. nauk (Phytogenic variation of the composition of atmospheric precipitation and soil waters of the North Taiga forests under aerotechnogenic pollution, Candidate's biol. sci. thesis), Apatity, 2021, 188 p.
- Evdokimova G. A., Mozgova N. P., *Mikroorganizmy tundrovykh i lesnykh podzolov Kol'skogo Severa* (Microorganisms of tundra and forest podzols of the Kola North), Apatity: KNTs RAN, 2001, 184 p.
- Fang X., Zhao L., Zhou G., Huang W., Liu J., Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests, *Plant Soil*, 2015, Vol. 392, pp. 139–153.
- Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Osobennosti formirovaniya pochv i pochvennogo pokrova Karelo-Kol'skogo regiona (Peculiarities of soil and soil cover formation in the Karelia — Kola region), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, No 12, pp. 39–51.
- Helmisaari H.-S., Temporal variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* needles, *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, No 5, pp. 177–193.
- Hilli S., Significance of litter production of forest stands and ground vegetation in the formation of organic matter and storage of carbon in boreal coniferous forests, *Forest Condition Monitoring in Finland — National report*, P. Merilä, S. Jortikka (Eds.), The Finnish Forest Research Institute, 2013, pp. 77–83.
- Hobbie E. A., Macko S. A., Shugart H. H., Insights into nitrogen and carbon dynamics of ectomycorrhizal and saprotrophic fungi from isotopic evidence, *Oecologia*, 1999, Vol. 118, No 3, pp. 353–360.
- Högberg P., Näsholm T., Franklin O., Högberg M. N., Tamm Review: On the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian boreal forests, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 403, pp. 161–185.
- Husson F., Le S., Pages J., *Exploratory multivariate analysis by example using R*, 2nd edition, Chapman & Hall/CRC, 2017, 248 p.
- Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Elementnyi sostav dikorastushchikh kustarnichkov v zone vozdeistviya kombinata "Severonikel": dannye mnogoletnego monitoring (Elemental composition of wild small shrubs in the area of influence of "Severonickel" combine: data of long-term monitoring), *Tsvetnye metally*, 2013, No 10, pp. 87–92.
- 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.
- Kishchenko I. T., *Lesovedenie i lesnaya ekologiya. Uchebnoe posobie dlya bakalavriata i magistratury* (Forestry and forest ecology. Textbook for bachelor's and Master's degrees), Moscow: Izd-vo Yurait, 2019, 393 p.
- Kolmogorova E. Yu., Ufimtsev V. I., Nekotorye osobennosti khimicheskogo sostava opada sosny obyknovЕННОЙ, proizrastayushchei v usloviyakh porodnogo otvala (Some peculiarities of the chemical composition of Scotch pine debris, growing under conditions of coal pit), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, No 11, Part. 2, pp. 267–272.
- Kuznetsov M. A., Osipov A. F., Rastitel'nyi opad kak komponent biologicheskogo krugovorota ugleroda v zabolochennykh khvoinykh soobshchestvakh srednei taigi (Plant litter as a component of the biological carbon cycle of wet coniferous communities in the middle taiga), *Vestnik Instituta biologii Komi NTs Ural'skogo otdeleniya RAN*, Izd-vo Instituta biologii Komi NTs UrO RAN, 2011, No 9, pp. 10–12.
- Kuznetsov M. A., Vliyanie uslovii razlozheniya i sostava opada na kharakteristiki i zapas podstilki v srednetaezhnom chernichnosfagnovom el'nike (Effect of decomposition conditions and falloff composition on litter reserves and characteristics in a bilberry-sphagnum spruce forest of middle taiga), *Lesovedenie*, 2010, No 6, pp. 54–60.
- Larionova A. A., Kvitkina A. K., Bykhovets S. S., Lopes-de-Gerenyu V. O., Kolyagin Yu. G., Kaganov V. V., Vliyanie azota na mineralizatsiyu i gumifikatsiyu lesnykh opadov v model'nom eksperimente (The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study), *Lesovedenie*, 2017, No 2, pp. 128–139.
- Leonard L. T., Mikkelsen K., Hao Z., Brodie E. L., Williams K. H., Sharp J. O., A comparison of lodgepole and spruce needle chemistry impacts on terrestrial biogeochemical processes during isolated decomposition, *PeerJ*, 2020, Vol. 8, Article: e9538.
- Ligrone R., Carafa A., Duckett J. G., Renzaglia K. S., Ruel K., Immunocytochemical detection of lignin-related epitopes in cell walls in bryophytes and the charlean alga *Nitella*, *Plant Systematics and Evolution*, 2008, Vol. 270, pp. 257–272.
- Orlova M. A., Lukina N. V., Kamaev I. O., Smirnov V. E., Kravchenko T. V., Mozaichnost' lesnykh biogeotsenozov i produktivnost' pochv (Forest ecosystem mosaics and soil fertility), *Lesovedenie*, 2011, No 6, pp. 39–48.
- Pausas J. G., Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests of the eastern Pyrenees, *Journal of Vegetation Science*, 1997, Vol. 8, pp. 643–650.
- Pereverzev V. N., *Lesnye pochvy Kol'skogo poluostrova* (Forest soils of the Kola Peninsula), Moscow: Nauka, 2004, 232 p.
- Polyanskaya L. M., Nikonov V. V., Lukina N. V., Panikova A. N., Zvyagintsev V. G., Mikroorganizmy Al-Fe-gumusovykh podzolov

- sosnyakov lishainikovykh v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya (Microorganisms of Al-Fe-humus podzols under lichen pine forests affected by aerotechnogenic pollution), *Pochvovedenie*, 2001, No 2, pp. 215–226.
- Pomogaibin E. A., Pomogaibin A. V., Vliyanie derev'ev roda *Juglans* L. na tsellyulozozrazrushayushchuyu aktivnost' pochvy v usloviyakh dendrariya botanicheskogo sada Samarskogo universiteta (*Juglans* L. genus trees influence on cellulolytic soil activity in Samara University Botanical Garden Dendrarium), *Samarskii nauchnyi vestnik*, 2018, Vol. 7, No 1 (22), pp. 105–109.
- Portillo-Estrada M., Pihlatie M., Korhonen J. F. J., Levula J., Frumau A. K. F., Ibrom A., Lembrechts J. J., Morillas L., Horváth L., Jones S. K., Niinemets Ü., Climatic controls on leaf litter decomposition across European forests and grasslands revealed by reciprocal litter transplantation experiments, *Biogeosciences*, 2016, Vol. 13, pp. 1621–1633.
- 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> (November 15, 2023).
- Rahman M. M., Tsukamoto J., Rahman M. M., Yoneyama A., Mostafa K. M., Lignin and its effects on litter decomposition in forests ecosystems, *Chemistry and Ecology*, 2013, Vol. 29, No 6, pp. 540–553.
- Rakhleeva A. A., Semenova T. A., Striganova B. R., Terekhova V. A., Dinamika zoomikrobnnykh kompleksov pri razlozhenii rastitel'nogo opada v el'nikakh Yuzhnoi taigi (Dynamics of zoomicrobial complexes upon decomposition of plant litter in spruce forests of the southern taiga), *Pochvovedenie*, 2011, No 1, pp. 44–55.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J. Seasonal foliar chemistry of northern Scots pine under sulphur and heavy metal pollution, *Chemosphere*, 1998, Vol. 37, No 2, pp. 271–287.
- Rief A., Knapp B. A., Seeber J., Palatability of selected alpine plant litters for the decomposer *Lumbricus rubellus* (Lumbricidae), *PLoS One*, 2012, Vol. 7, Article: e45345.
- Rowland A. P., Roberts J. D., Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, Vol. 25, No 3–4, pp. 269–277.
- Sukhareva T. A., Elementnyi sostav zelynykh mkhov fonovykh i tekhnogenogo narushennykh territorii (The green moss elemental composition of the background and industrially disturbed areas), *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No 3 (172), pp. 89–96.
- Sukhareva T. A., Lukina N. V., Mineral'nyi sostav assimiliruyushchikh organov khvoinykh derev'ev posle snizheniya urovnya atmosfernogo zagryazneniya na Kol'skom poluostrove (Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution

- in the Kola peninsula), *Ekologiya*, 2014. No 2, pp. 97–104.
- Suvorova G. G., *Fotosinteticheskaya aktivnost' khvoinykh derev'ev v usloviyakh yuga Srednei Sibiri, Avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* (Photosynthetic activity of coniferous trees in the conditions of the South of Central Siberia, Doctor's agricult. sci. thesis), Irkutsk, 2006, 40 p.
- Tsandekova O. L., *Dinamika nakopleniya zoly v opade Acer negundo L. v usloviyakh narushennykh poimennykh fitotsenozov* (Dynamics of accumulation of ash in litter *Acer negundo* L. under conditions of disturbed floodplain phytocenoses), *Byulleten' nauki i praktiki*, 2018, Vol. 4, No 12, pp. 148–152.
- Tsvetkov V. F., *Lesnoi biogeotsenoz* (Forest biogeocenosis), Arkhangel'sk, 2004, 267 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, No 2, pp. 1–9.
- Tuzhilkina V. V., *Fotosinteticheskaya aktivnost' sosny i eli v usloviyakh srednei podzony tajgi Komi ASS, Diss. ... kand. biol. nauk* (Photosynthetic activity of pine and spruce in the conditions of the middle taiga subzone of the Komi ASSR, Candidate's biol. sci. thesis), Syktyvkar, 1984, 148 p.
- Vorob'eva I. G., Naumova A. N., Intensivnost' protsessa destruktzii rastitel'nogo opa-da v pochvakh sukhikh mestoobitanii (Intensity of waste degradation in dry habitat soils), *III international forest soil science conference: Productivity and resistance of forest soils, Proc. Conf.*, Petrozavodsk, 7–11 September, 2009, pp. 192–195.
- Vorob'eva L. A., *Khimicheskii analiz pochv: Uchebnik* (Chemical analysis of soils: Textbook), Moscow: MGU, 1998, 272 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, No 6, pp. 827–835.
- Yang Q., Blanco N. E., Hermida-Carrera C., Lehotai N., Hurry V., Strand Å., Two dominant boreal conifers use contrasting mechanisms to reactivate photosynthesis in the spring, *Nature Communications*, 2020, Vol. 11, Article 128.
- Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G., Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors, *Journal of Plant Ecology*, 2008, Vol. 1, No 2, pp. 85–93.
- Zubkova E. V., Frolov P. V., Bykhovets S. S., Nardporozhskaya M. A., Frolova G. G., Mozaichnost' tsenopopulyatsii cherniki i brusniki, i dinamika organicheskogo veshchestva pochvy v sosnyakakh Yuzhnogo Podmoskov'ya (Mosaic structure of blueberry and lingonberry cenopopulations and the dynamics of soil organic matter in the southern Moscow region pine forests), *Lesovedenie*, 2022, No 1, pp. 34–46.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE DECOMPOSITION RATE OF PLANT LITTERFALL IN SPRUCE AND PINE FORESTS AT THE NORTHERN DISTRIBUTION LIMIT

E. A. Ivanova^{1,2}, M. A. Danilova², V. E. Smirnov², V. V. Ershov¹

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS
Akademgorodok st. 14a, Apatity, Murmansk region, 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

Received: 16.08.2023

Revised: 19.09.2023

Accepted: 20.09.2023

A comparative assessment of the processes of initial stages of decomposition of plant residues (pine needles, spruce needles, leaves of boreal shrubs, moss thalli) in lichen-shrub pine forests and shrub-green-moss spruce forests formed under natural conditions at the northern limit of distribution was carried out. The characteristics of the litter initial composition, the rate of decomposition and changes in the chemical composition of plant residues in the process of destruction caused by the forest type were studied. The higher initial content of C_{org} in the plant tissues of pine forest is associated with favorable lighting conditions under the forest canopy, while the high content of Mn in the tissues of ground cover plants in spruce forests is due to the direct influence of spruce needle litter rich in this nutrient. The results of the study clearly demonstrated that the forest type has a significant impact both on the initial quality of the litterfall of the same plant species and on the rate of decomposition: in the spruce forest spruce needles and lingonberry leaves with a higher content of nutrients (Mg, Mn, P) and narrow ratios of elements (C : N, C : P) were characterized by more active decomposition processes. However, green moss litter, despite its high quality in spruce forests, decomposed more actively in pine forests, which may be due to a large amount of precipitation in pine forests. Thus, differences in the rate of decomposition of plant residues are influenced by a combination of the plant material quality, temperature conditions and precipitation amount associated with the forest type.

Key words: forest type, decomposition of litter, plant residues, quality of litter

Рецензент: к. б. н., с. н. с. Ахметова Г. В.