

УДК 630*114.351+631.44.061

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛОК СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ¹

© 2022 г. Г. В. Ахметова*

Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

**E-mail: akhmetovagv@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 16.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Лесная подстилка является важным компонентом таежных экосистем, и изучение трансформации ее характеристик, в том числе химического состава, представляет собой большой научный интерес в связи с ее высокой пространственной изменчивостью этого почвенного горизонта даже в пределах одного типа леса. Цель работы – выявление особенностей содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках и закономерностей изменения их химического состава на уровнях элементарных геохимических ландшафтов (ЭГХЛ) и растительных микрогруппировок (РМГ). Данное исследование проведено в среднетаежной подзоне Восточной Фенноскандии (республика Карелия) в Государственном заповеднике “Кивач”. В сосновом местообитании, сформированном на песчаных флювиогляциальных отложениях, заложена ландшафтно-геохимическая катена на пологом склоне озовой гряды. Проанализировано валовое содержание и содержание в подвижной форме макро- (K, Mg, Ca) и микроэлементов (Mn, Zn, Cu) в подгоризонтах лесной подстилки. Результат исследования показал, что содержание K, Mn, Zn и Cu подвержено сильному варьированию на всех изучаемых уровнях структурно-функциональной организации территории. Концентрация Mg и Ca варьирует менее значительно. Дисперсионный анализ полученных данных показал статистически значимое влияние ($p \leq 0.05$) выделенных факторов (ЭГХЛ и РМГ) на изменение содержания большинства макро- и микроэлементов. Динамика большинства изучаемых элементов с высокой степенью достоверности (R^2) описывается полиномиальной кривой второго порядка. Только для калия была выявлена обратная линейная зависимость от расположения в системе ЭГХЛ. Лесные подстилки водораздельных участков (элювиальный ЭГХЛ) и верхних частей склонов (трансэлювиальный ЭГХЛ) характеризуются накоплением калия, магния, цинка и меди по сравнению с подчиненными ЭГХЛ (трансаккумулятивный и аккумулятивный ЭГХЛ). Для кальция и марганца отмечается иная закономерность – максимальные их значения характерны для лесных подстилок почв, формирующихся на склонах в транзитных условиях, и высокое содержание данных элементов больше связано с высокими их концентрациями в доминирующем здесь виде растений – чернике.

Ключевые слова: лесная подстилка, среднетаежные экосистемы, макро- и микроэлементы, напочвенный покров, катена, элементарные геохимические ландшафты, растительная микрогруппировка.

DOI: 10.31857/S0024114822030020

Напочвенный растительный покров и лесная подстилка являются чрезвычайно важными элементами лесных биогеоценозов (Богатырев, 1990, 1997, 2013; Базилевич и др., 1986; Sayer, 2006; Hilli et al., 2010; Орлова и др., 2011, 2015; Титлянова, Шибарева, 2012). Подстилка является особым компонентом экосистемы, промежуточным звеном между растительностью, опадом и почвой (Богатырев, 1997), источником и хранилищем элементов минерального питания, средой обитания

живых организмов, основой первичного почвообразования и растительным субстратом (Лукина и др., 2010; Hilli et al., 2010; Телеснина и др., 2018; Lukina et al., 2019; Kuznetsova et al., 2021). Очень важно оценить направленность воздействия растительного покрова на почву, которое наиболее интенсивно проявляется в поверхностных органических горизонтах (Orlova et al., 2013; Семенюк и др., 2020). Как известно, неоднородность растительного покрова во многом определяет мозаичность и мелкоконтурность почвенного покрова, что наиболее четко отражается на свойствах их верхних горизонтов, формирующихся из растительного опада (Богатырев, Фомина, 1990; Vester-

¹ Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса).

dal, Raulund-Rasmussen, 1998; Tamminen, 2004; Nilsson, Wardle, 2005; Артемкина и др., 2018; Noreika et al., 2019). Роль живого напочвенного покрова и подстилки особенно значимы в таежных бореальных лесах, где фитомасса растительности подчиненных ярусов и ее ежегодный отпад сопоставимы с этими показателями древесного яруса (Hilli et al., 2010).

Подстилка служит интегральным показателем биологического круговорота, отражает основные направления функционирования экосистем, в своем строении и свойствах подчиняется биоклиматической зональности (Богатырев, 2013). Поэтому информация о различных характеристиках лесной подстилки также могут служить индикатором системы состояния лесных экосистем, что особенно значимо в условиях нарастания антропогенного влияния (Богатырев, 1990; Телесникова и др., 2018). Органогенные горизонты почвы, по сравнению с почвой, являются более лабильными компонентами таежных экосистем, варьирование их свойств на всех уровнях структурно-функциональной организации экосистемы чрезвычайно высоки, это создает определенные сложности при проведении исследований лесных почв (Семенюк и др., 2020). В последнее время увеличилось количество работ, направленных на выявление взаимосвязей растительного покрова и характеристик лесных подстилок на различных уровнях ее организации, начиная с элементарных биогеоценозов, так как именно на этом уровне происходит взаимодействие напочвенного покрова, опада и лесных подстилок (Лукина, 2010; Орлова, 2013; Орлова и др., 2015; Noreika et al., 2019; Семенюк и др., 2020). Большинство работ направлено на изучение морфологических признаков подстилок и особенностей накопления в ней органического вещества и азота, продуцирование CO_2 ; исследований, касающихся содержания других химических элементов недостаточно.

Изучение особенностей взаимосвязей в системе — «растение—лесная подстилка» в настоящее время также актуально в связи с тенденциями в изменении климатических показателей (Второй ..., 2014; Kuemmerle et al., 2015; Climate change ..., 2021) и растительного покрова (Epstein et al., 2004; Голубятников, Денисенко, 2009; Zellweger et al., 2020; Липка и др., 2021). Как известно, при повышении температуры ускоряются процессы разложения подстилки, происходит снижение их запасов (Попова, 2018), круговорот элементов-биогенов меняется — быстро освобождаются биогенные элементы и более активно вымывается калий в условиях промывного режима почв. Показано, что в зависимости от изменений климатических показателей будут меняться абсолютные величины аккумуляции и выщелачивания элементов (Шибарева, 2004).

Цель данной работы заключалась в выявлении особенностей содержания и закономерностей изменения химического состава лесных подстилок в зависимости от градиента расположения в ряду сопряженных почв и характера напочвенного покрова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в Республике Карелия, в Государственном заповеднике «Кивач», который расположен в юго-восточной части Балтийского кристаллического щита в среднетаежной подзоне Восточной Фенноскандии. Кристаллическое основание и покрывающая его морена перекрыты мощными гравийно-галечными песчаными флювиогляциальными наносами, рельеф формируют высокие песчано-галечные гряды — озы, высота которых составляет 20 м. В понижениях рельефа формируются верховые и переходные болота и небольшие заболоченные лесные озера. Данный тип местности широко распространен на территории Карелии, он отличается средним и низким классом бонитета сосновых лесов (лишайниковых и зеленомошных), а также бедностью напочвенного растительного покрова.

Пробные площади заложены в ряду сопряженных элементарных геохимических ландшафтов (катене) — от элювиальных — на водоразделе, через транзитные (трансэлювиальные и трансэлювиально-аккумулятивные) — на склоне к подчиненным (аккумулятивные) элементам рельефа (рис. 1). На автоморфных позициях в элювиальных и трансэлювиальных ЭГХЛ под сосняками брусничными формируются подзолы иллювиально-железистые песчаные. Данные почвы широко распространены на территории Карелии и считаются фоновыми, имеют легкий гранулометрический состав, хорошо дренированы и имеют высокую степень аэрации. В нижней части склона оза неширокой полосой в периферийной части заболоченного участка леса под чернично-сфагновыми микрогруппировками подзолы иллювиально-железистые сменяются полугидроморфными почвами — торфяно-подзолами иллювиально-железистыми глеевыми. В подчиненных элементах рельефа в условиях заболоченного сосняка багульниково-сфагнового формируются торфяные и торфяно-глеевые почвы переходного типа. Более подробные описания почвенных условий даны в ранее вышедших работах (Ахметова, 2019, 2021).

Древостой представлен чистым сосновым насаждением (10С), возраст — 190 лет (до 220 лет), класс бонитета — III,4. Напочвенный покров отличается бедностью видового состава напочвенного покрова, что является характерным для песчаных флювиогляциальных ландшафтов (Крышень и др., 2006). Лишайниковые и брусничные растительные микрогруппировки отличаются

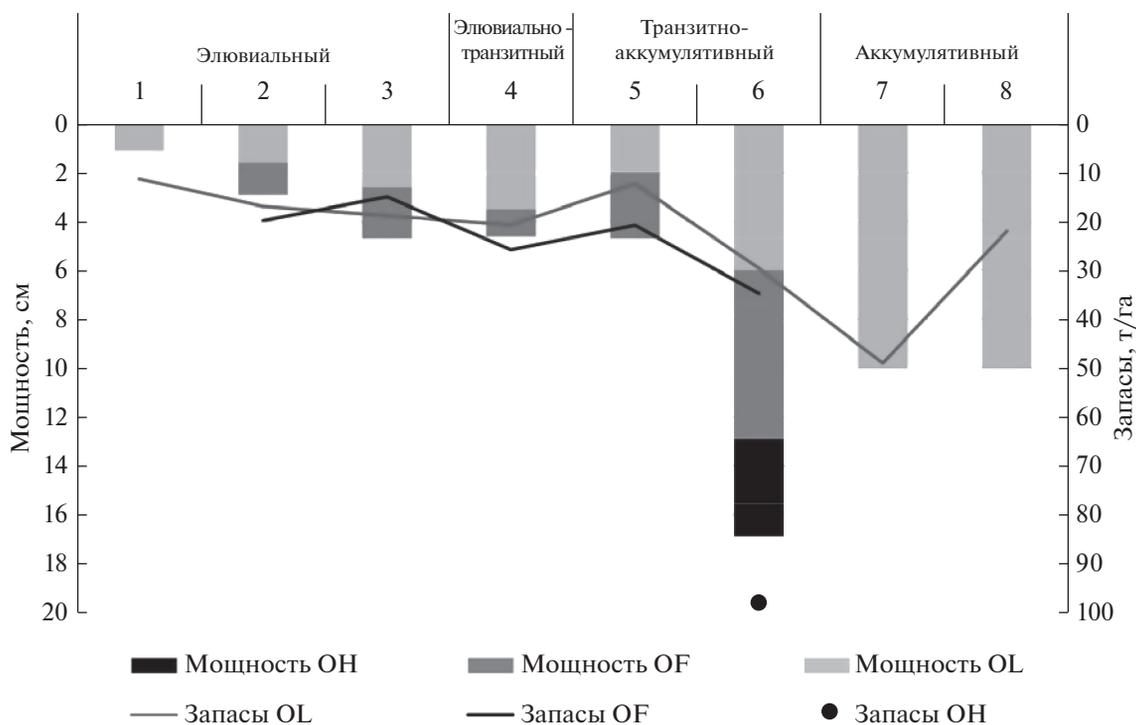


Рис. 2. Изменение мощности и запасов лесных подстилок, формирующихся в сопряженных элементарных ландшафтах под различными РМГ: 1 – лишайниковая РМГ, 2 – зеленомошная РМГ, 3 – брусничная РМГ, 4 – черничная РМГ, 5 – черничная влажная РМГ, 6 – чернично-сфагновая РМГ, 7 – багульниково-сфагновая РМГ, 8 – сфагновая РМГ.

ний минеральных частиц. В полугидроморфных позициях транзитного ландшафта формируется мощная оторфованная подстилка, где отчетливо выделяются OL, OF и ОН слои. Торфяные почвы аккумулятивного ландшафта представляют собой мощный слой (40–60 см) слабо разложенного сфагнового мха, в процессе данного исследования расчеты велись для верхней 10-сантиметровой толщи торфа. Запасы лесной подстилки сильно варьируют в зависимости от растительного покрова и местоположения в рельефе. Наименьшие значения рассчитаны для подстилок, сформированных под лишайниковой растительностью – 6–16 т/га, в кустарничково-зеленомошных РМГ запасы подстилки в 2–3 раза выше. Максимальные значения характерны для полугидроморфных местообитаний – трансаккумулятивной ЭГХЛ (до 150 т/га).

Химический состав органогенных горизонтов исследуемых почв таежных экосистем характеризуется широким диапазоном данных. Рассчитаны статистические показатели содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках на разных уровнях организации исследуемой территории – от катены в целом и элементарных ландшафтов до изучения изменчивости внутри каждой выделенной РМГ (табл. 1).

Варьирование содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках изучаемых почв различается в зависимости от элемента и формы

его нахождения. Наименьшая изменчивость выявлена для магния и кальция, для них получены наименьшие значения коэффициентов вариации (10–40%) как внутри каждой выделенной РМГ, так и катены в целом. Содержание остальных изученных элементов подвержено более значительному варьированию, очень высокие коэффициенты вариации (до 100%) рассчитаны для данных валового содержания калия и микроэлементов – марганца, меди и цинка. Как известно, в подвижной форме содержание элементов характеризуется более сильным варьированием, наши данные это подтверждают отчасти. Диапазон разброса значений концентрации элементов в подвижной форме в целом для катены более широкий по сравнению с валовым содержанием, наибольшим коэффициентом вариации характеризуется подвижный марганец. Тогда как при расчете данных для отдельных ЭГХЛ выявлено, что содержание элементов в подвижной форме характеризуется таким же, а иногда и меньшим варьированием. Это может свидетельствовать о более сильных связях с характером растительного покрова.

В связи с тем, что при гумификации подстилки происходит изменение ее химического состава (Tamminen et al., 2004), слои лесных подстилок могут характеризоваться различным уровнем обеспеченности макро- и микроэлементами. Дисперсионный анализ (табл. 2) показал статистически

Таблица 1. Статистические показатели содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках почв на уровнях ЭГХЛ и РМГ

Уровень	Форма	Показатель	K	Mg	Ca	Mn	Zn	Cu
Катена	Вал.	ср ± ош.ср	680 ± 70	440 ± 22	3000 ± 250	234 ± 57	29.12 ± 3.1	4.7 ± 0.6
		CV, %	70	21	38	99	47	61
	Подв.	ср ± ош.ср	240 ± 44	131 ± 7	640 ± 34	44.1 ± 8.7	3.77 ± 0.44	0.42 ± 0.02
		CV, %	91	25	27	98	59	29
Элювиальный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	860 ± 87	470 ± 33	3384 ± 272	291 ± 54	34.69 ± 5.3	5.61 ± 1.21
		CV, %	31	21	24	56	47	66
	Подв.	ср ± ош.ср	307 ± 73	146 ± 8	674 ± 47	105.7 ± 17.3	5.26 ± 0.55	0.42 ± 0.03
		CV, %	83	18	24	57	36	26
Лишайни- ковая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	860 ± 121	430 ± 19	3200 ± 400	180 ± 8	42.7 ± 12	5.1 ± 1.8
		CV, %	28	9	24	9	56	70
	Подв.	ср ± ош.ср	469 ± 210	138 ± 14	475 ± 44	11.3 ± 0.7	2.99 ± 0.28	0.44 ± 0.04
		CV, %	77	17	16	10	16	15
Зеленомошная РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	962 ± 80	461 ± 22	2870 ± 104	219 ± 27	33.8 ± 5.4	14.28 ± 6.2
		CV, %	14	8	6,3	60	28	76
	Подв.	ср ± ош.ср	428 ± 215	158 ± 16	864 ± 73	84.1 ± 7.7	6.43 ± 1.17	0.32 ± 0.04
		CV, %	87	18	15	16	31	21
Брусничная РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	541 ± 142	443 ± 70	4000 ± 790	328 ± 75	33.8 ± 5.4	14.28 ± 6.3
		CV, %	46	27	34	60	28	76
	Подв.	ср ± ош.ср	354 ± 39	149 ± 5	638 ± 11	148.4 ± 11.8	5.35 ± 0.93	0.48 ± 0.1
		CV, %	19	6	3	14	30	35
Транс-элюви- альный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	470 ± 132	417 ± 22	4000 ± 350	372 ± 138	26.4 ± 6.26	5.32 ± 1.7
		CV, %	48	9	15	78	41	54
Черничная РМГ	Подв.	ср ± ош.ср	166 ± 14	144 ± 26	680 ± 58	147.9 ± 8.2	5.40 ± 1.05	0.48 ± 0.05
		CV, %	15	32	15	10	34	17
Трансаккумуля- тивный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	410 ± 170	381 ± 81	2240 ± 508	135 ± 72	24.2 ± 4.87	3.50 ± 0.35
		CV, %	64	37	40	93	35	17
	Подв.	ср ± ош.ср	177 ± 29	126 ± 10	724 ± 62	60.6 ± 35	3.28 ± 1.3	0.37 ± 0.1
		CV, %	26	28	28	93	63	36
Черничная влажная РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	263 ± 18	350 ± 19	1550 ± 270	2.64 ± 4.3	17.1 ± 0.2	3.4 ± 0.46
		CV, %	12	9	30	28	1.3	24
	Подв.	ср ± ош.ср	189 ± 38	151 ± 18	904 ± 16	109.5 ± 15.0	4.84 ± 1.06	0.43 ± 0.08
		CV, %	35	21	3	24	38	30
Чернично- сфагновая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	516 ± 21	400 ± 99	2930 ± 230	178 ± 50	31.3 ± 2.4	3.65 ± 0.36
		CV, %	24	57	14	28	11	17
	Подв.	ср ± ош.ср	165 ± 9	101 ± 8	543 ± 35	11.6 ± 1.8	1.72 ± 0.17	0.32 ± 0.08
		CV, %	9	13	11	27	17	43
Аккумулятив- ный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	638 ± 116	460 ± 32	2680 ± 246	25.3 ± 5.,2	19.9 ± 4.5	3.2 ± 0.2
		CV, %	31	12	16	36	11	11
	Подв.	ср ± ош.ср	45 ± 6	103 ± 11	510 ± 34	2.7 ± 1.0	1.70 ± 0.45	0.43 ± 0.06
		CV, %	35	25	16	92	65	31
Багульниково- сфагновая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	73 ± 6	432 ± 3	2202 ± 190	25 ± 1	14.2 ± 1	3.3 ± 1
		CV, %	29	20	18	10	16	12
	Подв.	ср ± ош.ср	47 ± 12	87 ± 9	536 ± 61	1.9 ± 0.7	0.55 ± 0.22	0.44 ± 0.1
		CV, %	45	18	20	64	68	40
Сфагновая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	590 ± 150	471 ± 41	2900 ± 94	25.8 ± 2.6	22.7 ± 4.9	3.18 ± 0.27
		CV, %	44	15	5,6	12	37	15
	Подв.	ср ± ош.ср	35 ± 7	119 ± 15	483 ± 39	2.2 ± 0.9	1.82 ± 0.36	0.42 ± 0.07
		CV, %	35	22	14	69	34	28

Примечание: ср ± ош.ср – среднее арифметическое ± ошибка среднего, мг/кг; CV, % – коэффициент вариации.

Таблица 2. Дисперсионный анализ (ANOVA) влияния факторов на химический состав лесных подстилок (даны значение уровня значимости p , при $p \leq 0.05$ – влияние значимо, >0.05 – не значимо)

Фактор	Форма	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu
Степень разложения	Валовая	0.001	0.05	0.01	0.006	0.04	0.002
	Подвижная	0.002	0.04	0.01	0.033	0.002	0.02
ЭГХЛ	Валовая	0.001	0.1	0.07	0.0007	0.17	0.37
	Подвижная	7.8×10^{-7}	0.04	0.00002	2×10^{-6}	7×10^{-7}	0.33
РМГ	Валовая	0.0009	0.3	0.4	0.004	9.8×10^{-7}	0.3
	Подвижная	3.4×10^{-11}	1×10^{-10}	1.4×10^{-6}	1×10^{-14}	2.6×10^{-7}	0.006

значимое влияние ($p \leq 0.05$) на содержание большинства изучаемых макро- и микроэлементов степени разложения подстилок. Рассчитанные в ранее проведенных исследованиях (Ахметова, 2021) коэффициенты биологического поглощения этих элементов имеют высокие значения и показывают, что они относятся к группе элементов энергичного (Mn, K, Ca) и сильного (Mg, Zn, Cu) биогенного накопления, т.е. активно включаются в круговорот. Поэтому, в той или иной степени, с увеличением гумификации наблюдается снижение содержания элементов, наиболее быстро “теряется” из подстилки калий.

На химический состав лесных подстилок почв таежных экосистем влияет множество факторов (как природных, так и антропогенных), в данном исследовании изучалось влияние особенностей напочвенного растительного покрова (уровень РМГ), сопряженного с изменением в положении в рельефе и соответственного увеличения степени гидроморфизма (уровень ЭГХЛ). Дисперсионный анализ (табл. 2) показал статистически значимое влияние ($p \leq 0.05$) данных факторов в связи с изменением содержания большинства макро- и микроэлементов. Отмечается, что концентрация элементов в подвижной форме более чутко реагирует на смену растительного сообщества, в связи с этим рекомендуется для оценки экологической ситуации использовать доступные растениям соединения (Нечаева 1985, Lukina et al., 2019).

Регрессионный анализ дополнил информацию к полученным закономерностям и показал, что изменение содержания большинства изучаемых макро- и микроэлементов с высокой степенью достоверности (R^2) описывается полиномиальной кривой второго порядка (рис. 3). Только для калия была выявлена иная закономерность. Известно, что калий активно вымывается атмосферными осадками из крон древостоев, опада, лесной подстилки и верхней минеральной части почвы, его миграционная активность ослабевает на глубине почвы 20–40 см (Нечаева, 1985; Титлянова, 2014; Кожевникова и др., 2017). Анализ полученных данных показал достоверное влияние на содержание данного элемента в лесных

подстилках месторасположения почвы в ряду сопряженных ЭГХЛ – с нарастанием увлажнения (от элювиального к аккумулятивному ЭГХЛ) наблюдается существенное снижение содержания данного макроэлемента. Этот тренд особенно отчетливо прослеживается для подвижной формы калия, тогда как для валового калия эта закономерность больше характерна для подгоризонта OF. В вышележащем подгоризонте OL большее влияние на содержание калия оказывает характер напочвенной растительности. Отмечается, что в наиболее распространенном виде растений в сфагновых РМГ– сфагнума магелланского содержание калия высокое (Ахметова, 2021), поэтому концентрация валового калия в торфе довольно велика, однако в нижних слоях торфа его количество резко снижается на порядок. В связи с этим тренды зависимости содержания валового калия отличаются для разных подгоризонтов подстилки (рис. 2). Для подвижного калия данной взаимосвязи не выявлено, хорошо прослеживается тренд снижения содержания калия во всех подгоризонтах лесных подстилок в соответствии с увеличением увлажнения, который аппроксимируется обратной линейной зависимостью с очень высокой величиной достоверности аппроксимации ($R^2 = 0.7–0.9$).

Изменчивость уровня концентрации магния и кальция в подстилках изучаемых почв, по сравнению с калием, намного ниже. Также для данных макроэлементов выявлены иные закономерности варьирования их содержания в лесных подстилках. Магний и кальций, несмотря на то, что являются довольно активными водными мигрантами в почве, более устойчивы при разложении органических остатков (Артемкина и др., 2018) по сравнению с калием и медленнее выносятся из опада, подстилки и почвы в целом. Не выявлено четких закономерностей изменения валового содержания кальция и магния при смене состава напочвенного покрова и нарастания гидроморфизма. Есть тенденция к увеличению содержания кальция в подстилках почв, сформированных под черничными и, в меньшей мере, под брусничными РМГ, что может быть связано с повышенной концентрацией кальция в кустарничках, особенно в

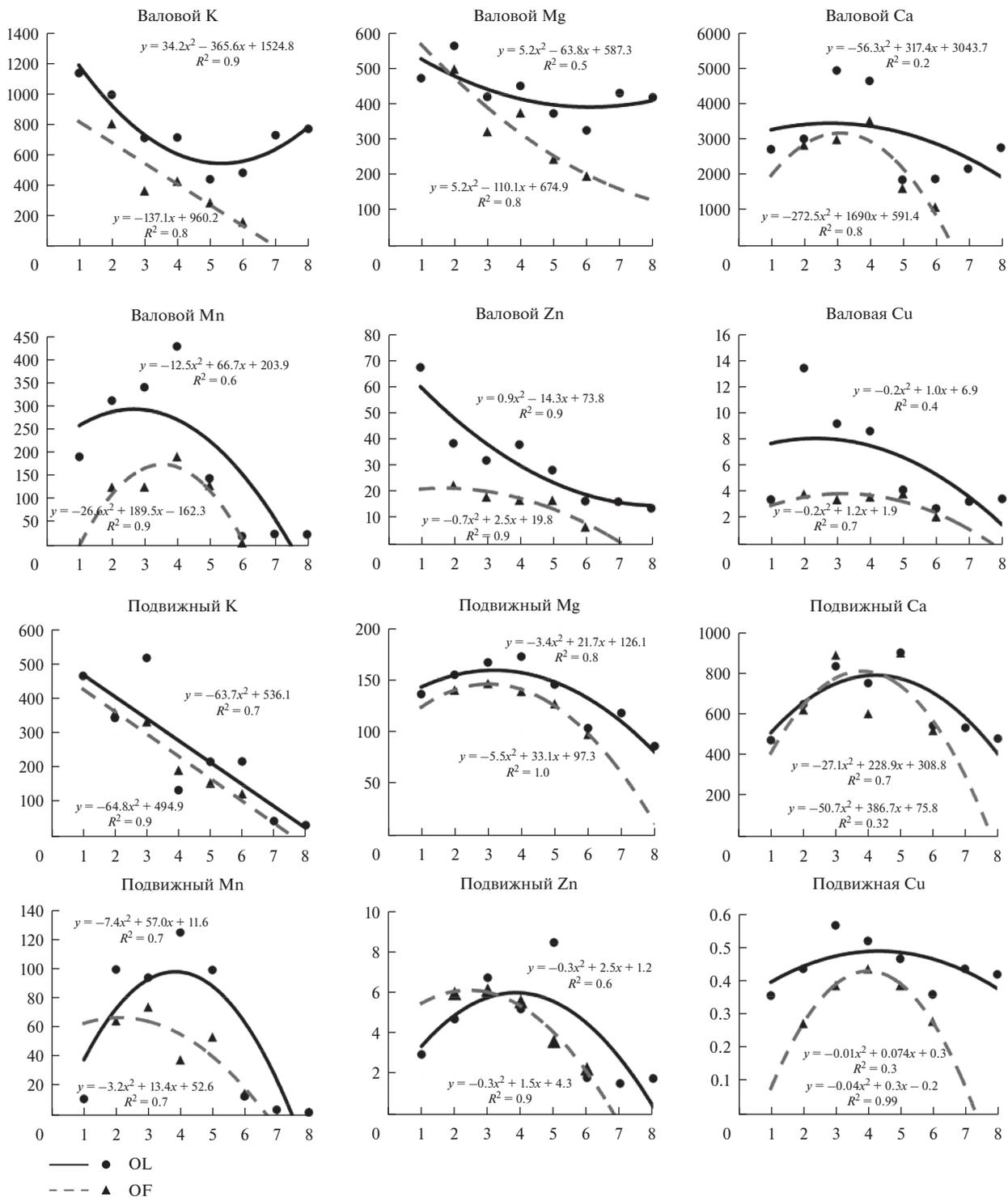


Рис. 3. Зависимость содержания (мг/кг) биогенных макро- и микроэлементов в подгоризонтах лесной подстилки от расположения в градиенте ЭГХЛ + РМГ (элювиальный ЭГХЛ: 1 – лишайниковая РМГ, 2 – зеленомошная РМГ, 3 – брусничная РМГ; трансэлювиальный: 4 – черничная РМГ; трансаккумулятивный: 5 – черничная влажная РМГ, 6 – чернично-сфагновая РМГ; аккумулятивный: 7 – багульниково-сфагновая РМГ, 8 – сфагновая РМГ).

чернике (Лукина и др., 2008). Однако наблюдается резкое снижение содержания кальция в подстилке черничной РМГ, сформированной в более влажных условиях – в трансэлювиальном ландшафте. Что

касается подвижных форм рассматриваемых макроэлементов, выявлена достоверная связь изменения их концентрации, особенно магния, связанная с нарастанием степени гидроморфизма и

изменения РМГ. Максимальные концентрации подвижных форм элементов отмечены в подстилках верхних склоновых участков, занятых брусничными и черничными РМГ. Выявленный тренд описывается полиномом второго порядка с высокой степенью достоверности – $R^2 = 0.7–0.9$.

Марганец характеризуется наибольшей биогенностью среди изучаемых элементов, он является индикатором биогеохимических циклов в таежных ландшафтах (Нечаева, 1985) в связи с изменением валентного состояния в зависимости от окислительно-восстановительных условий. Выявлены достоверные различия степени накопления в подстилках, связанные с характером растительного покрова, приуроченность данного микроэлемента к кустарничкам рода *Vaccinium* – чернике и бруснике известна (Нечаева, 1985; Лукина и др., 2008), особенно богаты марганцем листья черники. В связи с этим лесные подстилки черничных РМГ отличаются наиболее высокой концентрацией данного микроэлемента; как валовый, так и подвижный марганец содержится в подстилках кустарничковых РМГ в 3–4 и более раз больше, чем в остальных рассматриваемых РМГ. Очень низкие значения данного микроэлемента отмечены в оторфованных подстилках торфяных почв багульниково-сфагновых и сфагновых РМГ. Изменение содержания марганца в зависимости от РМГ и степени увлажнения хорошо аппроксимируется полиномиальной функцией с $R^2 = 0.6–0.7$.

Цинк и медь также относятся к группе с сильным биологическим накоплением, они активно участвуют в биогенном круговороте и накапливаются в подстилке, но закономерности изменения данных микроэлементов различаются.

Для цинка так же, как и для марганца, прослеживается тенденция к изменению его концентрации в подстилках в соответствии с изменением растительного сообщества, и в зависимости от степени гидроморфизма, выявленный тренд хорошо описывается полиномиальной функцией с R^2 более 0.9. Максимальные значения данного микроэлемента выявлены в лишайниковой РМГ, наименьшие – в оторфованной подстилке сфагновых РМГ. Характер изменения содержания подвижного цинка иной. Отмечена приуроченность его максимального количества, так же, как и марганца, в подстилках элювиальных и трансэлювиальных позиций, сформированных под брусничными и черничными РМГ, в оторфованных подстилках (чернично-сфагновой, багульниково-сфагновой и сфагновой РМГ) его концентрация резко снижается.

Варьирование содержания меди в лесных подстилках, даже внутри каждой выделенной РМГ, довольно высокое, особенно высокие значения коэффициентов вариации отмечены для подвижной формы элемента в подстилках элювиального

ЭГХЛ. Что касается роли растительного покрова и расположения в градиенте увлажнения в изменении валового содержания данного микроэлемента, достоверной закономерности выявлено не было. Для подвижной меди наблюдается связь его содержания с изменением характера растительности, выявлена наблюдаемая для кальция и марганца приуроченность наибольшей концентрации ее в подстилках черничных РМГ.

Таким образом, наблюдается отмечаемая Л.Г. Богатыревым для органического вещества подстилок таежных экосистем (Богатырев, 2013) приуроченность наибольшего содержания макро- и микроэлементов в органогенных горизонтах транзитных ландшафтах, что в значительной степени связано с характером растительного напочвенного покрова – преобладанием кустарничков рода *Vaccinium*, для которых характерна высокая биохимическая активность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в сопряженном ряду почв сосновых древостоев флювиогляциальных равнин, позволили оценить особенности строения и химического состава лесных подстилок и определить закономерности изменения их свойств в зависимости от расположения в градиенте увлажнения и растительного напочвенного покрова. Основные морфологические характеристики лесных подстилок: строение, мощность, запасы – подвержены значительному варьированию, мощность подстилки и ее запасы имеют наименьшие значения в элювиальной ЭГХЛ в лишайниковой РМГ, максимальных значений эти параметры достигают в оторфованной подстилке трансаккумулятивной ЭГХЛ под чернично-сфагновой РМГ.

Пространственная неоднородность содержания макро- и микроэлементов в подстилках различается в зависимости от элемента и формы его нахождения. Наименьшая изменчивость выявлена для магния и кальция, содержание остальных изученных элементов подвержено более значительному варьированию.

Дисперсионный анализ полученных данных показал статистически значимое влияние ($p \leq 0.05$) выделенных факторов (ЭГХЛ и РМГ) на содержание большинства макро- и микроэлементов в органогенных горизонтах почв. Динамика содержания большинства элементов с высокой степенью достоверности (R^2) описывается полиномиальной кривой второго порядка. Только для калия была выявлена обратная линейная зависимость от расположения в системе ЭГХЛ. В целом лесные подстилки водораздельных участков (элювиальный ЭГХЛ) и верхних частей склонов (трансэлювиальный ЭГХЛ) характеризуются

накоплением калия, магния, цинка и меди, по сравнению с подчиненными ЭГХЛ (трансаккумулятивным и аккумулятивным ЭГХЛ). Для кальция и марганца отмечается иная закономерность — максимальные значения характерны для лесных подстилок почв, формирующихся на склонах в транзитных условиях, и высокое содержание данных элементов связано с высокими их концентрациями в доминирующем здесь виде растений — чернике.

Данные были получены с использованием оборудования ЦКП “Аналитическая лаборатория” ИЛ КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемкина Н.А., Орлова М.А., Лукина Н.В.* Микромозаика растительности и вариабельность химического состава L-горизонтов подстилки северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных // *Лесоведение*. 2018. № 2. С. 97–106.
<https://doi.org/10.7868/S002411481802002X>
- Ахметова Г.В.* Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины средне-таежной подзоны Карелии // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2019. № 100. С. 53–82.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-53-82>
- Ахметова Г.В.* Особенности распределения макро- и микроэлементов в системе “почва-растение” в среднетаежных условиях Восточной Фенноскандии // *Труды КарНЦ РАН*. 2021. № 5. С. 5–19.
<https://doi.org/10.17076/eco1228>
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
- Богатырев Л.Г.* О классификации лесных подстилок // *Почвоведение*. 1990. № 3. С. 118–127.
- Богатырев Л.Г.* О роли гетерогенности подстилок в функционировании лесных биогеоценозов // *Общие проблемы биогеоценологии*. М.: АН СССР. 1986. С. 227–229.
- Богатырев Л.Г.* Образование подстилок — один из важнейших процессов в лесных экосистемах // *Почвоведение*. 1997. № 4. С. 501–512.
- Богатырев Л.Г., Фомина Т.В.* Диагностика нижних горизонтов лесных подстилок // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 1990. № 1. С. 54–56.
- Богатырев Л.Г.* Географические аспекты функционирования лесных подстилок // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2013. № 1. С. 30–36.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1006 с.
- Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2009. № 2. С. 57–68.
- Кожеевникова Н.К., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Лунаков С.Ю., Шамов В.В.* Водная миграция макроэлементов в хвойно-широколиственных лесах Сихотэ-Алиня // *Сибирский лесной журн*. 2017. № 3. С. 60–73.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20170306>
- Крышень А.М., Рудковская О.А., Преснухин Ю.В., Тимофеева В.В.* Морфоструктура напочвенного покрова основных типов лесных сообществ заповедника “Кивач” (средняя тайга) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2006. Вып. 10. С. 54–62.
- Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменению климата // *Лесоведение*. 2021. № 5. С. 531–546.
<https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>
- 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.
- Нечаева Е.Г.* Ландшафтно-геохимический анализ динамики таежных геосистем. Иркутск: Институт географии СО АН РАН, 1985. 210 с.
- Орлова М.А.* Элементарная единица лесного биогеоценологического покрова для оценки эко системных функций лесов // *Тр. Карельского НЦ. Сер. Экологические исследования*. 2013. № 6. С. 126–132.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Камаев И.О., Смирнов В.Э., Кравченко Т.В.* Мозаичность лесных биогеоценозов и плодородие почв // *Лесоведение*. 2011. № 6. С. 39–48.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э.* Методические подходы к отбору образцов лесной подстилки с учетом мозаичности лесных биогеоценозов // *Лесоведение*. 2015. № 3. С. 214–221.
<https://doi.org/10.31857/S0033994620010045>
- Попова Н.В.* Типизация напочвенных органогенных горизонтов в основных почвенно-фитоценологических экосистемах и индикация их состояния по параметрам деструктивной ветви малого биологического круговорота: автореф. дис. д. биол. наук: 03.02.08. Владимир, 2018. 47 с.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецов Я.Д.* Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // *Почвоведение*. 2020. № 1. С. 31–43.
- Сергеева О.В., Мухортова Л.В., Кривобоков Л.В.* Распределение запасов подстилки и биомассы живого напочвенного покрова в северной тайге центральной Эвенкии в зависимости от рельефа // *Сибирский лесной журн*. 2020. № 1. С. 38–46.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20200104>
- Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г. и др.* Особенности напочвенного покрова и лесных подстилок в искусственных липовых насаждениях в зависимости от характера ухода // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2018. № 2. С. 3–11.
- Титлянова А.А., Шибарева С.В.* Подстилки в лесных и травяных экосистемах. Новосибирск: СО РАН, 2012. 137 с.
- Шибарева С.В.* Запасы и элементный состав подстилок в лесных и травяных экосистемах Сибири: автореф. дис. ... к. биол. наук: 03.00.27. Новосибирск, 2004. 24 с.

- Choudhary D. K., Mishra Arti, Varma Ajit. Climate Change and the Microbiome: Sustenance of the Ecosphere. Springer Nature, 2021. 748 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-76863-8>
- Epstein H.E., Calef M.P., Walker M.D., Chapin F.S., Starfield A.M. Detecting changes in arctic tundra plant communities in response to warming over decadal time scales // *Global Change Biology*. 2004. № 10. P.1325–1334.
- Hilli S., Starka S., Derome J. Litter decomposition rates in relation to litter stocks in boreal coniferous forests along climatic and soil fertility gradients // *Appl. Soil Ecol.* 2010. № 46. P. 200–208.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.012>
- Kuemmerle T., Kaplan J.O., Prishchepov A.V., Rylsky I., Chaskovskyy O., Tikunov V.S., Müller D. Forest transitions in Eastern Europe and their effects on carbon budgets // *Global Change Biology*. 2015. V. 21. № 8. P. 3049–3061.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12897>
- Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., Smirnov V.E., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N. Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests // *Forests*. 2021. № 12. P. 1179.
<https://doi.org/10.3390/f12091179>
- Lukina N.V., Tikhonova E.V., Danilova M.A., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Tebenkova D.N., Kuznetsova A.I., Smirnov V.I., Braslavskaya T.Yu., Gornov A.V., Shashkov M.P., Knyazeva S.V., Kataev A.D., Isaeva L.G., Zukert N.V. Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia // *Forest Ecosystems*. 2019. № 6. P. 34.
<https://doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2>
- Nilsson M.-Ch., Wardle D.A. Understorey vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest // *Front. Ecol. Environ.* 2005. V. 3. № 8. P. 421–428.
- Noreika N., Helm A., Öpik M., Jairus T., Vasar M., Reier Ü., Kook E., Riibak K., Kasari L., Tullus H., Tullus T., Lutter R., Oja E., Saag A., Randlane T. and Pärtel M. Forest biomass, soil and biodiversity relationships originate from biogeographic affinity and direct ecological effects // *Oikos*, 2019. № 128. P. 1653–1665.
<https://doi.org/10.1111/oik.06693>
- Orlova M.A., Lukina N.V., Tutubalina O.V. et al. Soil nutrient's spatial variability in forest–tundra ecotones on the Kola Peninsula, Russia // *Biogeochemistry*. 2013. V. 113. № 1–3. P. 283–305.
- Sayer E.J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems // *Biological Reviews*. 2006. № 81. P. 1–31.
- Tamminen P., Starr M., Kubin E. Element concentrations in boreal, coniferous forest humus layers in relation to moss chemistry and soil factors// *Plant and soil*. 2004. V. 259. № 1–2. P. 51–58.
- Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K. Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient // *Canadian J. Forest Research*. 1998. V. 28. № 11. P. 1636–1647.
<https://doi.org/10.1139/cjfr-28-11-1636>
- Zellweger F., De Frenne P., Lenoir J., Vangansbeke P., Verheyen K., Bernhardt-Römermann M., Baeten L., Hédl R., Berki I., Brunet J., Van Calster H., Chudomelová M., Decocq G., Dirnböck T., Durak T., Heinken T., Jaroszewicz B., Kopecký M., Máliš F., Macek M., Marek M., Naaf T., Nagel T.A., Ortman-Ajkai A., Petřík P., Pielech R., Reczyńska K., Schmidt W., Standovár T., Świerkosz K., Teleki B., Vild O., Wulf M., Coomes D. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming // *Science*. 2020. V. 368. № 6492. P. 772–775.
<https://doi.org/10.1126/science.aba6880>

Spatial Heterogeneity of the Forest Litter's Chemical Composition in Pine Stands of the Eastern Fennoscandia's Middle Taiga

G. V. Akhmetova*

Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st. 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

*E-mail: akhmetovagv@gmail.com

Forest litter is an important component of taiga ecosystems, and the study of its characteristics' transformation, including changes in its chemical composition, is an important scientific problem due to the high spatial variability of litter even within the same forest type. The aim of the work was to identify the features of the macro- and microelements contents and the patterns of their changes on the levels of elementary geochemical landscapes (EGCL) and plant microgroups (PMG). This study was carried out in the middle taiga subzone of the Eastern Fennoscandia (Republic of Karelia) in the Kivach State Reserve. In a pine habitat formed on sandy fluvioglacial deposits, a landscape-geochemical catena was established on the slight slope of the esker ridge. The total content of the mobile forms of macro- (K, Mg, Ca) and microelements (Mn, Zn, Cu) in the forest litter subhorizons was analysed. The result of the study showed that the content of K, Mn, Zn and Cu was subject to significant variation on all studied levels of the structural and functional territory organization. The concentrations of Mg and Ca varied less significantly. Dispersion analysis of the data obtained showed a statistically significant effect ($p \leq 0.05$) of the selected factors (EGCL and PMG) on changes in the most macro- and microelements contents. The dynamics of most of the studied elements could be described by a polynomial curve of the second order with a high degree of reliability (R^2). Only for potassium, an inverse linear dependence on the location in the EGCL system was revealed. Forest litters of watershed areas (eluvial EGCLs) and upper slopes (trans-eluvial EGCLs) were characterized by accumulation of potassium, magnesium, zinc and copper compared to subordinate EGCLs (trans-accumulative and accumulative EGCLs). For

calcium and manganese, a different pattern was noted: the maximum values were characteristic of the forest litter of soils formed on slopes under transit conditions, and the high content of these elements is more associated with their high concentrations in the local dominant plant species, a bilberry.

Keywords: forest litter, ecosystems of middle taiga, macro- and microelements, ground cover, catena, elementary geochemical landscapes, plant microgroups.

Acknowledgements: The study was financed from the Federal budget within the framework of a State contract with the Karelian Research Centre of the RAS (Forest Research Institute).

REFERENCES

- Akhmetova G.V., Geokhimicheskie osobennosti pochv volnistoi ozerno-lednikovoi peschanoi ravniny srednetaezhnoi podzony Karelii (Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia), *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2019, No. 100, pp. 53–82.
DOI 10.19047/10136-11694-12019-19100-19053-19082
- Akhmetova G.V., Osobennosti raspredeleniya makro- i mikroelementov v sisteme "pochva-rastenie" v srednetaezhnykh usloviyakh Vostochnoi Fennoskandii (Distribution patterns of macro- and microelements in the "soil-plant" system in the middle taiga of Eastern Fennoscandia), *Trudy KarNTs RAN*, 2021, No. 5, pp. 5–19.
DOI 10.17076/eco11228.
- Artemkina N.A., Orlova M.A., Lukina N.V., Micromosaic structure of vegetation and variability of the chemical composition of L layer of the litter in dwarf shrub–green moss spruce forests of the northern taiga, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 754–761.
- Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A., *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem* (Geographic patterns of ecosystems' structure and functioning), Moscow: Nauka, 1986, 296 p.
- Bogatyrev L.G., Fomina T.V., Diagnostika nizhnikh gorizontov lesnykh podstilok (Diagnostics of the lower horizons of forest litter), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 1990, No. 1, pp. 54–56.
- Bogatyrev L.G., Geograficheskie aspekty funktsionirovaniya lesnykh podstilok (Geographical aspects of the litter), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2013, No. 1, pp. 30–36.
- Bogatyrev L.G., O klassifikatsii lesnykh podstilok (On forest litter classification), *Pochvovedenie*, 1990, No. 3, pp. 118–127.
- Bogatyrev L.G., O roli geterogenosti podstilok v funktsionirovaniy lesnykh biogeotsenozov (On the role of litter heterogeneity in the forest biogeocenoses functioning), In: *Obshchie problemy biogeotsenologii* (General issues of biogeocenology), Moscow: AN SSSR, 1986, pp. 227–229.
- Bogatyrev L.G., Obrazovanie podstilok - odin iz vazhneyshikh protsessov v lesnykh ekosistemakh (Litters formation as one of the most important processes in forest ecosystems), *Pochvovedenie*, 1997, No. 4, pp. 501–512.
- Choudhary D.K., Mishra Arti, Varma Ajit., *Climate Change and the Microbiome: Sustenance of the Ecosystem*, Springer Nature, 2021, 748 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-76863-8>
- Epstein H.E., Calef M.P., Walker M.D., Chapin F.S., Starfield A.M., Detecting changes in arctic tundra plant communities in response to warming over decadal time scales, *Global Change Biology*, 2004, No. 10, pp. 1325–1334.
- Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na rastitel'nyi pokrov Evropeiskoi Rossii (Influence of climate changes on the vegetation of European Russia), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2009, No. 2, pp. 57–68.
- Hilli S., Starka S., Derome J., Litter decomposition rates in relation to litter stocks in boreal coniferous forests along climatic and soil fertility gradients, *Appl. Soil Ecol.*, 2010, No. 46, pp. 200–208.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.012>
- Kozhevnikova N.K., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Vodnaya migratsiya makroelementov v khvoino-shirokolistvennykh lesakh Sikhote-Alinya (Water migration of macroelements in coniferous broad-leaved forests of Sikhote-Alin), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 3, pp. 60–73.
DOI 10.15372/SJFS20170306.
- Kryshen' A.M., Rudkovskaya O.A., Presnukhin Y.V., Timofeeva V.V., Morfostruktura napochvennogo pokrova osnovnykh tipov lesnykh soobshchestv zapovednika "Kivach" (srednyaya taiga) (Morphostructure of the ground cover in major forest community types in the "Kivach" strict nature reserve (middle taiga)), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN.*, 2006, Vol. 10, pp. 54–62.
- Kuemmerle T., Kaplan J.O., Prishchepov A.V., Rylsky I., Chaskovskyy O., Tikunov V.S., Müller D., Forest transitions in Eastern Europe and their effects on carbon budgets, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21, No. 8, pp. 3049–3061.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12897>
- Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., Smirnov V.E., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N., Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests, *Forests*, 2021, No. 12, pp. 1179.
<https://doi.org/10.3390/f12091179>
- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Y., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Y., Semenov S.M., Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata (A role of forests in natural systems' adaptation to climate change), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 531–546.
DOI 10.31857/S0024114821050077
- Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Forest soil fertility: the base of relationships between soil and vegetation, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 725–733.
- Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A., *Pitatel'nyi rezhim pochv severotaezhnykh lesov* (Nutritional regime of the north taiga soils), Moscow: Nauka, 2008, 342 p.

- Lukina N.V., Tikhonova E.V., Danilova M.A., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Tebenkova D.N., Kuznetsova A.I., Smirnov V.I., Braslavskaya T. Yu., Gornov A.V., Shashkov M.P., Knyazeva S.V., Kataev A.D., Isaeva L.G., Zukert N.V. Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia, *Forest Ecosystems*, 2019, No. 6, pp. 34.
<https://doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2>
- Nechaeva E.G., *Landshaftno-geokhimicheskii analiz dinamiki taezhnykh geosistem* (Landscape-geochemical analysis of the dynamics of taiga geosystems), Irkutsk: Institut geografii SO AN RAN, 1985, 210 p.
- Nilsson M.-Ch., Wardle D. A., Understorey vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest, *Front. Ecol. Environ*, 2005, Vol. 3, No. 8, pp. 421–428.
- Noreika N., Helm A., Öpik M., Jairus T., Vasar M., Reier Ü., Kook E., Riibak K., Kasari L., Tullus H., Tullus T., Lutter R., Oja E., Saag A., Randlane T. and Pärtel M., Forest biomass, soil and biodiversity relationships originate from biogeographic affinity and direct ecological effects, *Oikos*, 2019, No. 128, pp. 1653–1665.
<https://doi.org/10.1111/oik.06693>
- Orlova M.A., Elementarnaya edinitsa lesnogo biogeotsenoticheskogo pokrova dlya otsenki ekosistemnykh funktsii lesov (Elementary unit of the forest biogeocenotic cover for investigation of forest ecosystem functions), *Trudy Kar-el'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, No. 6, pp. 126–132.
- Orlova M.A., Lukina N.V., Kamaev I.O., Smirnov V.E., Kravchenko T.V., Mozaichnost' lesnykh biogeotsenozov i plodorodie pochv (Forest ecosystem mosaics and soil fertility), *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 39–48.
- Orlova M.A., Lukina N.V., Smirnov V.E., Metodicheskie podkhody k otboru obraztsov lesnoi podstilki s uchetom mozaichnosti lesnykh biogeotsenozov (Methodology of forest litter sampling taking into account the patchiness of forest biogeocoenoses), *Lesovedenie*, 2015, No. 3, pp. 214–221.
DOI 10.31857/S0033994620010045
- Orlova M.A., Lukina N.V., Tutubalina O.V. et al., Soil nutrient's spatial variability in forest–tundra ecotones on the Kola Peninsula, Russia, *Biogeochemistry*, 2013, Vol. 113, No. 1–3, pp. 283–305.
- Popova N.V., *Tipizatsiya napochvennykh organogennykh gorizontov v osnovnykh pochvenno-fitosenoticheskikh ekosistemakh i indikatsiya ikh sostoyaniya po parametram destruktivnoi vetvi malogo biologicheskogo krugovorota*. Avtoref. diss. d. biol. nauk (Typification of ground organic horizons in the main soil-phytocoenotic ecosystems and indication of their state according to the parameters of the destructive branch of the small biological cycle. Extended abstract of Doctor's biol. sci. thesis), Vladimir, 2018, 47 p.
- Sayer E.J., Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems, *Biological Reviews*, 2006, No. 81, pp. 1–31.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D., Assessment of intra-biogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub–herbaceous vegetation in spruce stands, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 1, pp. 27–38.
- Sergeeva O.V., Mukhortova L.V., Krivobokov L.V., Raspreделение zapasov podstilki i biomassy zhivogo napochvennogo pokrova v severnoi taige tsentral'noi Evenkii v zavisimosti ot rel'efa (Distribution of forest litter and live ground cover biomass in northern taiga of the Central Evenkia depending on relief), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2020, No. 1, pp. 38–46.
DOI 10.15372/SJFS20200104
- Shibareva S.V., *Zapasy i elementnyi sostav podstilok v lesnykh i travyanykh ekosistemakh Sibiri*. Avtoref. diss. k. biol. nauk (Reserves and elemental composition of litter in forest and grass ecosystems of Siberia. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Novosibirsk: 2004, 24 p.
- Tamminen P., Starr M., Kubin E., Element concentrations in boreal, coniferous forest humus layers in relation to moss chemistry and soil factors, *Plant and soil*, 2004, Vol. 259, No. 1–2, pp. 51–58.
- Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Osobennosti napochvennogo pokrova i lesnykh podstilok v iskusstvennykh lipovykh nasazhdeniyakh v zavisimosti ot kharaktera ukhoda (Features of a ground cover and forest litter of artificial lime plantations depending on the nature of care), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 3–11.
- Titlyanova A.A., Shibareva S.V., *Podstilki v lesnykh i travyanykh ekosistemakh* (Litter in forest and grass ecosystems), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012, 135 p.
- Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K., Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient, *Canadian J. Forest Research*, 1998, Vol. 28, No. 11, pp. 1636–1647.
DOI 10.1139/cjfr-28-11-1636
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1008 p.
- Zellweger F., De Frenne P., Lenoir J., Vangansbeke P., Verheyen K., Bernhardt-Römermann M., Baeten L., Hédli R., Berki I., Brunet J., Van Calster H., Chudomelová M., Decocq G., Dirnböck T., Durak T., Heinken T., Jaroszewicz B., Kopecký M., Máliš F., Macek M., Marek M., Naaf T., Nagel T.A., Ortmann-Ajkai A., Petřík P., Pielech R., Reczyńska K., Schmidt W., Standovář T., Świerkosz K., Teleki B., Vild O., Wulf M., Coomes D., Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming, *Science*, 2020, Vol. 368, No. 6492, pp. 772–775.
DOI 10.1126/science.aba6880