

УДК 550.424.4; 631.416.9; 630.1

П.Р. Енчилик¹, И.Н. Семенов², Е.Н. Асеева³, О.А. Самонова⁴, А.Д. Иовчева⁵, Е.В. Терская⁶**КАТЕНАРНАЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ В ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТАХ (ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОЙ ЗАПОВЕДНИК, ТВЕРСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Для оценки миграции микроэлементов в системе «почвы–растения» в южной части Центрально-Лесного заповедника в пределах пологого склона междуречья изучена ландшафтно-геохимическая catena с дерново-подзолистыми и подзолистыми профильно оглеенными почвами под хвойно-широколиственным лесом на двучленных отложениях. На основе содержания Mn, Fe, Zn, Sr, Cu, Ni, Cr, Pb в материнской породе, почвах и растениях проанализирована биогеохимическая дифференциация ландшафтов. Почвы catены характеризуются околокларковыми содержаниями Mn, Pb, пониженным – Cu, Fe, Zn, Ni, Sr, Cr. Гумусовые и подстилочные горизонты верхних звеньев catены обогащены Pb, Mn, Zn. Горизонт EL обеднен Fe, Ni, Sr, Zn. В горизонте BT повышено содержание Cr, Ni, Cu, понижено – Sr, Mn. В хвойно-широколиственных лесах зольность изученных хвойных и лиственных деревьев составляет 1–4 и 1–8% соответственно, наземной части трав – 3–12%. Изученные виды растений содержат околокларковые количества Cu, Zn, Ni. Ветки и кора древесных растений обеднены Fe, Cr, сфагнум – Sr. В растениях нижних звеньев catены снижается содержание Fe, а Mn – увеличивается. Деревья наиболее активно вовлекают в биологический круговорот биофильные Mn, Zn, а травы и сфагнум – Fe, Cr, Pb. В автономном и трансэлювиальном ландшафтах зеленая фитомасса растений накапливает Cu. В ландшафтах верхних звеньев catены по органам растений металлы распределены более равномерно, чем в нижних, где фотосинтетические органы активнее накапливают Mn, Cu, Sr, Zn. Вдоль catены наиболее дифференцировано содержание Mn, Ni, Fe, равномерно распределены Zn, Sr, Cu. Хвоя ели во всех ландшафтах (особенно в гидроморфных) интенсивнее накапливает Mn. Биогеохимическая активность с основным вкладом Mn, Cu, Sr, Zn, Ni максимальна в фотосинтезирующих органах ели, липы, ивы и сфагнума, минимальна – у вяза и клена.

Ключевые слова: смешанные леса, тяжелые металлы, подвижные соединения, биогеохимическая специализация, биологическое поглощение, Валдайская возвышенность, потенциально токсичные элементы

Введение. В Московском регионе из-за усиления техногенной нагрузки все более востребован фоновый мониторинг с катенарным анализом радиального и латерального распределения веществ. В почвах тайги активно мигрируют Fe, Cu, Mn, Zn, Sr [Никонов и др., 2004; Авессаломова, 2007; Семенов и др., 2016], доступность растениям (подвижность) Zn, Cu, Mn, Fe увеличивается с ростом концентрации водорастворимого органического вещества и уменьшается с ростом pH [Караванова и др., 2006]. На микроэлементный состав растений влияют условия среды произрастания и физиологические особенности. Филогенетическая специализация зависит от условий в местах видообразования: гумидокатные (катионофильные) растения накапливают катиогенные Zn, Mn, Cu, Pb, Sr, Ni, а арида-

нитные (анионофильные) поглощают Cr, мигрирующий преимущественно как анион [Касимов и др., 2019; Авессаломова, 2020]. В хвойно-широколиственных лесах в надземные органы деревьев активно переходит Zn. В коре гумидокатных видов аккумулируется избыток Zn [Железнова и др., 2017]. Широколиственные деревья эффективно поглощают Mn из почв Аллеганского плато на северо-востоке Огайо [Herndon et al., 2019]. На юго-востоке Смоленско-Московской возвышенности вне зависимости от видового состава леса растения наиболее интенсивно поглощают Mn, Zn, Cu [Исаченкова, Тарзаева, 2006], участвующие в метаболизме [Kabata-Pendias, 2011]. Широколиственные деревья вовлекают в биологический круговорот больше элементов, чем хвойные [Исаченкова, Тарзаева, 2006],

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, мл. науч. с., аспирант; *e-mail:* polimail@inbox.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* semenkov@geogr.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* asejeva@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* oasamonova@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, техник, магистрант; *e-mail:* y_nastia@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с.; *e-mail:* Elena_terskaya@mail.ru

а травы активнее деревьев поглощают Cu, Sr. Последние слабо поглощают Pb [Kabata-Pendias, 2011] и сильно – Sr [Watmough, 2014].

Цель работы – оценка миграции металлов в системе «породы–почвы–растения» катены в Центральном-Лесном заповеднике (ЦЛЗ) с анализом радиальной дифференциации почв, состава растений и связи элементного состава почв и растений.

Материалы и методы исследования. В ЦЛЗ (юг части Валдайской возвышенности) из-за выровненного рельефа, слабой водопроницаемости пород

и избыточного увлажнения господствуют не хвойно-широколиственные, а южно-таёжные ельники, занимающие соответственно 17 и 47% его площади [Смирнова и др., 1999]. На пологом (<2°) склоне междуречья в южной части заповедного ядра ЦЛЗ исследована катена от вершины моренного холма до плоской террасовидной поверхности с временным водотоком вблизи трансекты (рис. 1), где сотрудники ИПЭЭ имени А.Н. Северцова РАН наблюдают за эталонными экосистемами [Puzachenko et al., 2013]. Катена сложена по-

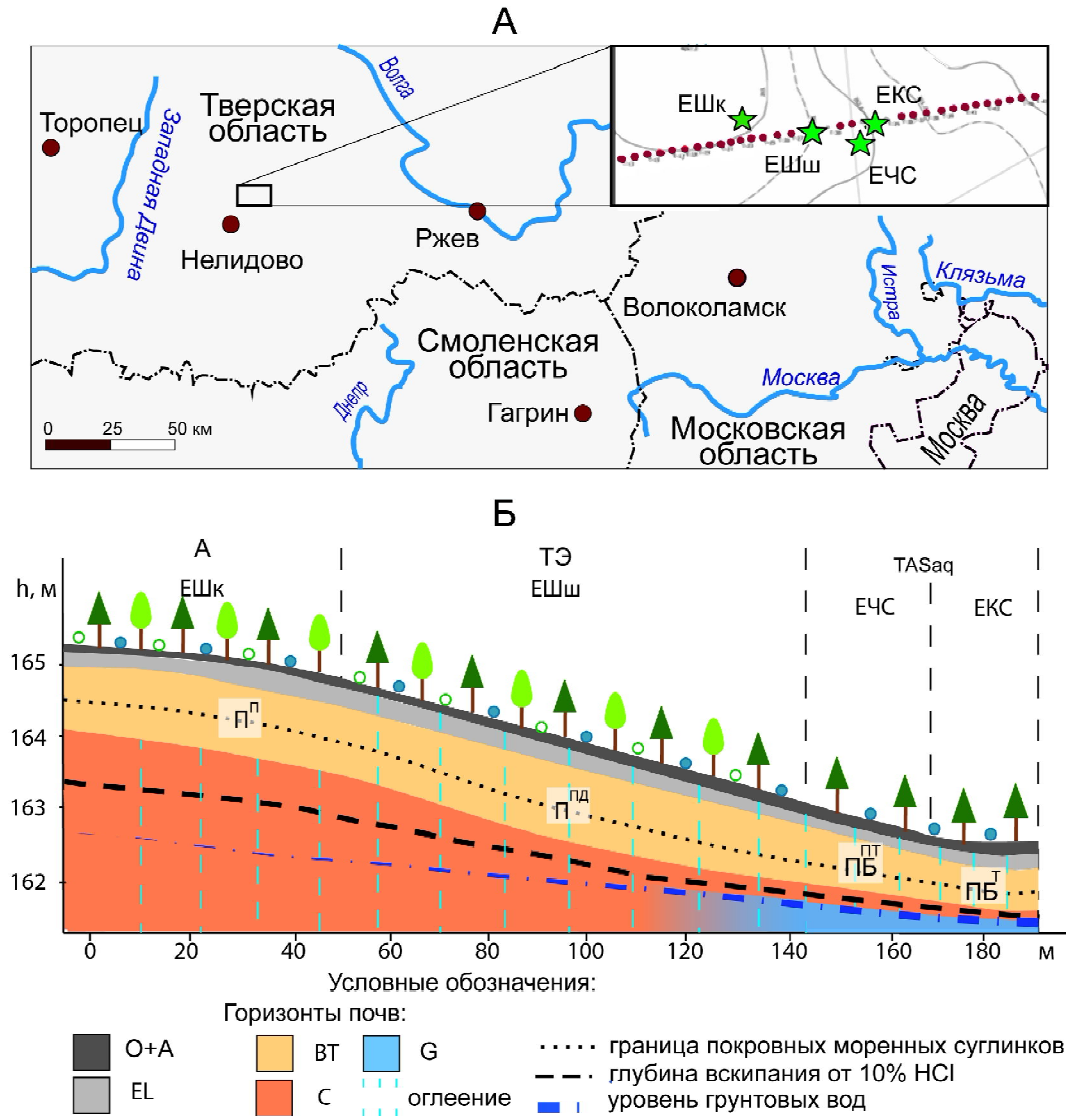


Рис. 1. Территория исследования. А – южнотаёжная катена на территории заповедника и расположение разрезов, Б – схематический профиль катены; ЕШк – липово-еловый лещиново-кисличный лес на подзолистой почве (П^п), ЕШш – елово-широколиственный лещиново-широколистный лес на дерново-подзолистой почве (П^{пд}), ЕЧС – ельник чернично-сфагновый на торфянисто-перегнойной подзолистой профильно-оглеенной почве (ПБ^{пт}) и ЕКС – ельник кислично-сфагновый на торфянистой подзолистой профильно-оглеенной (ПБ^т) почве; А – гумусовый, О – органический, EL – элювиальный, В – текстурный, С – почвообразующая порода, G – глеевый

Fig. 1. Study area. A – Southern taiga catena in the reserve and location of the sections, Б – schematic profile of catena; ЕШк – *Ti lia cordata*+*Picea abies* *Corylus avellana*–*Oxalis acetosella* plant community on П^п – Endocalcaric Albic Stagnic Retisols (Loamic), ЕШш – *Picea abies*+*Tilia cordata*+*Acer platanoides*–*Corylus avellana*–grass plant community on П^{пд} – Albic Stagnic Retisols (Humic, Loamic), ЕЧС – *Picea abies*–*Vaccinium myrtillus*–*Sphagnum* sp. and ЕКС–*Picea abies*–*Sphagnum* sp. plant communities on ПБ^{пт} and ПБ^т, respectively, – Albic Gleyic Histic Retisols (Loamic). Horizons: A – humus, O – organic, EL – albic, B – argic, C – parent material, G – gleyic

кровными суглинками, подстилаемыми на 90–120 см красно-бурыми моренными отложениями Валдайского оледенения с присутствием карбонатов [Пузаченко, Козлов, 2007; Kaganova, Malinina, 2009].

В пределах катены зональные хвойно-широколиственные леса произрастают в автономном (А) и трансэлювиальном (ТЭ) ландшафтах, а хвойные южнотаежные леса – в трансаккумулятивном супераккумулятивном (TASaq). В хорошо дренируемом А-ландшаф-

те сформировались грубогумусированные подзолистые почвы со слабокислой средой в верхних горизонтах и щелочной – в породе (рис. 2) и системой горизонтов O–ao–AYEL–ELf–BEL–BT–2BTca–2Cg,ca под липово-еловым лещиново-кисличным лесом с примесью клена остролистного *Acer platanoides* и вяза шершавого *Ulmus glabra*. На выпуклом склоне ТЭ-ландшафта сформировались дерново-подзолистые почвы с набором горизонтов O–AY–AYEL–ELf,g,y–BELg–BT–2BT(g)–2C(g) под

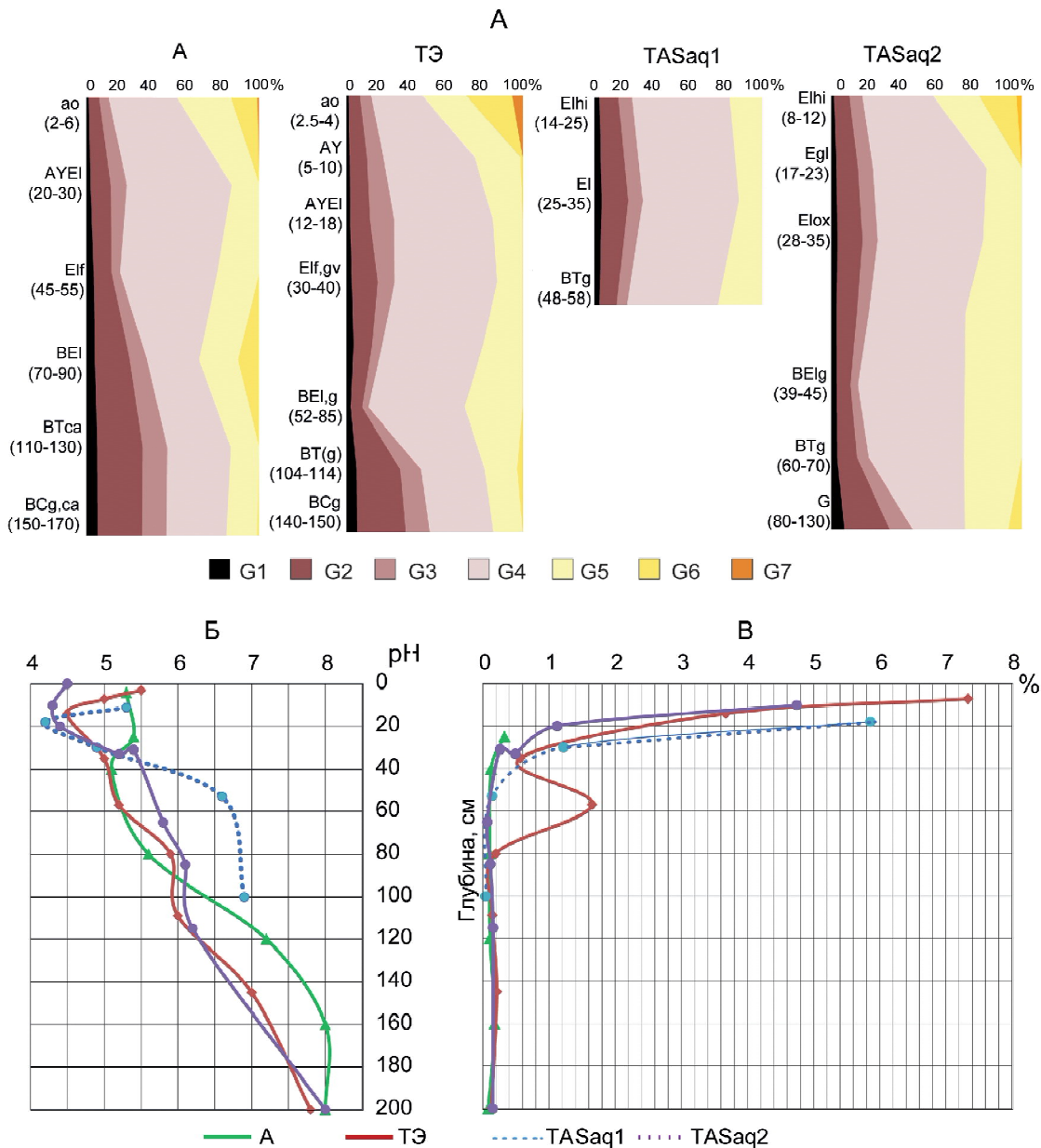


Рис. 2. Свойства почв южнотаежной катены. А – гранулометрический состав: G1 – ил (<1 мкм); G2 – мелкая (5–1), G3 – средняя (10–5) и G4 – крупная (50–10) пыль; G5 – тонкий (250–50); G6 – средний (500–250) и G7 – крупный (1000–500) песок. Б – профильное распределение величины рН и В – профильное распределение органического углерода в разрезах: А – автономного ландшафта вершины холма, ТЭ – трансэлювиального ландшафта склона, TASaq1 – трансаккумулятивно-супераккумулятивного ландшафта нижней части склона, TASaq2 – трансаккумулятивно-супераккумулятивного ландшафта неглубокой потяжины

Fig. 2. Soil properties in southern taiga catena: А – grain size: G1 – clay (<1 mm); G2 – very fine (5–1), G3 – medium (10–5) and G4 – coarse (50–10) silt; G5 – fine (250–50), G6 – medium (500–250) and G7 – coarse (1000–500) sand; Б – pH and В – total organic carbon in soil profiles located within: А – autonomous landscape of a hill summit, ТЭ – trans-eluvial landscape of a slope, TASaq1 – trans-accumulative-super-aqual landscape of the lower part of a slope, TASaq2 – trans-accumulative-super-aqual landscape of a gully bottom

елово-широколиственным (липа сердцевидная *Tilia cordata*) кустарниково (*Corylus avellana*)-разнотравным лесом. Травянистый ярус представлен неморальными: печёночницей благородной *Hepatica nobilis*, подмаренником душистым *Galium odoratum*, ясноткой зеленчуковой *Lamium galeobdolon*, копытнем европейским *Asarum europaeum*, медуницей неясной *Pulmonaria obscura*, а также орляком обыкновенным *Pteridium aquilinum*, хвощом лесным *Equisetum sylvaticum*, кислицей обыкновенной *Oxalis acetosella*. У подножья склона (TASaq1-ландшафт) на торфянисто-перегнойных подзолистых профильно-оглеенных почвах с набором горизонтов O–H–ELhi,g–ELnn,ox–BTg–2BTg–2Cg,ca произрастает ельник чернично-сфагновый с подростом липы сердцевидной и клена остролистного и подлеском из рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia*. В более увлажненной неглубокой потяжине (TASaq2-ландшафт) сформировались торфянистые подзолистые профильно-оглеенные почвы с системой горизонтов T–Elhi,ox,nn–BELg,y,nn–BTg–2BTg–2G под ельником кислично-сфагновым с ивой козьей *Salix caprea*, подростом ели обыкновенной и липы сердцевидной.

Почвы (31 проба) и растения (87 проб 19 видов; в работе в основном рассмотрены сквозные виды, встречающиеся по всей катене) опробованы в июне 2017 г. Рядом с каждым разрезом дерева опробовали с нескольких особей в пределах площадки 10×10 м или разных сторон одного дерева по методике [Терехина, 2010]. Кору срезали ножом на высоте 1,0–1,5 м по окружности ствола. Отдельные виды трав и кустарников собирали в радиусе до 7 м от разреза для получения представительной пробы необходимой массы.

На географическом факультете МГУ определяли зольность, величину pH в суспензии на pH-метре «Эксперт-pH» в статических условиях, содержание органического углерода (C_{org}) – титриметрически с фенолантрапиловой кислотой по И.В. Тюрину. Тяжелые металлы (ТМ) в почвах и растениях определяли в ВИС им. Н.И. Федоровского методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах «Agilent 7500cx» и «Elan-6100» соответственно.

Региональные геохимические особенности почв оценены путем сравнения валовых содержаний ТМ в почвах с кларками верхней части континентальной коры и наземных растений. Для выявления специфических черт состава растений вычислен коэффициент ОСВР (относительное содержание в видах растений) – отношение содержания ТМ в золе изучаемого вида к содержанию в золе эталонного – листьях липы в нашем случае. Перераспределение ТМ по органам оценено с помощью коэффициента ОСОР (относительное содержание в органах растений) – отношение содержания ТМ в изучаемом органе к содержанию элемента в крупных ветвях. Для оценки характера извлечения ТМ из почв растениями рассчитан коэффициент биологического поглощения A_x – отношение количества элемента в золе растений к его содержанию в почвообразую-

щей породе. Суммарная интенсивность вовлечения ТМ в биологический круговорот (БИК) оценена по показателю биогеохимической активности вида (БХА) – сумме $A_x > 1$.

Результаты и обсуждение. Все изученные почвы суглинистые, текстурно дифференцированы: содержат более 10% частиц размером <0,01 мм, элювиальный горизонт EL обогащен пылеватыми фракциями, а содержание ила максимально в текстурном горизонте BT и породе (рис. 2а), т. к. почвы развиваются на двучленных моренных карбонатных отложениях. Содержание илистой фракции повышено также в почвообразующих породах карельской тайги [Lukina et al., 2019]. Величина pH (см. рис. 2б) варьирует от сильнокислых значений в верхних горизонтах почв TASaq-ландшафта до щелочных в карбонатных почвообразующих породах, что соответствует разбросу значений в почвах ЦЛЗ [Маряхина и др., 2009]. Содержание C_{org} резко падает с глубиной (см. рис. 2в).

Элементный состав почв. Для почв катены характерны околосларковые содержания Mn, Pb и пониженные – Cu, Fe, Zn (кларк рассеяния, $KP=2$), Ni, Sr, Cr за счет развития на переотложенном ледниками субстрате в гумидном климате. Содержание ТМ укладывается в разброс среднего для дерново-подзолистых почв Евразии [Семенков и др., 2016] и пахотных почв северной части Европы, сформировавшихся на моренных и коренных породах Скандинавии [Reimann et al., 2018]. Содержание Cr, Cu, Fe, Ni, Sr находится на нижнем диапазоне разброса средних значений для дерново-подзолистых почв Евразии, Mn, Pb, Zn – на верхнем. Наименьшее значение наблюдается для Fe в гумусовом горизонте почв А и ТЭ-ландшафтов из-за высоких значений pH.

В горизонтах A0 и AY подзолистых и дерново-подзолистых почв А и ТЭ-ландшафтов содержание Pb (табл. 1, рис. 3) относительно почвообразующей породы повышено в три раза, Mn и Zn – в два раза, что согласуется с данными по почвам ЦЛЗ [Karavanova, Malinina, 2009]. Для Pb обнаружена положительная корреляционная зависимость с гумусом (0,68), а накопление Zn в верхних горизонтах почв объясняется устойчивостью его органоминеральных комплексов [Kabata-Pendias, 2011]. В горизонте EL понижено содержание Fe, Ni, Sr, Zn; в BT повышено содержание Cr, Ni, Cu, понижено – Sr, Mn.

В подстилке склоновых дерново-подзолистых почв относительно подзолистых почв междуречья повышено валовое содержание ТМ и понижено – в почвах TASaq-ландшафта, откуда металлы выносятся в более гидроморфных глеевых условиях. Минимальные различия между содержаниями на склоне и междуречье характерны для Cr, Ni, Cu, Zn, Mn.

Элементный состав растений. Важной характеристикой растений является элементный состав золы [Авессаломова, 2020]. В древесных видах зольность (табл. 2) максимальна в листьях вяза (10%) в А-ландшафте, минимальна – в хвое ели (3–4%). Зольность листьев липы увеличивается от А к

Таблица 1

Элементный состав почв южнотаежной катены, мг/кг

Ландшафт, горизонт, <i>n</i>		Mn	Fe, %	Zn	Sr	Cu	Ni	Cr	Pb
А	ао, 1	573	0,5	91	59	12	9	20	34
	EL, 2	1071	1,4	43	101	10	11	29	18
	BT, 3	756	1,6	66	90	21	22	47	16
	Сса, 1	510	1,3	58	108	17	20	41	13
ТЭ	ао, 2	1386	0,4	112	69	12	23	19	35
	EL, 2	693	1,1	39	92	8	10	37	14
	BT, 4	756	1,7	78	91	23	29	52	17
	Сса, 1	693	1,3	73	127	18	21	44	14
ТАСаq1	Н, 1	69	0,9	29	29	10	7	17	33
	ELg, 1	151	0,4	25	80	6	6	27	16
	EL, ох, 1	252	0,6	25	101	6	7	28	13
	BC, 1	592	1,0	36	109	13	12	28	13
ТАСаq2	Т, 1	391	1,1	39	98	13	14	32	13
	EL, 3	214	0,4	24	95	4	5	27	
	BTg, 4	498	1,3	46	112	20	21	35	15
	G, 2	693	1,6	55	96	20	24	46	15
Дерново-подзолистые почвы [Семенов и др., 2016]		10–2300	0,8–4,6	30–100	50–400	5–60	7–90	5–140	5–33
Кларк верхней части континентальной коры		774*	3,9*	67*	320*	27**	47*	92*	17*

n – число проб, * [Rudnick, Gao, 2003], **[Hu, Gao, 2008].

ТЭ-позиции, уменьшаясь с увеличением увлажненности. Среди растений нижнего яруса максимальна зольность хвоща (23%) в ТЭ-ландшафте и минимальна – орляка (7%) и сфагнома (4%), что сопоставимо с данными [Александрова и др., 1970]. Зольность кислицы варьирует в диапазоне 9–13%.

Изученные виды растений содержат околокларковые количества Cu, Zn, Ni (рис. 4). Ветки и кора деревьев обеднены Fe и Cr, сфагнум – Sr. Из-за высокой активности Mn [Kabata-Pendias, 2011] в сильно увлажненных кислых почвах ЦЛЗ поглощение Fe снижается.

Растения катены умеренно накапливают изученные ТМ (ОСВР=0,04–25) за исключением сфагнома – сильного концентратора Pb₅₅ (подстрочный индекс – значения ОСВР). В листьях липы концентрация Cr, Fe, Mn, Zn минимальна в полугидроморфных ландшафтах нижней части склона. Относительно нее в деревьях максимально число элементов с ОСВР>2,4 в хвое ели, которая в А и ТЭ-ландшафтах обогащена Pb и Mn, и листьях клена (Pb₃₋₈). С увеличением гидроморфизма при сохранении основных черт биогеохимической специализации оба вида относительно липы накапливают Zn₃₋₅ и клен – Mn. По

сравнению с широколиственными породами, фотосинтезирующие органы ели слабее накапливают Cu_{0,4-0,7}. В ТАСаq-ландшафте с увеличением увлажненности почв ель с приповерхностной корневой системой и минеральным питанием, зависящим от вещественного состава подстилки, слабее накапливает в хвое Cu_{0,4}, что связано с пониженным содержанием и доступностью металла в верхних горизонтах [Sukhareva, Lukina, 2014].

Большинство видов растений нижних ярусов, за исключением сфагнома, слабо накапливают Ni, Cu, Sr (ОСВР=0,02–0,4). Травы (особенно орляк) концентрируют Fe₁₋₆ и малоподвижный Cr_{<19}. Сфагнум выделяется аккумуляцией ТМ с низкой биофильностью – Pb₅₅Cr₁₉Fe₆Cd₃Ni₂, что является его типичной особенностью благодаря большому количеству пор и водозапасающих клеток [Авессаломова, 2007; Market, et al., 2015].

Распределение ТМ зависит от их биологической активности и роли. В старых, малоактивных крупных ветках и коре концентрируются Zn, Cu, Pb (ОСВР=0,8–1,5), что отмечали ранее для Zn в ели и связано с малой подвижностью Pb в растениях и средством Cu с материалом клеточных стенок дре-

Таблица 2

Элементный состав и зольность растений, мг/кг

Ландшафт и вид		Орган	Зольность, %	Mn	Fe	Zn	Sr	Cu	Ni	Cr	Pb
А	Ель	хвоя	3	1950	60	16	11	2,5	2	0,5	0,4
		ветки>5мм	1,1	627	11	35	11	5	1,4	0,3	0,3
		ветки<5мм	2	760	40	34	13	5,3	2,9	0,5	0,6
		кора	3,7	555	37	75	21	3,7	1,4	0,2	0,6
	Липа	листья	6,7	804	67	20	27	7,6	2,3	1,1	0,1
		ветки>10мм	4,4	396	44	33	55	4,8	3,5	0,8	1,1
		ветки<10мм	5,1	459	0	119	66	6,2	3,8	0,4	0,2
		кора	4,4	836	0	4	63	5,7	2,1	0,2	0,6
	Клен	листья	6,1	1586	61	40	24	5,1	1,8	0,2	0,1
		ветки	4	680	40	29	46	4,1	1,3	0,1	0,6
кора		9,7	3977	0	65	90	11,6	2,5	56	1	
Кислица	л+с	12	600	240	27	26	7,1	1,1	0,6	0,2	
Орляк	л+с	8,9	623	445	30	14	8,4	4,1	5,2	0,4	
ТЭ	Ель	хвоя	4,3	1462	43	30	19	2,5	1,3	0	0,2
		ветки>5мм	1,8	324	18	29	12	3,3	1	0	0,2
		ветки<5мм	2,4	864	48	58	27	5	2,5	0,6	1,1
		кора	3,9	507	0	79	18	4,2	1,1	0	0,3
	Липа сердцевидная	листья	7,4	592	74	25	29	9,3	1,6	0,5	0,1
		ветки>10мм	5,2	156	0	38	33	3	2,3	0,3	0,3
		ветки<10мм	5,7	171	0	63	45	4,4	1,8	0,2	0,3
		кора	6,8	544	0	2	56	3,6	1,4	0	0,1
	Клен	листья	5,5	1210	55	42	20	5,9	1	0,5	0,3
		ветки>1см	2,6	338	0	10	18	2,1	0,7	0,2	0,2
кора		10,1	1616	0	30	94	5,1	2,1	0	0,2	
Орляк	л+с	7	560	140	49	11	8	1,7	0,9	0,1	
Кислица	л+с	12,7	508	127	30	20	8,8	1,1	0,3	0,3	
ТАСаq1	Ель	хвоя	3,9	390	39	44	20	2,5	0,6	0,1	0,1
		ветки>5мм	1,6	128	16	32	15	3,8	0,5	0,1	0,4
		ветки<5мм	5,7	228	57	48	21	4,6	1	0,4	1
		кора	3,8	266	38	79	15	2	1,1	0,1	0,2
	Липа*	листья	7,2	216	72	18	13	7,6	1	0,4	0,1
		ветки>5мм	4,3	86	43	15	28	4,6	1,2	0,5	0,7
		кора	7,6	304	0	7	48	4,6	1,2	0,5	1,9
Клен*	листья	5,1	663	51	32	12	3,5	0,8	0,2	0,1	
ТАСаq2	Ель	хвоя	3,4	510	34	19	10	2	0,8	0,1	0,2
		ветки>5мм	1,8	144	18	30	7,6	3,9	0,7	0,2	0,6
		ветки<5мм	1,7	187	68	31	9,5	5	1,2	0,5	1,6
		кора	6,1	305	0	83	8,8	2,1	0,9	0,2	0,2
	Липа*	листья	6,2	558	124	13	22	8,7	1,4	0,2	0,1
		ветки	6,9	69	0	28	29	5,2	1,1	0,3	0,3
	Клен*	листья	4,1	1804	41	28	13	5,5	1,2	0,1	0,1
	Орляк	л+с	6,8	272	136	21	9,5	6,4	1,6	1	0,1
Кислица	л+с	9,4	846	94	23	22	4,9	1	0,3	0,2	
Сфагнум	л+с	4	600	400	49	0,8	4,8	2	2,8	3,7	
Кларк наземных растений [Market et al., 2015]				200	150	50	50	10	1,5	1,5	1

Примечание: л+с – листья и стебли, *- подрост.

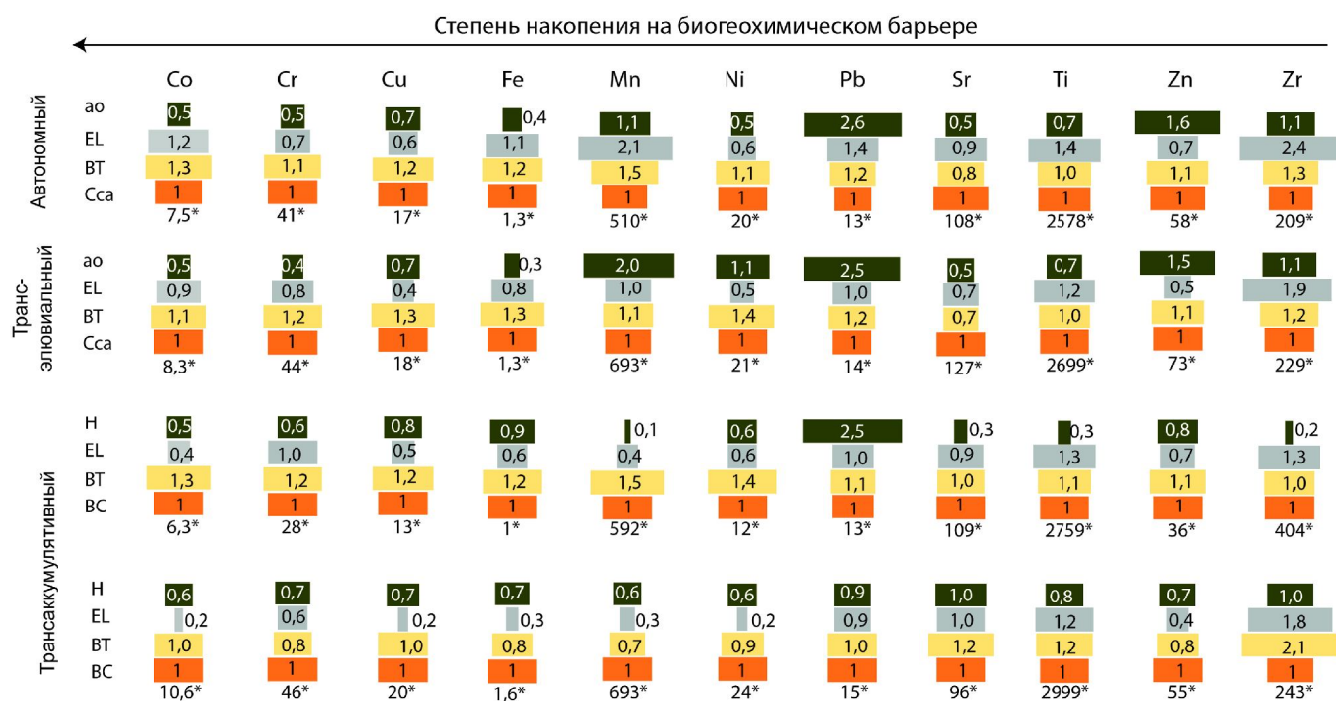


Рис. 3. Радиальная дифференциация содержания ТМ в почвах. * – значения, принятые за 1, мг/кг

Fig. 3. Radial differentiation of heavy metals content in soils. * – values taken as 1 (mg/kg)

весины [Авессаломова, 2007; Kabata-Pendias, 2011; Gandois, Probst, 2012; Железнова, 2017]. Участвующий в фотосинтезе Mn [Kabata-Pendias, 2011] накапливают (ОСОР=1–8) вегетативные органы растений ЦЛЗ.

Поглощение элементов растениями. В южнотаежной катене деревья интенсивнее трав концентрируют ТМ (табл. 3), особенно Mn и Zn ($Ax > 73$; далее – подстрочным знаком), которые в тайге относят к элементам интенсивного накопления [Авессаломова, 2007, 2020]. Высокая подвижность в почвах Zn и его активное поглощение растениями отмечали ранее [Huang et al., 2011; Kabata-Pendias, 2011]. Широколиственные клен и дуб содержат больше Mn. Мелколиственные осина, береза, липа избирательно аккумулируют Zn [Железнова и др., 2017]. Высокое содержание биофильных ТМ в листьях деревьев – преобладающей части опада [Базилевич, Титлянова, 2007] – определяет поверхностно-аккумулятивное распределение в почвах. Поступающие с опадом легкодоступные органоминеральные соединения и образующиеся при разложении кислоты повышают подвижность ТМ в почве: в ельниках разложение опада обогащает почву питательными веществами вблизи деревьев больше, чем на удалении [Vade et al., 2015]. А-горизонты почв таежных ландшафтов обогащены доступными для растений соединениями ТМ [Семенков и др., 2019].

К ТМ среднего накопления во всех изученных ландшафтах отнесены Ni, Sr Cu. В подчиненном ландшафте Ni₄₋₁₈ активнее извлекается из почв, т. к. повышение рН ингибирует поглощение металла

[Kabata-Pendias, 2011]. В ветках и коре деревьев концентрируются Sr_{>30} в листьях липы и травах – Cu₆₋₄₆, что ранее описано для тайги центра Восточно-Европейской равнины и Канады [Железнова и др., 2017; Watmough, 2014]. В ветках ели наблюдаемый разброс значений Ax для Cu₁₉₋₄₆, вероятно, обусловлен различным возрастом деревьев [Kabata-Pendias, 2011]. В ЦЛЗ при высокой межвидовой вариабельности слабее вовлекаются в БИК Cr_{0-0,7} и Fe_{0,01-0,7}. Так, травы активнее деревьев поглощают Fe.

В листьях деревьев (липы, клена) А и ТЭ-ландшафтов интенсивнее всего накапливается участвующая во многих физиологических процессах Cu₅₋₁₂. В ветках и коре задерживается выполняющий скелетные функции Sr₁₆₋₂₁ (см. табл. 3). В хвое ели содержится много Mn₁₂₋₂₄, т. к. он не связывается с нерастворимыми органическими соединениями и легко переносится в растениях [Peng et al., 2008]. В ветках накапливаются относительно малоподвижные Cu₁₉₋₄₆, в коре – Zn₁₈₋₂₄. Произрастающий в А-ландшафте вяз слабо накапливает Mn и Zn, поглощению которых, вероятно, препятствует высокое содержание Cu в растении [Kabata-Pendias, 2011].

В травах и кустарниках А и ТЭ-ландшафтов на первом месте в ряду биологического поглощения стоит Cu₆₋₁₉, играющая важную физиологическую роль. Высокое поглощение Cu объясняется синергизмом с подвижным Mn [Kabata-Pendias, 2011]. У большинства растений ТАСа-ландшафта в ряду биологического поглощения первым стоит Mn, который при пониженном содержании в почве может

Таблица 3

Поглощение металлов растениями

Ланд-шафт	Ярус	Вид	Орган	Ряды биологического поглощения по значениям Ах						БХА
				Интенсивного и среднего накопления		Слабого накопления и сильного захвата		Среднего и (очень) слабого захвата		
				30	10	1	0,1	0,01		
А	Д	Ель обыкновенная	хвоя	–	Mn ₂₄	CuNi ₈ SrZn ₆	Cr ₁	Pb _{0,7} Fe _{0,2}	–	53
			ветки	Cu ₄₀ Zn ₃₂	Mn ₂₀ Sr ₁₆ Ni ₁₄	CrPb ₁	Fe _{0,2}	–	–	125
			кора	–	Zn ₂₄ CuSr ₁₀	Mn ₆ Ni ₃ Pb ₁	Cr _{0,4} Fe _{0,1}	–	–	56
		Липа сердцевидная	листья	–	Cu ₁₂	Sr ₇ Mn ₃ Ni ₄ Zn ₃	Cr ₁ Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	–	31
			ветки	–	Sr ₁₉ Cu ₁₀	Ni ₈ Zn ₇ Mn ₃	Pb ₃ Cr ₁	Fe _{0,1}	–	49
			кора	–	Sr ₂₁ Cu ₁₂	Mn ₆ Ni ₅	Zn _{0,8} Pb _{0,7} Cr _{0,2}	Fe _{0,1}	–	46
		Клен остролистный	листья	–	Mn ₁₀	Cu ₈ ZnSr ₇ Ni ₄	Cr _{0,3}	FePb _{0,1}	–	35
			ветки	–	Sr ₁₉ Cu ₁₀	Zn ₈ Mn ₇ Ni ₄	Pb _{0,8} Cr _{0,2}	Fe _{0,1}	–	48
			кора	Cr ₃₆	SrMn ₁₆ Cu ₁₂	Zn ₈ Ni ₃	Pb _{0,6}	Fe _{0,1}	–	91
		Вяз шершавый	листья	–	–	Cu ₅ Sr ₅ Ni ₂	Zn _{0,9} Mn _{0,4}	CrFePb _{0,1}	–	14
			ветки	–	Sr ₁₆ Cu ₁₀	Ni ₄ Zn ₃	Pb _{0,6} Mn ₃ Cr _{0,3}	Fe _{0,1}	–	34
			кора	Sr ₃₀	Cu ₁₁	Ni ₄	Zn _{0,7} Mn _{0,3} Pb _{0,2}	–	FeCr	45
т-к	Кислица обыкновенная	–	–	Cu ₆ Sr ₄ Zn ₂ Mn ₂	Ni ₁ Cr _{0,3} Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	–	15		
	Орляк обыкновенный	–	–	Cu ₉ Ni ₅ ZnCr ₄ SrMn ₃	Fe _{0,7} Pb _{0,3}	–	–	28		
ТЭ	Д	Ель обыкновенная	хвоя	–	Mn ₁₂	SrZn ₆ Cu ₅ Ni ₃	Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	Cr	32
			ветки	–	Cu ₁₉ Zn ₁₆ Sr ₁₁	Mn ₈ Ni ₆	Pb _{0,5}	Fe _{0,1}	Cr	60
			кора	–	Zn ₁₈ Cu ₁₀	Sr ₇ Mn ₅ Ni ₃	Pb _{0,3}	–	FeCr	45
		Липа сердцевидная	листья	–	Cu ₁₁	Sr ₅ Zn ₃ Mn ₃ Ni ₂	Cr _{0,4} Fe _{0,1}	Pb _{0,02}	–	25
			ветки	–	–	Sr ₉ Zn ₆ Cu ₅ Ni ₄	Mn ₁ Cr _{0,3} Pb _{0,2}	–	Fe _{0,003}	25
			кора	–	Sr ₁₂	Cu ₅ Mn ₃ Ni ₂	Zn _{0,3}	Pb _{0,1}	FeCr	23
		Клен остролистный	листья	–	Cu ₁₁	Mn ₉ Zn ₇ Sr ₆ Ni ₂	Cr _{0,6} Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	–	36
			ветки	–	Sr ₁₁	Cu ₉ Mn ₆ Zn ₄ Ni ₃	Cr _{0,5} Pb _{0,3}	Fe _{0,01}	–	34
			кора	–	Sr ₁₃	Mn ₆ Cu ₄ Zn ₃ Ni ₂	–	Pb _{0,1}	Fe Cr	28
		т-к	Кислица обыкновенная	–	–	Cu ₇ SrZnMn ₂	Ni ₁	CrFe Pb _{0,1}	–	14
			Орляк обыкновенный	–	Cu ₁₀	Zn ₆ Mn ₃ Ni ₃ Sr ₂	Cr _{0,7} Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	–	26
		ТАСаq	Д	Ель обыкновенная	хвоя	Mn ₈₆	Zn ₁₃	Cu ₇ Sr ₃ Ni ₅	Cr _{0,5} Pb _{0,4} Fe _{0,3}	–
ветки	Mn ₆₆ Zn ₄₉ Cu ₃₄				Ni ₁₁	Sr ₉ Pb ₂	Cr ₁ Fe _{0,3}	–	–	167
кора	Mn ₃₅ Zn ₃₄				–	Cu ₅ NiSr ₃	Cr _{0,5} Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	–	80
Липа сердцевидная	листья			Mn ₅₅	Cu ₁₉	Sr ₇ Zn ₃ Ni ₅	Cr _{0,5} Fe _{0,4}	Pb _{0,1}	–	92
	ветки			–	Cu ₁₁ Zn ₁₀	Sr ₈ Mn ₇ Ni ₄	Cr _{0,5} Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	–	41
Клен остролистный	листья			Mn ₂₆	Sr ₁₃	Cu ₉ Ni ₄ Zn ₃ Pb ₂	Cr _{0,8}	Fe _{0,1}	–	57
Ива козья	листья			Zn ₃₆	Cu ₂₇ Mn ₁₁ Sr ₁₀	Ni ₅	Fe _{0,3}	Pb _{0,1}	Cr	90
	ветки			Zn ₄₄	Sr ₁₀	Cu ₉ Mn ₇ Ni ₆	Cr ₁ Pb _{0,4}	Fe _{0,1}	–	78
	кора			Zn ₇₃	Sr ₁₄	Cu ₁ Mn ₉ Ni ₆	Pb ₁ Cr _{0,5}	Fe _{0,1}	–	112
т-к	Кислица обыкновенная			Mn ₅₆	–	Cu ₇ Zn ₆ Sr ₄ Ni	Cr _{0,3} Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	–	76
	Орляк обыкновенный			–	Mn ₂₅ Cu ₁₃	Zn ₈ Ni ₅ Sr ₃	Cr Fe _{0,4}	Pb _{0,1}	–	57
	Сфагнум			Mn ₉₄ Zn ₃₀	Cu ₁₆ Ni ₁₂ Cr ₁₀	Sr ₈ Pb ₆ Fe ₂	–	–	–	179

Д – древесный, т-к – травяно-кустарниковый. Полужирный – значения БХА > 50

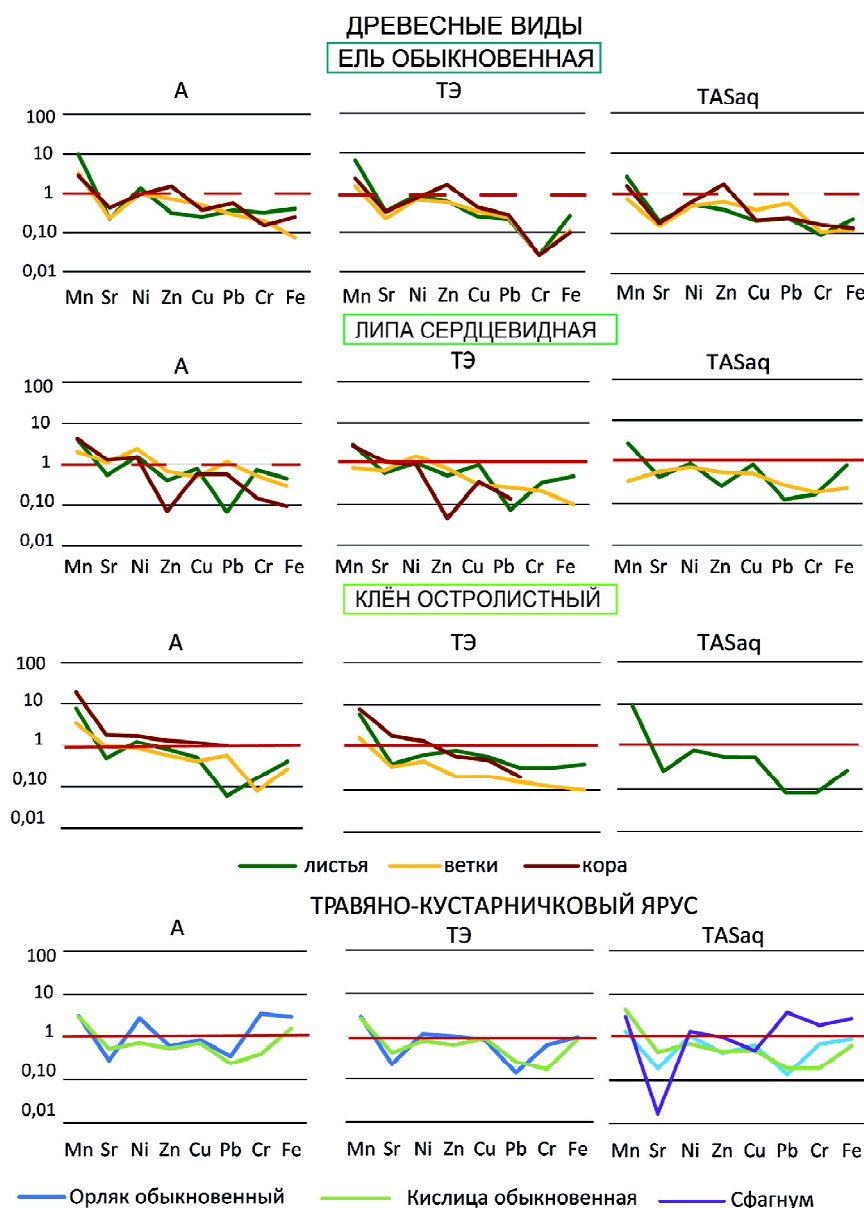


Рис. 4. Геохимические спектры элементного состава растений катены (КК) относительно кларков живого вещества [Market et al., 2015]
 Fig. 4. Geochemical spectra for plants in the studied catena: the content of elements in catena plants (KK) is normalized to clarkes of living matter [Market, Franzle, 2015]

задерживаться в старых органах [Watmough et al., 2007]. Кроме того, в кислых почвах с высоким содержанием органического вещества повышается его доступность [Kabata-Pendias, 2011]. Ах максимален в вегетативных органах бореальных растений: хвое ели (Mn_{86}) и сфагнуме (Mn_{94}). Исключение составляет ива, все органы которой интенсивно накапливают подвижный Zn_{36-73} , вероятно, благодаря видовым особенностям, что отмечали ранее на пойме Иртыша [Макарова, 2009].

В изученных растениях ЦЛЗ БХА варьирует в пределах 14–186 с наибольшим вкладом Mn, Cu, Sr, Zn, Ni. В фотосинтетически активных органах БХА максимальна у ели (33–120), липы (25–94), ивы (94), сфагнума (186), минимальна – у вяза (14) и клена (35–58). Все изученные виды трав (представи-

тели семейств Гиполеписовые, Кисличные и Сфагновые) биогеохимически наиболее активны в TAsaq-ландшафте, где в глеевой обстановке повышена подвижность многих металлов, особенно Fe, Zn, Mn. Ландшафтно-геохимические условия влияют минимально на БХА клена (35–58) с минимальной вариабельностью химического состава зеленой фитомассы.

Выводы:

– почвы катены содержат околочларковые уровни Mn, Pb, Ti, Zr, пониженные – Co, Cu, Fe, Zn, Ni, Sr, Cr. А-горизонты всех изученных почв относительно почвообразующей породы обогащены Pb, Mn, Zn. В горизонте EL понижено содержание Fe, Ni, Sr, Zn. В органогенных горизонтах почв ТЭ-ландшафта валовое содержание металлов повышено, а TAsaq –

понижено при минимальной вариабельности Cr, Ni, Cu, Zn, Mn;

– фотосинтетические органы большинства деревьев (липа, клен, вяз, ель) ЦЛЗ накапливают Mn, Zn, Cu. Травы и кустарники относительно деревьев концентрируют ТМ с низкой биофильностью (Fe и реже Cr). Низкозольный сфагнум умеренно концентрирует широкий спектр ТМ с относительно низкой биофильностью – Fe, Cr, и Pb. В распределении ТМ по надземным органам деревьев прослеживаются разные пути накопления: в широколиственных липе и клене сильнее концентрация в фотосинтезирующих органах, а в хвойных (ели) – в ветках и коре;

– в лесных ландшафтах ЦЛЗ катенарная биогеохимическая дифференциация проявляется в снижении концентрации ТМ в растениях по мере усиления гидроморфизма: в листьях липы – Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, в хвое ели – Pb, Mn из-за обеднения верхних горизонтов почв многими металлами. Ландшафтно-геохимические условия наиболее существенно влияют на содержание в растениях Mn, Ni, Fe и минимально – Zn, Sr, Cu;

– фотосинтетические органы большинства деревьев (липа, клен, вяз, ель) ЦЛЗ накапливают Mn, Zn, Cu. Травы и кустарники относительно деревьев концентрируют ТМ с низкой биофильностью (Fe и реже Cr). Низкозольный сфагнум умеренно концентрирует широкий спектр ТМ с относительно низкой биофильностью – Fe, Cr, и Pb. В распределении ТМ по надземным органам деревьев прослеживаются разные пути накопления: в широко-

лиственных липе и клене сильнее концентрация в фотосинтезирующих органах, а в хвойных (ели) – в ветках и коре;

– в лесных ландшафтах ЦЛЗ катенарная биогеохимическая дифференциация проявляется в снижении концентрации ТМ в растениях по мере усиления гидроморфизма: в листьях липы – Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, в хвое ели – Pb, Mn из-за обеднения верхних горизонтов почв многими металлами. Ландшафтно-геохимические условия наиболее существенно влияют на содержание в растениях Mn, Ni, Fe и минимально – Zn, Sr, Cu;

– в БИК наиболее активно вовлекаются Mn, Zn, Cu, Sr. В TASAq-ландшафте катены повышенная кислотность и увлажненность почв увеличивают поглощение растениями катионогенного Mn. В А и ТЭ-ландшафтах БХА фотосинтезирующих органов уменьшается в ряду: ель ($Ax > 10$) > клен, рябина, лещина ($Ax = 5-10$) > орляк, кислица, вяз ($Ax < 5$). БХА растений южнотаежной катены определяют преимущественно первые три элемента из ряда биологического поглощения: у вяза в А-ландшафте – Cu, Sr, Ni (88–97%); в коре липы в А и ТЭ-ландшафтах – Cu, Sr, Mn (85–88) – при минимальной роли у трав (65–76%) и листьев деревьев (70–73%) А-ландшафта, что говорит о более равномерном распределении ТМ в органах растений верхних звеньев катены. В TASAq-ландшафте обладающие высокой биогеохимической активностью Mn, Cu, Sr, Zn в большей мере определяют и БХА (79–91%) фотосинтетически активных органов деревьев.

Благодарности. Полевые работы выполнены в рамках проекта №04/2018/РГО-РФФИ. Результаты обобщены в рамках проекта РНФ № 19-77-30004. Авторы благодарны Н.С. Касимову за помощь в интерпретации данных и обсуждение результатов, а также сотрудникам ИПЭЭ РАН имени А.Н. Северцова: Р.Б. Сандлерскому и Ю.Г. Пузаченко за содействие в полевых работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авессаломова И.А. Биогеохимия ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 163 с.

Авессаломова И.А. Биогеохимическая специализация растений полесских ландшафтов Озерной Мещеры // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 5. С. 63–72.

Александрова Л.М., Люжин М.Ф., Аршавская В.Ф. Гумусовые вещества почвы (их образование, состав, свойства и значение в почвообразовании и плодородии) // Записки Ленингр. с.-х. ин-та. Ленинград, Пушкин, 1970. Т. 142. 233 с.

Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биокруговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Наука, 2007. 381 с.

Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 2. С. 253–270. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270.

Исаченкова Л.Б., Гарзаева М.В. Сравнительная биогеохимическая характеристика лесных экосистем // Экосистемы широколиственно-хвойных лесов южного Подмосковья. М.: Географический факультет МГУ, 2006. С. 84–97.

Караванова Е.И., Белянина Л.А., Шапиро А.Д., Степанова А.А. Влияние подстилок на подвижность соединений Zn, Cu, Mn, Fe в верхних горизонтах подзолистых почв // Почвоведение. 2006. № 1. С. 43–51.

Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 20–28.

Макарова О.А. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в системе вода–почва–растение в прирусловой части поймы реки Иртыш: дис. ... канд. биол. наук. Омск, 2009. 113 с.

Маряхина Н.Н., Максимова Ю.Г., Толмешта И.И., Соколова Т.А. Химико-минералогическая характеристика подзолистых почв Центрального Лесного заповедника в местах распространения карстовых образований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 3. С. 25–31.

Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С., Бельский Е.А., Беспалова А.Ю., Головченко А.В., Горбачева Т.Т., Добровольская Т.Г., Добровольски В.В., Зукерт Н.В., Исаева Л.Г., Лепенис А.Г., Максимова И.А., Марфенина О.Е., Паникова А.Н., Пинский Д.Л., Полянская Л.М., Стайнес Е., Уткин А.И.,

- Фронтьева М.В., Цибульский В.В., Чернов И.Ю., Яценко-Хмельевская М.А. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.
- Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н. Геоморфологическое развитие территории Центрально-Лесного заповедника // Труды Центрально-Лесного заповедника. 2007. Вып. 4. С. 125–159.
- Семенков И.Н., Терская Е.В., Касимов Н.С. Поведение форм металлов в зональных почвенно-геохимических катенах // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана. М.: АПР, 2016. С. 97–144.
- Семенков И.Н., Терская Е.В., Касимов Н.С. Латеральная дифференциация форм соединений металлов в почвенных суглинистых катенах центра Западно-Сибирской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 3. С. 25–37.
- Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Евстигнеев О.И., Коротков В.Н., Ханина Л.Г. Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия. СПб.: Российское ботаническое общество, 1999. 549 с.
- Терехина Н.В. Методические указания к проведению фитогеохимических исследований. СПб.: Издательский центр «Академия», 2010. 25 с.
- Bade C., Jacob M., Leuschner C., Hauck M. Chemical properties of decaying wood in an old-growth spruce forest and effects on soil chemistry. *Biogeochemistry*, 2015, vol. 122, p. 1–13. DOI: 10.1007/s10533-014-0015-x.
- Gandois L., Probst A. Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles. *Chemosphere*, 2012, vol. 87, p. 204–210. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.12.020.
- Herndon E., Yarger B., Frederick H., Singer D. Iron and Manganese Biogeochemistry in Forested Coal Mine Spoil. *Soil systems*, 2019, vol. 3, no. 1, p. 13. DOI: 10.3390/soilsystems3010013.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chemical Geology*, 2008, vol. 253, no. 3–4, p. 205–221. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2008.05.010.
- Huang J.-H., Ilgen G., Matzner E. Fluxes and budgets of Cd, Zn, Cu, Cr and Ni in a remote forested catchment in Germany. *Biogeochemistry*, 2011, vol. 103, no. 1–3, p. 59–70. DOI: 10.1007/s10533-010-9447-0.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition, CRC Press, 2011. 548 p.
- Karavanova E.I., Malinina M.S. Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve. *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 7, p. 725–737. DOI: 10.1134/S1064229309070035.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Bakhmet O.N., Tikhonova E.V., Tebenkova D.N., Kasakova A.I., Gornov A.V., Smirnov V.E., Knyazeva S.V., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Shashkov M.P., Ershov V.V. The Influence of Vegetation on the Forest Soil Properties in the Republic of Karelia. *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 7, p. 793–807. DOI: 10.1134/S1064229319050077.
- Market B., Franzle S., Wunschmann S. Chemical evolution and the biological system of the elements. Heidelberg: Springer, 2015, 282 p.
- Peng K.J., Luo C.L., You W.X. Manganese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator – *Phytolacca americana* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 154, no. 1–3, p. 674–681. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.080.
- Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite. *Entropy*, 2013, vol. 15, no. 9, p. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970.
- Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Demetriades A., Négrel P., Oorts K., Matschullat J., de Caritat P., Albanese S., Anderson M., Baritz R., Batista M.J., Bel-Ian A., Cicchella D., De Vivo B., De Vos W., Dinelli E., Đuriš M., Dusza-Dobek A., Eggen O.A., Eklund M., Ernst V., Flight D.M.A., Forrester S., Fügedi U., Gilucis A., Gosar M., Gregorauskiene V., De Groot W., Gulan A., Halamić J., Haslinger E., Hayoz P., Hoogewerff J., Hrvatovic H., Husnjak S., Jähne-Klingberg F., Janik L., Jordan G., Kaminari M., Kirby J., Klos V., Kwečko P., Kuti L., Ladenberger A., Lima A., Locutura J., Lucivjansky P., Mann A., Mackovych D., McLaughlin M., Malyuk B.I., Maquil R., Meuli R.G., Mol G., O'Connor P., Ottesen R.T., Pasnieczna A., Petersell V., Pfeleiderer S., Poňavič M., Prazeres C., Radusinović S., Rauch U., Salpeteur I., Scanlon R., Schedl A., Scheib A., Schoeters I., Šefčík P., Sellersjö E., Slaninka I., Soriano-Disla J.M., Šorša A., Svrkota R., Stafilov T., Tarvainen T., Tendavilov V., Valera P., Verougstraete V., Vidojević D., Zissimos A., Zomeni Z., Sadeghi M. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 88, p. 302–318. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.021.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 3, p. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
- Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 2, p. 95–102. DOI: 10.1134/S1067413614020088.
- Watmough S.A., Eimers M.C., Dillon P.J. Manganese cycling in central Ontario forest: Response to soil acidification. *Applied Geochemistry*, 2007, vol. 22, no. 6, p. 1241–1247. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2007.03.039.
- Watmough S.A. Calcium, strontium and barium biogeochemistry in a forested catchment and insight into elemental discrimination. *Biogeochemistry*, 2014, vol. 118, p. 357–369. DOI: 10.1007/s10533-013-9938-x.

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 22.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

P.R. Enchilik¹, I.N. Semenov², E.N. Aseeva³,
O.A. Samonova⁴, A.D. Iovcheva⁵, E.V. Terskaya⁶

CATENARY BIOGEOCHEMICAL DIFFERENTIATION
IN THE SOUTHERN TAIGALANDSCAPES
(CENTRAL FOREST RESERVE, TVER OBLAST)

A landscape-geochemical catena with Albic Retisols (Loamic) under coniferous-deciduous forest on loess-like loams underlain by carbonate moraine deposits located in the southern part of the Central Forest Reserve on a gentle interfluvial slope was studied to evaluate the migration of trace elements in the soil–plant system. Biogeochemical differentiation of landscapes was analyzed basing on Mn, Fe, Zn, Sr, Cu, Ni, Cr and Pb concentrations in parent rocks, soils and plants. Soils of the catenas have near-Clarke content of Mn and Pb and lower content of Cu, Fe, Zn, Ni, Sr and Cr. In the upper part of the catena, A and O-horizons are enriched in Pb, Mn and Zn. E-horizon is depleted in Fe, Ni, Sr and Zn. B-horizon has a higher content of Cr, Ni and Cu and a lower content of Sr and Mn. Ash proportions in studied coniferous and broadleaved species of coniferous-deciduous forests are 1–4 and 1–8% respectively, while it is 3–12% for the above-ground parts of grasses. The studied plant species contain near-Clarke amounts of Cu, Zn and Ni. Branches and bark of woody plants are depleted in Fe and Cr, while sphagnum has lower content of Sr. Within the lower part of catena Fe content in plants decreases and this of Mn increases. Within the upper part of catena where plant leaves and needles accumulate Mn, Cu, Sr and Zn more actively than within its lower part, the element concentrations in plant organs differ slightly. Spatial differentiation of the total content decreases from Mn, Ni and Fe to Zn, Sr and Cu. Trees are the most active in the uptake and turnover of biophilic Mn and Zn while sphagnum and grasses mostly accumulate Fe, Cr and Pb. At the catena (toe)slope grass-shrub plants and tree leaves accumulate Cu. In the landscapes of the upper part of catena metals show more even distribution compared to the lower part where photosynthetic organs of plants accumulate Mn, Cu, Sr and Zn. Concentrations of Mn, Ni and Fe show the highest differentiation along the catena, while Zn, Sr and Cu are evenly distributed. Needles of *Picea abies* most intensively accumulate Mn in all landscapes (especially in hydromorphic). The photosynthetic organs of *Picea abies*, *Tilia cordata*, *Salix caprea* and *Sphagnum* have the greatest biogeochemical activity with the main contribution of Mn, Cu, Sr, Zn and Ni. The lowest biogeochemical activity is characteristic of *Acer platanoides* and *Ulmus glabra*.

Key words: coniferous-deciduous forests, heavy metals, mobile fractions, biogeochemical specialization, biological absorption, Valdai Upland, potentially toxic elements

Acknowledgements. Field works were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project no. 04/2018/РГО-РФФИ). Synthesis of the results was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30004). The authors are grateful to Academician N.S. Kasimov for his assistance in data interpretation and discussion of the results, and to R.B. Sandlersky and Yu.G. Puzachenko from the Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, for their participation in field works.

REFERENCES

- Aleksandrova L.M., Lyuzhin M.F., Arshavskaya V.F. Gumusovye veshchestva pochvy (ih obrazovanie, sostav, svoystva i znachenie v pochvoobrazovanii i plodorodii) [Humic substances of the soil (their formation, composition, properties and significance for soil formation and fertility)], Zapiski Leningr. s-h. in-ta, 1970, vol. 142, 233 p. (In Russian)
- Avessalomova I.A. Biogeoхимija landshaftov [Biogeochemistry of landscapes], Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., 2007, 163 p. (In Russian)
- Avessalomova I.A. Biogeoхимическая специализация растений полесских ландшафтов Озерной Мещеры [Biogeochemical specialization of plants in Polesye landscapes of the Meschera Lakeland]. Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr., 2020, no. 5, p. 63–72.
- Bade C., Jacob M., Leuschner C., Hauck M. Chemical properties of decaying wood in an old-growth spruce forest and effects on soil chemistry, *Biogeochemistry*, 2015, vol. 122, p. 1–13. DOI: 10.1007/s10533-014-0015-x.
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Bioticheskiy krugovorot na pjati kontinentah: azot i zol'nye elementy v prirodnyh nazemnyh ekosistemah [Biotic cycle on five continents: nitrogen and ash elements in natural terrestrial ecosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 2007, 381 p. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, PhD student; e-mail: polimail@inbox.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: aseyeva@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: oasamonova@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Technician, graduate student; e-mail: y_nasta@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher; e-mail: Elena_terskaya@mail.ru

- Gandois L., Probst A. Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles, *Chemosphere*, 2012, vol. 87, p. 204–210. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.12.020.
- Herndon E., Yarger B., Frederick H., Singer D. Iron and Manganese Biogeochemistry in Forested Coal Mine Spoil, *Soil systems*, 2019, vol. 3, no. 1, p. 13. DOI: 10.3390/soilsystems 3010013.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update, *Chemical Geology*, 2008, vol. 253, no. 3–4, p. 205–221. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2008.05.010.
- Huang J.-H., Ilgen G., Matzner E. Fluxes and budgets of Cd, Zn, Cu, Cr and Ni in a remote forested catchment in Germany, *Biogeochemistry*, 2011, vol. 103, no. 1–3, p. 59–70. DOI: 10.1007/s10533-010-9447-0.
- Isachenkova L.B., Tarzaeva M.V. [Comparative biogeochemical characteristics of forest ecosystems], *Ekosistemy shirokolistvenno-hvojnyh lesov juzhnogo Podmoskov'ja* [Ecosystems of broadleaved-coniferous forests in the southern part of the Moscow region]. Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., 2006, p. 84–97. (In Russian)
- Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, 2011, 548 p.
- Karavanova E.I., Belyanina L.A., Shapiro A.D., Stepanov A.A. Effect of litters on the mobility of zinc, copper, manganese, and iron in the upper horizons of podzolic soils. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, no. 1, p. 35–43. DOI: 10.1134/S1064229309070035.
- Karavanova E.I., Malinina M.S. Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve, *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 7, p. 725–737.
- Kasimov N.S., Lychagin M.Ju., Chalov S.R., Shinkareva G.L. Parageneticheskie assotsiatsii himicheskikh elementov v landshaftah [Paragenetic associations of chemical elements in landscapes]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 20–28. (In Russian)
- Lukina N.V., Orlova M.A., Bakhmet O.N., Tikhonova E.V., Tebenkova D.N., Kasakova A.I., Gornov A.V., Smirnov V.E., Knyazeva S.V., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Shashkov M.P., Ershov V.V. The Influence of Vegetation on the Forest Soil Properties in the Republic of Karelia, *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 7, p. 793–807. DOI: 10.1134/S1064229319050077.
- Makarova O.A. *Ekologicheskaja ocenka sodержaniya tzhzhelyh metallov v sisteme voda-pochva-rastenie v priruslovoy chasti pojmy reki Irtysh* [Environmental assessment of heavy metals content in the water-soil-plant system in the near-river part of the Irtysh River floodplain], PhD Thesis in Biology. Omsk, Om. gos. ped. un-t Publ., 2009, 113 p. (In Russian)
- Market B., Franzle S., Wunschmann S. *Chemical evolution and the biological system of the elements*. Heidelberg, Springer, 2015, 282 p.
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Bezel' V.S., Bel'skij E.A., Bespalova A.Yu., Golovchenko A.V., Gorbacheva T.T., Dobrovol'skaya T.G., Dobrovol'skij V.V., Zukert N.V., Isaeva L.G., Lapenis A.G., Maksimova I.A., Marfenina O.E., Panikova A.N., Pinskij D.L., Polyanskaya L.M., Stajnnes E., Utkin A.I., Frontas'eva M.V., Cibul'skij V.V., Chernov I.Yu., Yacenko-Hmelevskaya M.A. *Rassejannye elementy v boreal'nyh lesah* [Trace elements in boreal forests], Moscow, Nauka Publ., 2004, 616 p.
- Peng K.J., Luo C.L., You W.X. Manganese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator – *Phytolacca americana* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 154, no. 1–3, p. 674–681. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.080.
- Puzachenko Yu.G., Kozlov D.N. Geomorfologicheskoe razvitiye territorii Central'no-Lesnogo zapovednika [Geomorphological evolution of the Central Forest Nature Reserve territory], *Trudy Central'no-Lesnogo zapovednika*, 2007, vol. 4, p. 125–159. (In Russian)
- Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite, *Entropy*, 2013, vol. 15, no. 9, p. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970.
- Puzachenko Yu.G., Zheltukhin A.S., Kozlov D.N., Korablyov N.P., Fedyayeva M.V., Puzachenko M.Ju., Siunova E.V. *Central Forest State Biosphere Reserve*. Moscow, Delovoj mir Publ., 2007, 84 p.
- Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Demetriades A., Négrel P., Oorts K., Matschullat J., de Caritat P., Albanese S., Anderson M., Baritz R., Batista M.J., Bel-Ian A., Cicchella D., De Vivo B., De Vos W., Dinelli E., Đuriš M., Duszka-Dobek A., Eggen O.A., Eklund M., Ernsten V., Flight D.M.A., Forrester S., Fügedi U., Gilucis A., Gosar M., Gregorauskiene V., De Groot W., Gulan A., Halamić J., Haslinger E., Hayoz P., Hoogewerff J., Hrvatovic H., Husnjak S., Jähne-Klingberg F., Janik L., Jordan G., Kaminari M., Kirby J., Klos V., Kwecko P., Kuti L., Ladenberger A., Lima A., Locutura J., Lucivjansky P., Mann A., Mackovych D., McLaughlin M., Maljuk B.I., Maquil R., Meuli R.G., Mol G., O'Connor P., Ottesen R.T., Pasnieczna A., Petersell V., Pfliederer S., Poňavič M., Prazeres C., Radusinović S., Rauch U., Salpeteur I., Scanlon R., Schedl A., Scheib A., Schoeters I., Šefčík P., Sellersjö E., Slaninka I., Soriano-Disla J.M., Šorša A., Svrkoga R., Stafilov T., Tarvainen T., Tendavilov V., Valera P., Verougstraete V., Vidojević D., Zissimos A., Zomeni Z., Sadeghi M. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil, *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 88, p. 302–318. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.021.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust, *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 3, p. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
- Semenkov I.N., Terskaya E.V., Kasimov N.S. [Distribution of metal forms in zonal soil-geochemical catenas], *Geohimija landshaftov* [Landscape geochemistry]. K 100-letiju so dnja rozhdenija Aleksandra Il'icha Perel'mana. Moscow, APR Publ., 2016, p. 97–144. (In Russian)
- Semenkov I.N., Terskaya E.V., Kasimov N.S. Lateralnaya differentsiatsiya form soedinenij metallov v pochvennyh cuglunistyh katenah tsentra Zapadno-Sibirskoj ravniny [Lateral differentiation of metal fractions in loamy soil catenas of the central part of Western Siberia Plain]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no.3, p. 25–37.
- Smirnova O.V., Zaugolnova L.B., Evstigneev O.I., Korotkov V.N., Hanina L.G. *Sukcessionnyye processy v zapovednikah Rossii i problemy sohraneniya biologicheskogo raznoobrazija* [Succession processes in the reserves of Russia and the problems of conservation of biological diversity], St. Petersburg, Rossijskoe botanicheskoe obshhestvo Publ., 1999, 549 p. (In Russian)
- Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula, *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 2, p. 95–102. DOI: 10.1134/S1067413614020088.
- Terehina N.V. *Metodicheskie ukazaniya k provedeniju fitogeohimicheskikh issledovanij: uchebno-metodicheskoe posobie* [Methods for conducting phytogeochemical studies: manual], St. Petersburg, Akademia, 2010, 25 p. (In Russian)
- Watmough, S.A., Eimers, M.C., Dillon, P.J. Manganese cycling in central Ontario forest: Response to soil acidification, *Applied Geochemistry*, 2007, vol. 22, no. 6, p. 1241–1247. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2007.03.039.
- Watmough S.A. Calcium, strontium and barium biogeochemistry in a forested catchment and insight into elemental discrimination, *Biogeochemistry*, 2014, vol. 118, p. 357–369. DOI: 10.1007/s10533-013-9938-x.
- Zheleznova O.S., Chernyh N.A., Tobratov S.A. Cink i kadmij v fitomasse drevesnyh rastenij lesnyh ekosistem: zakonomernosti translokacii, akumuljacii i bar'ernyh mehanizmov [Zinc and cadmium in tree species of forest ecosystems: patterns of translocation, accumulation and barrier mechanisms], *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2017, vol. 25, no. 2, p. 253–270. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270. (In Russian)

Received 18.02.2020

Revised 22.05.2020

Accepted 06.08.2020