МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.424.4; 631.416.9

И.Н. Семенков¹, Н.С. Касимов², Е.В. Терская³

ЛАТЕРАЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ФОРМ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕННЫХ СУГЛИНИСТЫХ КАТЕНАХ ЦЕНТРА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

Для оценки латеральной дифференциации форм соединений Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr и Zn (извлеченных ацетатно-аммонийным буфером (AAB), AAB с 1% этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА) и 1н. HNO₃) в почвах суглинистых катен изучено три балочных водосбора в южной тайге, подтайге и лесостепи Западной Сибири. Общее содержание Mn (среднее и стандартное отклонение в гумусовом горизонте почв трех водосборов 2442 ± 3359 мг/кг), Sr (179 ± 71), Co (20 ± 10), Cu (42 ± 18), Ni (48 ± 35) и Pb (41 ± 51) соответствует фоновым уровням для почв Западной Сибири; Fe ($3,7\pm0,9\%$), Cr (170 ± 34 мг/кг) и Zn (154 ± 141 мг/кг) повышено из-за обогащенности ими почвообразующих пород. В гумусовых, срединных и нижних горизонтах от таежных дерново-подзолистых почв и глееземов к темно-серым почвам, черноземам и солодям подтайги и лесостепи увеличивается среднее содержание обменных соединений Fe, Cu, Pb, Co, Zn, Cr, Mn, Ni и Sr. Лишь в гумусовом горизонте этого ряда увеличивается содержание комплексных соединений Cu, Co, Ni, Pb и Fe за счет повышенного количества органического вещества и уменьшается – Mn, интенсивно накапливающегося древесной растительностью. Зональные особенности дифференциации сорбированных соединений Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Sr и Zn не обнаружены.

В таежных катенах от дерново-подзолистых почв к глееземам в подстилке в 2–3 раза уменьшается подвижность Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr и Zn пропорционально доле комплексных соединений. В подтаежных катенах с темно-серыми почвами она уменьшается с глубиной для Ni (от 40 до 15%), Pb (45→40), Cu (24→15), Co (15→11) и Fe (5→2); слабо варьирует для Mn и Zn (60–50 и 10–9% соответственно) и увеличивается для Sr (10→14) и Cr (5→7). В солодях эти тенденции сохраняются для Co, Cu, Fe и Ni. В лесостепных катенах с черноземами подвижность Co, Mn (95→56%), Ni и Pb (60→25%) уменьшается с глубиной, Sr (37→46%) – увеличивается, a Cu (40–50), Zn (10–13), Fe (7–8) и Cr (4) – варьирует слабо. В солодях аналогичным образом ведет себя подвижность Co, Mn, Ni, Pb и Cr. Суммарная частота встречаемости значений коэффициентов латеральной дифференциации, отражающих контрастное накопление и рассеяние элементов в подчиненных ландшафтах, уменьшается с 35±14% в таежной микроарене до 15±4% и 13±7% в подтаежной и лесостепной.

Ключевые слова: катена, подвижность, глеезем, дерново-подзолистая почва, солодь, темно-серая почва, чернозем, миграция тяжелых металлов, потенциально токсичные элементы

Введение. Для обоснованной оценки степени загрязнения экосистем необходимо знать фоновую радиальную и латеральную геохимическую структуру катен [Глазовская, Касимов, 1987], то есть различия содержаний веществ в автономных ландшафтах междуречий и сопряженных с ними склонов, днищ балок и поверхностей террас и пойм. На равнинах модельными системами для оценки латеральной дифференциации элементов, протекающей при нарастании гидроморфизма в катенах, являются балочные водосборы, или микроарены [Ландшафтно-геохимические основы ..., 1989].

В настоящее время все большее внимание уделяется не общему содержанию, а разнообразным формам соединений элементов в почвах, извлекаемым вытяжками нейтральных солей и кислот [Kabata-Pendias, 2011; Motuzova et al., 2014 и др.] и полнее отражающим подвижность и миграционную способность. Наиболее подвижные (водорастворимые, обменные и частично карбонатные) формы соединений металлов для краткости можно обозначить F1; комплексные соединения, включающие гуматы и фульваты, -F2; сорбированные гидроксидами Fe и Mn -F3, труднорастворимые -F4, общее содержание -F5. Такой F-анализ дает представление о полиструктурной геохимической организации ландшафтов, описываемой моделями радиального и латерального распределения форм нахождения (фракций) металлов [Самсонова, 2008; Семенков с соавт., 2016]. Полученные для некоторых районов

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: semenkov@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, академик, зав. кафедрой, докт. геогр. н.; *e-mail*: secretary@geogr.msu.ru

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

Восточно-Европейской равнины результаты изучения форм нахождения металлов [например, Shcheglov et al., 2013; Samonova et al., 2018] пока еще не дают целостного представления о зонально-провинциальных закономерностях катенарного фракционирования элементов.

Цель работы – анализ латеральной почвенногеохимической структуры балочных катен в фоновых ландшафтах тайги, подтайги и лесостепи центра Западной Сибири.

Материал и методы исследований. В трех балочных водосборах (36 разрезов и 5 точек поверхностного опробования) исследованы поперечные катены от правого и левого бортов и продольные вдоль днищ (рис. 1). Таежные катены на озерноаллювиальных суглинках изучены на водосборе площадью 3,7 га в западной части Тобольского материка, в 100 км к северу от г. Тобольска и 4 км от поселка Туртас, где междуречье и склоны с крутизной бортов 4° заняты елово-пихтовым с рябиной разнотравно-хвощово-осоковым лесом на дерново-подзолистых почвах со вторым гумусовым горизонтом (рис. 2). В воронке сбора талых вод и днище балки под низкобонитетным елово-пихтово-зеленомошным лесом находятся перегнойно-глеевые почвы (глееземы). Подтаежные катены на лёссовидных суглинках исследованы в северной части Ишимской равнины на водосборе площадью 76 га, в 150 км к югу от Тюмени и 8 км к северо-востоку от железнодорожной станции Омутинская. На междуречье под березняком разнотравно-злаковым и распаханных склонах крутизной 7–10° развиты темно-серые почвы; под осиновым колком и на распаханном днише балки – солоди. Лесостепные катены на лёссовидных суглинках с агроландшафтами на месте разнотравно-ковыльной степи изучены в западной части Ишимской равнины на водосборе площадью 48 га, в 2 км к югу от г. Шадринска, где междуречье занято выщелоченными черноземами, склоны крутизной 7–10° – оподзоленными черноземами, днище балки – солодями.

В Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ в 271 пробе определены содержание гумуса по И.В. Тюрину титриметрически с фенилантраниловой кислотой и величина рН в водной суспензии в динамических условиях (соотношение почва: раствор 1:2,5) на приборе «Эксперт-рН» (Россия), гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии в образцах, обработанных 4% $Na_4P_2O_7$, на приборе «Analizeter 22» фирмы «Fritsch» (Германия); элементный состав – рентгенфлуоресцентным методом на приборе «PANalytical» (Нидерланды), содержание металлов в вытяжках атомно-абсорбционным (на приборах «novAA 400» фирмы «Analytik-Jena AG», Германия (атомизация в пламени ацетилен - воздух), и «GTA 120 AA 240Z» фирмы «Varian» (США) с электротермической атомизацией азотнокислой матрицы в среде аргона) и масс-спектрометрическим (на приборе «Elan-6100» фирмы «Perkin-Elmer» (США) в азотнокислой матрице) методами. Непрочно связанные соединения Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Zn, Cu, Cr и Sr экстрагировали в течение 18 ч тремя параллельными вытяжками: ацетатно-аммонийным буфером (ААБ) с pH 4,8 (соотношение почва:раствор 1:5), ААБ с 1% этилендиаминтетрауксусной (ЭДТА) кислотой (1:5) и 1н HNO₂ (1:10). Комплексные соединения F2 рассчитаны по разнице концентрации элементов в вытяжке ААБ с 1% ЭДТА и ААБ; F3 – по разнице содержания в азотнокислой и ацетатно-аммонийной вытяжках, трудно растворимые F4 – по разнице между F5 и непрочно связанными соединениями *F1+F2+F3*.

Региональная геохимическая специализация почв (рис. 3) оценена путем сравнения общего содержания металлов с кларками вехней части континентальной коры (подстрочные индексы – клар-



Рис. 1. Схема отбора проб в катенах микроарен: А – таежная, Б – подтаежная, В – лесостепная. 1–18 – разрезы (далее в рисунках порядок катен сохраняется). Элементарные ландшафты: І – автономный выровненной поверхности междуречья, ІІ – трансэлювиальный склонов, ІІІ – трансэлювиально-аккумулятивный днищ балок

Fig. 1. Scheme of sampling in the catenas of gully catchments: A – taiga, B – subboreal forest, B – forest-steppe (the order of catenas is the same for all figures). 1–18 – soil profiles. Landscapes: I – autonomous of the interfluve surface, II – trans-eluvial of slopes, III – trans-eluvial-accumulative of gully catchments bottoms



Рис. 2. Продольные (спева) и поперечные (справа) катены балочных микроарен. **А – таежная, Б – подтаежная, В** – лесостепная. Автономные ландшафты междуречья: A1 – пихтарник хвощово-осоковый на дерново-подзолистых глееватых почвах, A2 – еловопихтовый хвощово-осоковый лес на дерново-подзолистых глееватых почвах, А3 – елово-пихтовый хвощово-осоково-зеленомошный лес на дерново-подзолистых глееватых почвах, A4 – березовый злаковый колок на темно-серой почве, A5 – агроценоз на пахотных темно-серых почвах и черноземах. AC – автономный супераквальный ландшафт с осиновым мертвопокровным колком на солоди. Трансэлювиальные ландшафты склонов: ТЭ1 – елово-пихтовый хвощово-осоковый лес на дерново-подзолистых глееватых почвах, ТЭ2 – березово-елово-пихтовый хвощово-осоковый лес на дерново-подзолистых почвах, ТЭ3 – агроценоз на пахотных темно-серых почвах и черноземах. Трансэлювиально-аккумулятивные ландшафты днищ балок: ТЭА1 – таволжатник на глееземе, ТЭА2 – елово-пихтовый хвощово-осоково-зеленомошный лес на глееземах, ТЭА3 – агроценоз на солоди пахотной

Fig. 2. Longitudinal (left) and transverse (right) transects in catenas of gully catchments. A – taiga, E – subboreal forest, B – forest-steppe. Autonomous landscapes of the interfluves: A1 – fir (*Abies sibirica*)-horsetail-sedge forest on Retisols Gleyic, A2 – fir-spruce (*Abies sibirica, Picea sp*)-horsetail-sedge forest on Retisols Gleyic, A3 – fir-spruce (*Abies sibirica, Picea sp*)-horsetail-sedge-moss forest on Retisols Gleyic, A4 – birch-grass forest on Phaeozems, A5 – agrocenosis on Phaeozems and Chernozems. AC – autonomous superaqual landscape with aspen forest on Planosols. Transeluvial landscapes of the slopes: T91 – fir-spruce (*Abies sibirica, Picea sp*)-horsetail-sedge forest on Retisols Gleyic; T92 – birch-fir-spruce (*Abies sibirica, Picea sp*)-horsetail-sedge forest on Retisols Gleyic; T93 – agrocenosis on Phaeozems and Chernozems; Transeluvial-accumulative landscapes of gully catchments bottoms: T9A1 – meadowsweet on Gleysols, T9A2 – fir-spruce (*Abies sibirica, Picea sp*)-horsetail-sedge-moss forest on Gleysols, T9A3-agrocenosis on Planosols



Рис. 3. Геохимические спектры гумусовых горизонтов (1) и почвообразующих пород (2) катен: А – таежная (16/12), Б – подтаежная (31/13) и В – лесостепная (25/11). В скобках слева от черты – число проб в гумусовом горизонте, справа – в почвообразующих породах

Fig. 3. Geochemical spectra of A-horizons (1) and soil-forming rocks (2) in catenas: A – taiga (n=16 in A horizon/n=12 in soil-forming rocks), B – subboreal forest (31/13) and B – forest-steppe (25/11)

ки, мг/кг): Fe₄₁₀₀ Mn₇₇₀ Sr₂₇₀ Cr₉₂ Zn₇₅ Ni₅₀ Pb₁₇ [Григорьев, 2009] и Cu₂₇ Co₁₅ [Hu, Gao, 2008]. Кларк концентрации (КК) – отношение содержания металла в почве к его кларку, кларк рассеяния (КР) – отношение кларка к содержанию в почве. Контрастность распределения металлов в гумусовых горизонтах оценивали коэффициентом латеральной дифференuuauuu(L) – отношением содержания в почвах подчиненных ландшафтов к содержанию в почвах автономных позиций. Накопление или рассеяние металлов в горизонтах почв относительно пород выявляли с помощью коэффициента радиальной дифференциации (R) – отношения содержания в горизонте к содержанию в почвообразующей породе или переходном к ней горизонте. Подвижность (Р) рассчитывали как отношение содержания непрочно связанных соединений к F5, умноженному на 100%. Связи между показателями считали значимыми по коэффициентам линейной корреляции r с уровнем значимости менее 0,05, так же как и различия между средними (по результатам *t*-теста различий среднего).

Результаты исследований и их обсуждение. Для почв балочных водосборов, удаленных от источников загрязнения, характерны фоновые уровни большинства металлов за исключением Cr, содержание которого в 2 раза больше кларка (табл. 1, рис. 3), что типично для Западной Сибири из-за возможного влияния рудных районов Урала и Центрального Казахстана с повышенным фоновым уровнем металла. Содержание Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Sr и Zn в дерново-подзолистых, темно-серых почвах, черноземах, глееземах и солодях соответствует фоновым значениям в почвах Западной Сибири [Структура ..., 1974; Ильин, Сысо, 2001; Сысо, 2007; Нечаева с соавт., 2010; Московченко, 2013 и др.]. Изученные почвы Тобольского материка относительно дерновоподзолистых почв Германии и Польши [Reimann et al., 2018] содержат близкие уровни Со, Сг, Си, Fe, Ni, Mn, Pb, Sr и Zn.

В таежных катенах Тобольского материка в средне-, легкосуглинистых крупнопылеватых дерново-подзолистых почвах и глееземах содержится 78±7% (n=85) физического песка. Из-за оподзоливания доля илистой и пылеватых фракций в элювиальном и переходном к текстурному горизонтах уменьшается, а песчаных – возрастает (рис. 4, А). Значения pH уменьшаются по профилю почв с 6,0– 6,5 в органогенных горизонтах до 4,7–5,0 в гумусовом, монотонно увеличиваясь с глубиной до 6,0 в глеевом. Латеральное распределение гранулометрических фракций, гумуса и величины pH в катенах значимо не отличается (табл. 1, рис. 4, А).

В озерно-аллювиальных суглинках западной части Тобольского материка понижено содержание подвижного Mn, соединения которого мигрируют в кислой глеевой обстановке [Московченко, 2016]. Изученные почвы обеднены Cu по сравнению с почвообразующими породами ($R=0,1\div0,8$) и обогащены Mn, что связано с его избирательным накоплением и поглощением древесной растительностью [Нечаева с соавт., 2010]. В дерново-подзолистых почвах междеречья и склонов Ni имеет регрессивное распределение ($R=0,1\div0,7$), накапливаясь в глееземах днища

Varauu		Гранул	ометрич	еские фр	акции			Cont	Со						
Катсны		<i>G1</i>	G2	G3	<i>G4</i>	G5	<i>G6</i>	C opi	F1*	F2	F3	F4	F5		
	п,5	<0,1	40	42	6,3	9,5	2,9	1,7	2,8	1,2	7	6,8	15		
Таежные	ц,4	<0,1	17	55	11	13	3,2	2,1	1,9	1,3	4,8	-	12		
	л,4	16	40	29	6,2	7,8	1,9	3,6	2,8	0,9	13,9	8,5	22		
	л,1	<0,1	2,5	38	16	35	9,1	8,4	0,1	1,7	0,7	13	15		
Подтаежные	ц,3	<0,1	2,6	51	11	26	6,1	8,4	0,2	1,8	0,6	16	18		
	п,2	<0,1	4,4	43	15	30	7,5	6,5	0,2	1,5	1,3	15	18		
Подтаежные Лесостепные Катены	л,2	0	3,2	43	17	30	6,8	4,4	0,1	5,9	7,8	4,4	18		
	ц,2	0,1	13	37	17	27	6,4	4,3	0,3	6	7,9	3,8	18		
	п,2	15	6,2	39	8,2	26	6,1	4,5	0,2	5,5	7,6	0,5	14		
Катенц				Mn					Pb						
Катены		Fl	F2	F3	F4	F5	F1*	F2	F3	F4	F5	Fl	F2		
	п,5	0,4	279	966	111	1356	2,4	2,2	4,6	18	25	2,9	0,6		
Таежные	ц,4	0,2	124	323	118	1054	2,9	2,6	5,1	14	21	4,1	1,6		
	л,4	2,3	742	2668	704	6524	9,0	1,9	11	5,6	42	7,2	0,5		
	л,1	44,4	322	269	395	1030	0,3	6,1	11	30	47	0,4	0,9		
Подтаежные	ц,3	78	352	323	433	1216	0,8	8,6	12	20	41	0,3	0,8		
	п,2	60	402	303	277	1041	0,6	13	10	22	45	0,3	0,4		
	л,2	48	321	381	25	776	0,8	8,9	15	21	46	0,15	3,8		
Лесостепные	ц,2	55	310	349	15	722	0,9	9,3	14	14	40	0,23	3,8		
	п,2	70	285	344	40	739	0,6	11	15	14	40	0,19	4,6		

Содержание гранулометрических фракций, углерода органических веществ (Сорг, %)

П р и м е ч а н и е. Катены: л – левая, п – правая, ц – продольная и число проб. Формы металлов: *F1* – обменная, *F2* – содержание ниже предела обнаружения. Гранулометрические фракции: *G1* – крупно- и среднепесчаная, *G2* – мелкопесчаная, ющиеся более чем в 1,5 раза от среднего содержания в микроарене.

* Обменные соединения Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr и Zn в мкг/кг в таежных катенах.

** Обменные соединения Со, Сг, Си, Ni, Pb, Sr и Zn в %.

балки (1,5÷3,5). Из-за глеевой обстановки, благоприятной для выноса подвижных форм, в этих почвах содержится в 10–30 раз меньше обменных соединений Со, Сu, Ni, Pb, Zn (5–9 мкг/кг) и Mn (0,72 мг/кг), чем в зональных почвах тайги Восточно-Европейской равнины [Семенков с соавт., 2016]. В почвах западной части Тобольского материка из-за повышенного гидроморфизма и перехода Fe как типоморфного элемента в подвижную форму по сравнению с подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами лесных ландшафтов Европы в 2–5 раз больше комплексных соединений Cr (0,82±0,40 мг/кг), сорбированных – Ni (13,7±7,4 мг/кг) и Zn (20±18 мг/кг) [Содержание ..., 1979; Самонова с соавт., 1998; Saby et al., 2009; Sipos, 2009].

В дерново-подзолистых почвах катены левого борта микроарены повышено содержание крупнопесчаной фракции, а также обменного Mn, комплексных соединений Mn, Ni, Zn, сорбированных Mn, Co и Zn, труднорастворимых Mn и Pb и общего – Mn, Pb и Zn, с которыми выявлена положительная корреляция большинства металлов, за исключением комплексных соединений Ni. Повышенное общее содержание Co, Cr, Fe, Mn и Ni обнаружено также в крупнопесчаной фракции дерново-подзолистых почв Сатинского полигона, к которой приурочена основная часть Fe-Mn конкреций [Samonova et al., 2018]. Изученные почвы содержат меньше обменных соединений Cu, Zn и Sr (по 2 мкг/кг), сорбированной и труднорастворимой Cu (3,7 и 9,3 мг/кг соответственно).

В глееземах подчиненных позиций относительно автономных почв катены правого борта микроарены повышенное содержание преобладающих в гранулометрическом составе пылеватых фракций привело к более контрастному распределению Ni, Pb (L=1,4), Fe (1,8), Co, Zn (2,2–2,3) и Mn (2,7). В катене правого борта за счет более интенсивного накопления гумуса и повышенного содержания средней пыли в глееземах днища балки относительно автономных почв повышена частота встречаемости коэффициентов L>1,3: 60% по сравнению с 32% в левой и 40% – в продольной катенами. Повышенные и пониженные содержания отдельных форм металлов в автономных ландшафтах продольной катены, связаны, вероятно, с другими неучтенными факторами: оглеением или фракционно-групповым составом гумуса.

Общее содержание Cr, Co, Cu, Fe и Sr в почвах микроарены варьирует слабо (рис. 5). Из подчиненных ландшафтов Мп выносится в речную сеть как наиболее подвижный элемент, а Ni – накапливается. На склонах увеличивается содержание Zn и уменьшается – Рb. Обменные соединения Fe и Ni аккумулируются на биогеохимическом барьере в подчиненных ландшафтах; в дерново-подзолистых почвах склонов – Си (от 6,5 до 8,7 мкг/кг), днище балки – Zn (от 4,5 до 9,7 мкг/кг) и рассеиваются на склонах Mn и Co: L=0,2÷0,8. Комплексные соединения Fe, Ni, Sr и Pb накапливаются, а Cu и Co pacceиваются в почвах подчиненных ландшафтов. В почвах склонов понижено содержание Mn и Zn, накапливающихся в глееземах днища балки до 461 и 9,0 мг/кг соответственно. Содержание сорбированных Cr и Ni больше в почвах подчиненных ландшафтов, а Со и Pb – меньше на склонах.

Таблица 1

		Cr					Cu					Fe		
F1*	F2	F3	F4	F5	F1*	F2	F3	F4	F5	<i>F1</i>	F2	F3**	F4	F5
0,8	0,8	3,4	141	137	10	2,5	9,5	52	27	1,6	3	0,7	2,7	2,8
1,3	1	3,3	166	147	12	3,1	11,1	31	36	1,2	1,5	0,2	2,6	2,7
0,4	0,3	2,2	117	131	2	0,1	3,7	9,3	25	1,8	4	0,4	2,2	2,7
0,3	0,1	11	207	218	0	5,2	2,8	39	47	5,4	0,04	0,2	3,8	4
1,5	-	6,1	147	155	0,3	10,7	3,4	36	52	58,4	0,13	0,2	3,2	3,5
0,3	0,2	9	178	188	0,4	10	5,8	30	47	<3,7	0,03	0,2	3,7	3,9
0,2	0,2	6,5	151	158	0,07	4,8	7	18	30	7	0,03	0,23	3,4	3,7
0,6	-	4,6	131	137	0,08	5,3	7,4	13	26	2	0,03	0,19	3,3	3,5
0,4	0,1	5	153	159	0,07	6,2	8,4	16	31	5	0,04	0,21	3,1	3,3
					Sr			Zn						
F3	F4	F5	<i>F1</i>	F2	F3*	F4	F5	<i>F1</i>		F2	F3	F_{-}	4*	F5**
8,2	5,1	28	6,2	8,4	8,4	144	161	2,7		2,3	8,7	5	0	63
7,7	7,7	17	8,6	10	9,6	141	144	3,5		3	7,9	4	2	58
12	16	80	23,2	27	35	117	210	22,0)	12	29	2	4	170
14	8,7	24	13	-	-	134	152	0,3		1,5	10	9	1	103
14	5,2	20	9,2	-	-	136	143	0,6		1,4	7,2	10	02	111
5,2	19	25	23	-	-	147	169	0,3		2	16,5	10	03	122
5,8	14	24	28	2,3	24	94	148	0,2		1,5	10	9	6	108
6,4	6,7	17	27	4,5	26	84	141	0,2		2,5	9,6	1	12	125
6,6	9,6	21	33	2,5	25	88	148	0,4		2,2	9,9	10	06	119

и металлов (мг/кг) в гумусовых горизонтах почв автономных ландшафтов микроарен

комплексная, F3 – сорбированная гидроксидами Fe и Mn, F4 – труднорастворимая и F5 – общее содержание. Прочерк– G3 – крупнопылеватая, G4 – среднепылеватая, G5 – мелкопылеватая, G6 – илистая. Полужирным выделены значения, отличаю-



Рис. 4. Радиальное распределение pH (серая линия), содержания гумуса (черная линия) и гранулометрических фракций (G1–G6, см. табл. 1) в почвах катен. Таежная катена (А): дерново-подзолистые глееватые почвы (разрезы 12 и 11, рис. 1), перегнойноокисленно-глеевая (6). Подтаежная катена (Б): темно-серая целинная (16) и пахотная (11), пахотная солодь (13). Лесостепная катена (В): пахотный выщелоченный чернозем (1), пахотный оподзоленный чернозем (2), пахотная солодь (3)

Fig. 4. Vertical distribution of pH (gray line), humus content (black line) and grain-size fractions (G1–G6, see Table 1) in soil catenas. Taiga catena: Retisols Gleyic (sections 11 and 12, Fig. 1), Gleysols (6). Subboreal forest catena: Phaeozems (11 and 16), Planosols (13). Forest-steppe catena: arable Chernozems (1 and 2), Planosols (3)

В дерново-подзолистых почвах подвижность металлов резко уменьшается от подстилки к гумусовому горизонту АУ, срединному ВТ и глеевому G за счет обилия в органогенной толще легко переходящих в раствор соединений (подстрочный индекс – диапазон изменений значений средней Р, %, от гумусового горизонта к глеевому): (Рb,Cu)_{100→40}, $(Co,Mn,Ni,Sr,Zn)_{100\to 20}, Fe_{51\to 8}, Cr_{20\to 2}$ (табл. 2). В горизонте G глееземов за счет сорбированных соединений больше подвижность Fe, Cu₁₂₋₃₀ и Рb_{20→60}. У остальных металлов из-за латерального поступления вещества из почв междуречья и склонов *Р* варьирует слабее: Ni₄₀₋₅₀, Mn₃₀₋₆₀, Co₃₀₋₄₀, Zn₂₀₋₃₀, Cr₄. Только подвижность Sr, чье поведение не зависит от окислительно-восстановительных условий, уменьшается с 50 до 20% от органогенных горизонтов к минеральным (как и в почвах междуречья и склонов).

В подстилке от дерново-подзолистых почв к глееземам за счет комплексных соединений в 2– 3 раза уменьшается подвижность Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr и Zn, что отражает их накопление на латеральном геохимическом барьере, диагностированном ранее в песчаных и суглинистых таежных катенах центра [Авессаломова, 2012] и северо-востока [Семенков с соавт., 2016] Восточно-Европейской равнины. Вниз по катене подвижность Mn, Co, Cu и Рь уменьшается в 1,3-1,6 раз в гумусовом горизонте, у остальных металлов (Fe, Cr, Ni и Zn) меняясь несущественно, что объясняется нахождением соединений Mn в растворе, когда в этих же условиях Fe осаждается [Kabata-Pendias, 2011]. В глеевом горизонте Р большинства металлов увеличивается пропорционально доле сорбированных соединений, что связано с формированием более устойчивой восстановительной обстановки и возможным частичным растворением Fe-Mn-конкреций, сорбирующих элементы с переменной валентностью. Подвижность Си уменьшатся в глеевых условиях (табл. 2), что является типичным поведением элемента в такой обстановке [Борисенко, 1980].

В почвах микроарены значения L обменных соединений составляют 0,3÷7,5, комплексных – 0,05÷4, сорбированных – 0,4÷4,8, трудно сорбированных –

Катены	Горизонты	0	Co	C	r	C	u	F	e	M	ĺn	N	li	Р	b	S	sr	Z	n
		Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ	Пд	Γ
	Подстилка (10/5)	<u>100</u> 21	<u>28</u> 28	<u>20</u> 150	<u>4</u> 55	<u>100</u> 26	<u>16</u> 22	<u>51</u> 59	<u>12</u> 51	<u>100</u> 14	<u>33</u> 47	<u>100</u> 19	<u>44</u> 84	<u>100</u> 24	<u>17</u> 26	<u>100</u> 16	$\frac{47}{30}$	<u>100</u> 16	<u>33</u> 16
Таежные	AY (20/9)	<u>50</u> 59	<u>38</u> 88	$\frac{3}{30}$	<u>4</u> 30	<u>34</u> 56	<u>21</u> 45	<u>18</u> 26	<u>18</u> 68	<u>83</u> 37	<u>61</u> 52	<u>58</u> 45	<u>50</u> 45	<u>50</u> 52	<u>31</u> 60	<u>26</u> 81	<u>24</u> 44	<u>29</u> 109	<u>34</u> 32
	G (20/23)	<u>22</u> 85	<u>39</u> 63	2 23	<u>4</u> 31	<u>39</u> 39	<u>31</u> 38	<u>8</u> 50	<u>28</u> 36	<u>18</u> 57	<u>49</u> 51	<u>22</u> 16	<u>52</u> 33	<u>35</u> 37	<u>56</u> 42	<u>19</u> 23	<u>17</u> 42	$\frac{20}{20}$	<u>23</u> 38
		СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд	СЛ	Сд
	Подстилка*	<u>22</u>	<u>68</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>25</u>	<u>16</u>	<u>17</u>	<u>16</u>	<u>30</u>	<u>26</u>	<u>71</u>	<u>38</u>	<u>82</u>	<u>53</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>54</u>	<u>51</u>
Подтаежные	AU (24/10)	<u>14</u> 34	<u>15</u> 18	<u>5</u> 14	<u>5</u> 9	<u>24</u> 31	<u>28</u> 21	<u>5</u> 41	<u>7</u> 27	<u>62</u> 15	<u>63</u> 8	<u>39</u> 23	<u>46</u> 32	<u>46</u> 39	<u>47</u> 27	$\frac{10}{26}$	$\frac{10}{13}$	$\frac{10}{31}$	<u>16</u> 30
	BI (21/8)	<u>11</u> 38	<u>6</u> 65	<u>6</u> 12	<u>6</u> 7	<u>15</u> 44	<u>13</u> 99	$\frac{2}{20}$	<u>3</u> 140	<u>47</u> 24	<u>31</u> 49	<u>16</u> 30	$\frac{7}{30}$	<u>41</u> 45	<u>43</u> 30	<u>9</u> 20	<u>10</u> 24	<u>9</u> 53	<u>7</u> 75
		Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд	Ч	Сд
Лесостепные	AU (13/12)	<u>90</u> 13	<u>100</u> 11	$\frac{4}{9}$	<u>4</u> 7	<u>45</u> 12	<u>48</u> 14	<u>7</u> 6	<u>10</u> 39	<u>96</u> 7	<u>100</u> 4	<u>61</u> 9	<u>84</u> 12	<u>57</u> 22	<u>68</u> 10	<u>37</u> 14	<u>44</u> 7	<u>11</u> 18	<u>17</u> 44
	AUBI/BI (5/4)	<u>59</u> 30	<u>26</u> 28	$\frac{4}{10}$	$\frac{4}{8}$	<u>49</u> 14	<u>32</u> 45	<u>8</u> 10	<u>6</u> 3	<u>74</u> 14	<u>20</u> 32	<u>38</u> 11	<u>8</u> 11	<u>36</u> 14	<u>26</u> 13	<u>35</u> 22	<u>19</u> 7	<u>10</u> 19	<u>10</u> 58

Подвижность металлов в горизонтах почв катен, %

Таблица 2

Примечание. В скобках слева от наклонной черты – число проб в горизонтах почв междуречных и склоновых ландшафтов, справа – в горизонтах почв подчиненных ландшафтов днищ балок (Г – глееземы, Сд – солоди). Почвы: Пд – дерново-подзолистые глееватые, СЛ – темно-серые, Ч – выщелоченные и оподзоленные черноземы. Над чертой – медиана, под чертой – коэффициент вариации, %. Выделены значения максимальной подвижности металлов в горизонтах сопряженных почв.

* Единичное измерение.

 $0,0n \div 10,2$ и общего содержания – $0,2 \div 4,8$. От междуречных дерново-подзолистых почв к подчиненным глееземам таежных катен уменьшение *P* металлов с накоплением их подвижных форм, по-видимому, является особенностью этих ландшафтно-геохимических систем. Аналогичная почвенно-геохимическая структура выявлена в катенах восточно-европейской тайги за счет аккумуляции органического вещества в гидроморфных позициях на латеральном геохимическом барьере [Авессаломова, 2012; Семенков с соавт., 2016].

В подтаежных катенах севера Ишимской равнины в тяжелосуглинисто-глинистых крупнопылеватых темно-серых почвах и солодях (физической глины $51\pm7\%$) радиальная и латеральная дифференциация большинства гранулометрических фракций неконтрастна за исключением крупного и среднего песка, имеющих элювиально-иллювиальное распределение (рис. 4, Б, 5). От темногумусового горизонта AU (6,7±0,3) к карбонатному BCA рН увеличивается до 8,0. В профиле подчиненных солодей рН на 0,5 единиц меньше из-за дополнительного поступления влаги из междуречья и склонов и более интенсивного выщелачивания почв подчиненных ландшафтов, что определяет возможность формирования кислого барьера для

элементов, мигрирующих в составе анионов. При распашке гумусированность горизонта AU (среднее $5,0\pm1,9\%$) из-за эрозии уменьшается до 2% на бровках выпуклых склонов. В солодях днища балки в 1,5 раза больше гумуса по сравнению с темно-серыми почвами, что определяет возможность формирования латерального биогеохимического барьера в нижней части подтаежных катен.

В темно-серых почвах Ишимской равнины содержание изученных металлов сопоставимо с данными по аналогичным объектам Европы [Geochemical atlas, 2005; Reimann et al., 2018]. B почвах подчиненных ландшафтов подтаежной микроарены аккумулируется обменный Sr и рассеивается Cu (L=0,1÷0,2) и Ni (0,5÷0,7). В солодях на биогеохимическом барьере накапливаются Мп и Со (1,3÷1,4), для которых выявлена положительная связь с содержанием гумуса (г=0,7-0,8). В темно-серых почвах склонов рассеивается Рb. Соединения Fe и Zn выносятся из темно-серых почв склонов (0,6÷0,7), накапливаясь в солодях днища балки (2÷5), по-видимому, на кислом барьере, что подтверждает корреляция с pH (r=0,2-0,4, n=82). Комплексные соединения Fe и Zn аккумулируются на биогеохимическом барьере в солодях днища балки (с содержанием гумуса r=0,4-0,8), Cr – только в темно-серых почвах склонов, а Си выносится из почв склонов. Сорбированные соединения Zn накапливаются на латеральном биогеохимическом барьере в солодях с 8,8 до 12–19 мг/кг (рис. 5).

В темно-серых почвах подвижность элементов уменьшается от горизонта AU к BT и BCA для металлов, интенсивно накапливаемых растительностью и в большом количестве поступающих в опад и подстилку (табл. 2): Ni_{40→15}, Pb_{45→40}, Cu_{24→15}, Co_{15→11}, Fe_{5→2} (подстрочный индекс – значения *P* в %). Подвижность Mn₅₀₋₆₀ и Zn₉₋₁₀ варьирует слабо, увеличиваясь в горизонте BCA, при накоплении на радиальном щелочном геохимическом барьере и переходе водорастворимых соединений в карбонатные (Sr) и специфически сорбированные (Cr). В солодях эти же процессы свойственны Co, Cu, Fe и Ni. В слабокислых условиях горизонта BT за счет выноса специфически сорбированных соединений подвижность Mn_{63→31} и Zn_{16→7} уменьшается от горизонта AU к BT, слабо варьируя для Pb, Sr и Cr.

В гумусовом горизонте почв вдоль катены подвижность практически не меняется, лишь для Zn и в меньшей мере Ni увеличиваясь за счет сорбированной формы. В горизонте BT этих почв меньше подвижность Mn, Co и Ni пропорционально доле комплексных соединений, которые в темно-серых почвах проникают на существенно большую глубину в составе глинисто-гумусовых кутан по граням структурных отдельностей.

В подтаежных катенах значения *L* обменных и сорбированных соединений не превышают 3,0, комплексных – 4,2, трудносорбированных и общего содержания – варьируют в пределах 0,3÷2,0 и 0,7÷1,4. В подтаежных катенах на лёссовидных суглинках с темно-серыми осолоделыми почвами и солодями при однородном гранулометрическом составе латеральная дифференциация металлов определяется пониженными значениями рН и повышенным содержанием гумуса в солодях днища балки.

В лесостепных катенах запада Ишимской равнины в сопряженных тяжелосуглинисто-глинистых крупнопылеватых черноземах и солодях содержится $50\pm11\%$ (*n*=51) физической глины. В черноземах радиальное распределение большинства гранулометрических фракций слабоконтрастно. Лишь содержание илистой фракции увеличивается с глубиной. В солодях четко выражена текстурная дифференциация в распределении гранулометрических фракций (рис. 4, В). В черноземах рН увеличивается от 6,4– 6,8 в гумусовом горизонте до 8,3–8,5 в карбонатном. В верхней метровой толще солодей рН варьирует в диапазоне 6,3–6,5, что меньше (*p*=0,001), чем в черноземах. Верхние горизонты черноземов и солодей содержат 8,5±1,5% гумуса при отсутствии значимых отличий в ряду элементарных ландшафтов.

Черноземы Ишимской равнины по содержанию изученных металлов сопоставимы с черноземами Венгрии, Украины и Молдавии [Reimann et al., 2018]. В лесостепных катенах с черноземами и солодями в большинстве случаев (73%) повышенные значения коэффициента L связаны с аккумуляцией обменных Fe, Mn и Zn и комплексных Cr (2÷6), а также Fe, Mn, Sr, Ni, Cu, Zn (1,3÷2,1) и сорбированных Mn, Ni, Cu, Zn (1,3÷1,4) на латеральном биогеохимическом барьере в гумусовом горизонте балочных солодей. Наличие такого барьера характерно для катен с черноземами и лугово-черноземными почвами восточно-европейской лесостепи [Shcheglov et al., 2013; Dubovik, Dubovik, 2016; Семенков с соавт., 2016].

В гумусовом горизонте выщелоченных и оподзоленных черноземов из-за аккумуляции степными злаками [Айвазян, 1974] и последующего поступления в почвы в виде органо-минеральных соединений повышена подвижность (подстрочным знаком, в %) Co,Mn₉₅₋₅₆, Ni,Pb₆₀₋₂₅, а в горизонте BCA за счет наличия карбонатных соединений – Sr₃₇₋₄₆ при слабой дифференциации почв по показателю P для Cu₄₀₋₅₀, Zn₁₀₋₁₃, Fe₇₋₈, Cr₄. В латеральном ряду сопряженных почв лесостепных катен в гумусовом горизонте солодей интенсивнее накапливаются комплексные соединения Fe, Mn, Ni, Zn и сорбированные – Cu, Mn, Zn за счет аккумуляции на биогеохимическом барьере, а в минеральных горизонтах уменьшается

Микроарена, число проб	F1 – обменные												
	Fe	Mn	Pb	Со	Ni	Sr	Cu	Zn	Cr				
Гумусовые горизонты (АҮ и АU)													
Таежная, 30	1,8	0,72	0,005	0,005	0,007	0,012	0,01	0,009	0,001				
Подтаежная,31	0,9	50,9	0,25	0,14	0,45	17,3	0,05	0,30	0,47				
Лесостепная,25	5,1	74,9	0,20	0,23	0,74	30,5	0,07	0,46	0,30				
Срединные горизонты (ВІ и ВТ)													
Таежная, 9	1,0	0,14	0,004	0,002	0,003	0,010	0,01	0,003	0,001				
Подтаежная,23	20,0	14,6	0,79	0,09	0,69	10,9	1,05	0,18	1,14				
Лесостепная, 7	22,1	28,4	0,85	0,24	0,99	27,5	0,7	0,5	0,78				
		Ниж	ние гориз	онты (G и E	BCA)								
Таежная, 29	0,9	0,1	0,003	0,001	0,003	0,014	0,01	0,002	0,001				
Подтаежная,9	4,2	26,2	2,00	0,03	0,49	28,0	1,22	0,21	0,42				
Лесостепная, 8	15,6	77,4	0,90	0,26	1,74	72,0	0,78	0,51	0,86				

Содержания форм соединений металлов

Примечание. Выделены медианные значения с коэффициентом вариации Cv, %: *менее 100* и *100–200*. Без выделе-* в %. доля сорбированных Со, Си, Fe, Mn, Ni и Sr за счет выноса в речную сеть в кислых условиях при слабой аккумуляции в Fe-Mn конкрециях ввиду отсутствия контрастных изменений окислительно-восстановительного потенциала, что ведет к уменьшению с глубиной подвижности Со, $Mn_{100\to20}$, $Ni_{84\to8}$, $Pb_{68\to26}$, $Cu_{50\to30}$, $Sr_{45\to20}$, $Zn_{17\to6}$, $Fe_{10\to6}$. В гумусовых горизонтах почв лесостепной мик-

В гумусовых горизонтах почв лесостепной микроарены значения коэффициентов L обменных соединений варьируют в пределах 0,3÷6,0, сорбированных и общего содержания – 0,7÷1,5, комплексных – не превышают 4,0, трудно сорбированных – 8,5 (рис. 5). При гранулометрической однородности почв повышенная контрастность распределения металлов в лесостепных катенах на лёссовидных суглинках западной части Ишимской равнины обусловлена накоплением соединений металлов в солодях днища балки на латеральном биогеохимическом барьере.

Общие черты дифференциации металлов в катенах. Среди подвижных соединений металлов. как правило, преобладают комплексные и сорбированные при подчиненной роли обменных. Только в солодях и черноземах у Sr доминируют обменные соединения (табл. 3). Как и в почвах восточно-европейской тайги и лесостепи [Семенков с соавт., 2016], подвижность Fe, Zn и Cr обусловлена, преимущественно, сорбированными соединениями, которых в 3-30 раз больше, чем комплексных. В геохимии Mn, Co, Ni, Sr и Cu большее значение играет связь с содержанием гумуса, что проявляется в повышенной доле комплексных соединений. Промежуточное положение между металлами группы Fe (Zn и Cr) и Mn (Co, Cu, Ni и Sr) занимает Pb, что ранее отмечали в буроземах на карбонатных суглинках Венгрии [Sipos et al., 2005].

От таежной микроарены к подтаежной и лесостепной увеличивается содержание обменных Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Sr и в меньшей степени Cu, Cr и Zn в гумусовом, срединных и нижних горизонтах почв, что отражает снижение интенсивности выноса их наиболее подвижных соединений за пределы почвенного профиля и может быть диагностировано по уменьшению годовой суммы осадков и смене промывного водного режима периодически промывным и непромывным. В гумусовом горизонте почвенных катен увеличивается содержание комплексных соединений Fe, Pb, Co, Ni и Cu с повышенными значениями констант устойчивости органо-минеральных комплексов [Fan et al., 2015] при близких уровнях содержания в нижележащих горизонтах, что отражает более интенсивное образование таких веществ за счет смены фульватного гумуса таежных дерново-подзолистых почв и глееземов гуматным в черноземах и солодях [Biryukova, Orlov, 2004]. Зональных особенностей дифференциации сорбированных соединений не выявлено.

В катенах Ишимской равнины, близких по условиям миграции элементов и составу почвообразующих пород, выявлена сходная радиальная почвенно-геохимическая структура и подвижность металлов. Темно-серые почвы и черноземы с преимущественно поверхностно-аккумулятивным распределением из-за высокой гумусированности содержат в 2 раза больше Zn, чем аналоги в Западной Сибири. Верхняя часть почв относительно лессовидных суглинков обеднена Ni (R=0,5÷0,8) с элювиально-иллювиальным распределением. Уровни содержания форм металлов преимущественно совпадают с опубликованными материалами по рассматриваемому региону [Этюды ..., 1977; Ильин, Сысо, 2001; Сысо, 2007] за исключением комплексных соединений Си (7,8±3,6 мг/кг) и Ni (9,3±2,4 мг/кг), которых в 2–5 раз больше, вероятно, из-за высокогумусности почв Ишимской равнины, что подтверждает корреляция с содержанием гумуса.

В гумусовом горизонте почв микроарен общее содержание металлов, как правило, варьирует слабо (Cv < 50%). Высокие Cv > 100% встречаются, преимущественно, у соединений металлов с содержанием, близким к порогу чувствительности метода (табл. 3), что, вероятно, определяется увеличением вклада инструментальной ошибки в общую дисперсию [Самсонова, 2008]. Повышенная вариабель-

Таблица З

	F2 – комплексные											<i>F3</i> – сорбированные							
Fe	Fe*	Mn	Pb	Со	Ni	Sr	Cu	Zn	Cr	Mn	Pb	Со	Ni	Sr	Cu	Zn	Cr		
	Гумусовые горизонты (А										U)								
153	0,43	1326	8,7	7,6	9,9	19	7,8	20,7	3,6	431	1,1	0,9	2,6	18,6	0,3	7,0	0,82		
470	0,16	291	11,2	0,7	11,6	<0,5	4,5	13,6	8,7	356	0,8	1,8	9,2	<0,5	7,6	2,0	0,14		
411	0,24	420	6,4	8,1	17,0	28	8,5	11,6	5,4	337	4,5	5,7	10,9	2,8	6,4	3,1	0,21		
Срединные горизонты (ВІ и ВТ)																			
163	0,44	178	5,4	3,4	4,4	13	10,4	9,3	2,9	59	1,1	0,7	1,7	12,9	3,6	2,2	0,52		
299	0,08	137	10,9	0,4	4,6	<0,5	1,3	7,7	9,9	163	0,03	1,7	1,8	0,9	2,1	0,5	<0,5		
181	0,31	155	4,8	5,4	5,2	2,8	7,1	8,4	7,5	17	2,6	1	1,7	2,3	4,0	0,9	0,12		
						I	Нижние	е горизо	нты (G	и ВСА)								
119	0,36	104	5,4	3,2	5,6	16	11,3	10,9	3,5	10	1,5	0,3	2,8	16,4	3,8	1,5	0,57		
132	0,08	149	7,4	0,6	7,9	<0,5	1,8	10,2	9,5	242	<0,5	1,6	5,5	<0,5	2,1	0,2	0,36		
82	0,27	19 7	4,3	5,9	11,4	11	7,7	7,8	6,4	125	2,2	2,9	4,8	14,8	4,7	1	<0,5		

в горизонтах почв ключевых участков, мг/кг

ния Cv>200.



Рис. 5. Латеральное распределение гранулометрических фракций, С_{орг} и форм металлов в гумусовом горизонте катен: л – левая, п – правая, ц – продольная. Прочерк – содержание ниже предела обнаружения. Формы металлов: 1 – обменная, 2 – органоминеральная, 3 – сорбированная гидроксидами Fe и Mn, 4 – силикатная и общее содержание. Гранулометрические фракции G1–G6 см. табл. 1

Fig. 5. Spatial distribution of grain-size fractions, TOC and metal fractions in A-horizons of catenas: π – left, π – right, μ – longitudinal. Dash – content below detection limit. Metal fractions: 1 – exchangeable, 2 – complexed, 3 – bound to Fe and Mn hydroxides, 4 – siliceous and total content. Grain-size fractions G1–G6 see Table 1

ность содержания Mn и Ni (*Cv*=57–111% и 41–54%), по-видимому, типична для почв тайги Западной Сибири [Московченко, 2016]. Содержание подвижных форм варьирует сильнее, чем *F5*, что отмечали для дерново-подзолистых почв [Самонова с соавт., 1998; Самсонова, 2008; Семенков с соавт., 2016 и др].

Выводы:

– от дерново-подзолистых почв южной тайги к темно-серым подтайги и выщелоченным черноземам лесостепи из-за закрепления в гумусовых горизонтах при уменьшении интенсивности выноса наиболее подвижных соединений за пределы почвенного профиля увеличивается содержание обменных соединений Fe, Mn, Pb, Co, Ni и Sr и в меньшей степени Cu, Cr и Zn, a также комплексных Fe, Pb, Co, Ni и Cu;

– контрастность латеральной почвенно-геохимической структуры, оцениваемая разбросом значений коэффициентов *L*, уменьшается в ряду катен таежные–подтаежные–лесостепные за счет сближения условий миграции в автономных и подчиненных ландшафтах микроарен;

 в подчиненных элементарных ландшафтах накапливаются обменные, комплексные и сорбированные соединения металлов на латеральном биогеохимическом барьере таежных, подтаежных и лесостепных катен.

Благодарности. Полевые исследования выполнены в рамках Программы Президиума РАН №4 (Проект 5.4), формы нахождения металлов определены и результаты обобщены в рамках проекта РНФ № 17-77-20072. Авторы благодарны Е.Ю. Зайцевой, Г.В. Клинк, А.О. Константинову, А.Г. Самулеенкову и А.И. Якушеву за помощь в сборе фактического материала и химико-аналитических работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авессаломова И.А. Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 97–117.

Айвазян А.Д. Геохимические особенности флоры ландшафтов юго-западного Алтая. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 155 с.

Борисенко Е.Н. Геохимия глеевого катагенеза в породах красноцветной формации. М.: Наука, 1980.164 с.

Глазовская М.А., Касимов Н.С. Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1987. № 1. С. 11–16.

Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.

Ильин В.Б., Сысо А.И. Почвенно-геохимические провинции в Обь-Иртышском междуречье: причины и следствия // Сибирский экологический журнал. 2001. № 2. С. 111–118.

Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. М.: Наука, 1989. 264 с.

Микроэлементы в почвах СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 252 с.

Московченко Д.В. Биогеохимические особенности почв бассейна реки Мессояха (Тазовский район Ямало-Ненецкого автономного округа) // Вестн. Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2016. Т. 2. № 2. С. 8–21.

Московченко Д.В. Экогеохимия нефтегазодобывающих районов Западной Сибири. Новосибирск: Гео, 2013. 259 с.

Нечаева Е.Г., Снытко В.А., Напрасникова Е.В. и др. Индикационная роль долинных геосистем в ландшафтно-геохимической оценке // Известия РАН. Сер. Географическая. 2010. № 2. С. 90–99.

Самонова О.А., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Ассоциации микроэлементов в профиле дерново-подзолистых почв южной тайги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1998. № 2. С. 14–19.

Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств на примере дерново-подзолистых почв. М.: ЛК, 2008. 160 с.

Семенков И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 29–39.

Содержание и формы микроэлементов в почвах / Под ред. Н.Г. Зырина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 387 с.

Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Т. І. Биогеоценозы и их компоненты. Новосибирск: Наука, 1974. 307 с.

Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с. Этюды по биогеохимии элементов-биофилов. Новосибирск: Наука, 1977. 101 с.

Biryukova O.N., Orlov D.S. Content and composition of humus in the main soil types of Russia // Eurasian Soil Science. 2004. V. 37. № 2. P. 143–158.

Dubovik D.V., Dubovik E.V. Heavy metals in ordinary chernozems on slopes of different gradients and aspects // Eurasian soil science. 2016. V. 49. \mathbb{N} 1. P. 33–44.

Fan T.-T., Wang Yu-J., Li Ch.-B., Zhou D.-M., Friedman S.P. Effects of soil organic matter on sorption of metal ions on soil clay particles // Soil Science Society of America J. 2015. V. 79. P. 794–802.

Geochemical atlas of Europe. Pt. 1. Background information, methodology and maps. Espoo: Geol. Surve. of Finland, 2005. 526 p.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. V. 253. № 3–4. P. 205–221.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in soils and plants. L.; N.Y.: CRC Press, 2011. 505 p.

Motuzova G.V., Minkina T.M., Karpova E.A. et al. Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment // J. of Geochemical Exploration. 2014. V. 144. P. 241–246.

Reimann C., Fabian K., Birke M. et al. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil // Applied Geochemistry. 2018. V. 88. P. 302–318.

Saby N.P.A., Thioulouse J., Jolivet C.C. et al. Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French soil monitoring network data // Scie. of the Total Environment. 2009. V. 407. P. 5644–5652.

Samonova O.A., Aseeva E.N., Kasimov N.S. Metals in 1–0,25 mm grain-size fraction in the soils of the mixed forest zone of the Russian plain // J. of Geochemical Exploration. 2018. V. 184. P. 381–393.

Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A. Microelements in soils of conjugated landscapes with different degrees of hydromorphysm in the Kamennaya steppe // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 3. P. 254–261.

Sipos P., Nemeth T., Mohai I., Dodony I. Effect of soil composition on adsorption of lead as reflected by a study on a natural forest soil profile // Geoderma. 2005. V. 124. P. 363–374.

Sipos P. Distribution and sorption of potentially toxic metals in four forest soils from Hungary // Central European J. of Geosciences. 2009. V. 1–2. P. 183–192.

Syso A.I., Sokolov V.A., Petukhov V.L. et al. Ecological and Biogeochemical Evaluation of Elements Content in Soils and Fodder Grasses of the Agricultural Lands of Siberia // J. Pharm. Sci. & Res. 2017. V. 9. № 4. P. 368–374.

Поступила в редакцию 14.03.2018 После доработки 15.11.2018 Принята к публикации 21.02.2019

I.N. Semenkov¹, N.S. Kasimov², E.V. Terskaya³

LATERAL DIFFERENTIATION OF METAL FRACTIONS IN LOAMY SOIL CATENAS OF THE CENTRAL PART OF WESTERN SIBERIA PLAIN

Lateral fractionation of Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr and Zn compounds (recovered by acetate ammonium buffer (AAc), AAc+1% EDTA and 1n HNO₃) in soils of loamy catenas was studied within three small catchments in the southern taiga, subboreal forests, and forest-steppe of Western Siberia. The total concentrations of Mn (mean value and standard deviation in the A-horizon of soils within the three catchments is 2442 ± 3359 mg/kg), Sr (179 ± 71), Co (20 ± 10), Cu (42 ± 18), Ni (48 ± 35) and Pb (41 ± 51) correspond to their background levels in soils of Western Siberia, while those of Fe ($3,7\pm0,9\%$), Cr (170 ± 34 mg/kg) and Zn (154 ± 141 mg/kg) are higher because of their higher concentrations in parent material. The average content of exchangeable compounds of Fe, Cu, Pb, Co, Zn, Cr, Mn, Ni and Sr in top-soil and sub-soil horizons increases from taiga Luvisols and Gleysols to Phaeozems, Planosols and Chernozems of subboreal forests and forest-steppe. In the A-horizon of this series the content of complexed Cu, Co, Ni, Pb and Fe increases due to higher concentration of organic matter and that of Mn decreases, because it is intensively accumulated by tree vegetation. Specific zonal features of sorbed Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Sr, and Zn were not found.

The mobility of Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, and Zn in O-layer decreases 2 to 3 times from Luvisols to Gleysols withinn taiga catenas in proportion to the amount of complexed compounds. In subboreal forest catenas with Phaeozems, it decreases with depth for Ni (40 to 15%), Pb (45–40), Cu (24–15), Co (15–11), and Fe (5–2); slightly varies for Mn and Zn (60 to 50% and 10 to 9%, respectively) and increases for Sr (10 to 14%) and Cr (5 to 7%). In Planosols, these tendencies are valid for Co, Cu, Fe, and Ni. In forest-steppe catenae with Chernozems, the mobility decreases with depth for Co, Mn (95–56%), Ni and Pb (60–25%) and increases for Sr (37–46%), varying slightly for Cu (40–50), Zn (10–13), Fe (7–8), and Cr (4). In Planosols, these trends are valid for Co, Mn, Ni, Pb, and Cr. The total frequency of lateral fractionation coefficient values corresponding to contrast accumulation and contrast scattering of elements in subordinate landscapes decreases from $35\pm14\%$ in the taiga catchment to $15\pm4\%$ and $13\pm7\%$ in the subbreal forest and forest-steppe catchments respectively.

Key words: catena, mobility, Gleysols, Luvisols, Planosols, Phaeozems, Chernozems, heavy metals' migration, potentially toxic elements

Acknowledgements. Field research was carried out within the framework of the Program N = 4 of the RAS Presidium (Project N = 5.4). Determination of metal fractions and generalization of the results were financially supported by the Russian Science Foundation (project N = 17-77-20072). The authors are grateful to G. Klink, A. Konstantinov, A. Samuleenkov, A. Yakushev and E. Zaitseva for their assistance in field studies and chemical-analytical work.

REFERENCES

Ajvazjan A.D. Geohimicheskie osobennosti flory landshaftov jugo-zapadnogo Altaja [Geochemical features of the flora in the landscapes of the south-western Altai Mountains]. MGU. Moscow. 1974. 155 p. (In Russian)

Avessalomova I.A. Katenarnaja geohimicheskaja organizacija taezhnyh landshaftov Vostochno-Evropejskoj ravniny [Catenary geochemical organization of taiga landscapes in the East European Plain], Geohimija landshaftov i geografija pochv. 100 let so dnja rozhdenija M.A. Glazovskoj. APR, Moscow, 2012. P. 97–117. (In Russian)

Biryukova O.N., Orlov D.S. Content and composition of humus in the main soil types of Russia // Eurasian Soil Science. 2004. V. 37. № 2. P. 143–158.

Borisenko E.N. Geohimiya gleevogo katageneza v porodah krasnocvetnoj formacii [Geochemistry of the Gley Catagenesis of Red Rocks]. Moscow, Nauka, 1980. 164 p. (In Russian)

Dubovik D.V., Dubovik E.V. Heavy metals in ordinary chernozems on slopes of different gradients and aspects // Eurasian soil science. 2016. V. 49. N_{0} 1. P. 33–44.

Fan T.-T., Wang Yu-J., Li Ch.-B., Zhou D.-M., Friedman S.P. Effects of soil organic matter on sorption of metal ions on soil clay particles // Soil Science Society of America J. 2015. V. 79. P. 794–802.

Geochemical atlas of Europe. Pt. 1. Background information, methodology and maps. Espoo: Geol. Surve. of Finland, 2005. 526 p.

Glazovskaja M.A., Kasimov N.S. Landshaftno-geohimicheskie osnovy fonovogo monitoringa prirodnoj sredy [Landscapegeochemical bases for background monitoring of the natural environment] // Vestnik Mosk. Un-ta. Serija 5: Geografija, 1987. № 1. P. 11–16. (In Russian)

Grigor'ev N. A. Raspredelenie himicheskih jelementov v verhnej chasti kontinental'noj kory [Distribution of chemical

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist, PhD. in Geography; *e-mail*: semenkov@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Professor, full-member of the Russian Academy of Science, D.Sc. in Geography; *e-mail*: secretary@geogr.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist; *e-mail*: elena_terskaya@mail.ru

elements in the upper part of the continental crust]. UrO RAN, Ekaterinburg, 2009. 382 p. (In Russian)

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. V. 253. Iss. 3–4. P. 205–221.

Il'in V.B., Syso A.I. Pochvenno-geohimicheskie provincii v Ob'-Irtyshskom mezhdurech'e: prichiny i sledstvija [Soil-geochemical provinces in the Ob-Irtysh rivers interfluve: causes and consequences] // Sibirskij jekologicheskij zhurnal. 2001. № 2. P. 111– 118. (In Russian)

Jetjudy po biogeohimii jelementov-biofilov [Etudes on biogeochemistry of the biophile elements]. Nauka, Novosibirsk, 1977. 101 p. (In Russian)

Kabata-Pendias A. Trace Elements in soils and plants. L.; N.Y.: CRC Press, 2011, 505 p.

Landshaftno-geohimicheskie osnovy fonovogo monitoringa prirodnoj sredy [Landscape-geochemical bases of the background monitoring of the natural environment]. Nauka, Moscow, 1989. 264 p. (In Russian)

Mikrojelementy v pochvah SSSR [Trace elements in soils of the USSR]. MGU, Moscow, 1981. 252 p. (In Russian)

Moskovchenko D.V. Biogeohimicheskie osobennosti pochv bassejna reki Messojaha (Tazovskij rajon Jamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga) [Biogeochemical properties of soils of the Messoyakha River basin (Tazovsky district of the Yamal-Nenets Autonomous Area] // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Jekologija i prirodopol'zovanie, 2016. V. 2, № 2. P. 8– 21. (In Russian)

Moskovchenko D.V. Jekogeohimija neftegazodobyvajushhih rajonov Zapadnoj Sibiri [Ecogeochemistry of oil and gas producing regions of Western Siberia]. Geo, Novosibirsk, 2013. 259 s. (In Russian)

Motuzova G.V., Minkina T.M., Karpova E.A. et al. Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment // J. of Geochemical Exploration. 2014. V. 144. P. 241–246.

Nechaeva E.G., Snytko V.A., Naprasnikova E.V. i dr. Indikacionnaja rol' dolinnyh geosistem v landshaftno-geohimicheskoj ocenke [Indication Model of the Valley Geosystems on the Landscape-Geochemical Evaluation of the Upper Near-Angara Region] // Izvestija RAN. Ser. Geograficheskaja. 2010. № 2. P. 90– 99. (In Russian)

Reimann C., Fabian K., Birke M. et al. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil // Applied Geochemistry. 2018. V. 88. P. 302–318.

Saby N.P.A., Thioulouse J., Jolivet C.C. et al. Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French soil monitoring network data // Scie. of the Total Environment. 2009. V. 407. P. 5644–5652.

Samonova O.A., Aseeva E.N., Kasimov N.S. Metals in 1–0,25 mm grain-size fraction in the soils of the mixed forest zone of the Russian plain // J. of Geochemical Exploration. 2018. V. 184. P. 381–393.

Samonova O.A., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Associacii mikrojelementov v profile dernovo-podzolistyh pochv juzhnoj tajgi [Associations of microelements in the profile of soddy-podzolic soils of the southern taiga] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 17. Pochvovedenie. 1998. № 2. P. 14–19. (In Russian)

Samsonova V.P. Prostranstvennaja izmenchivosť pochvennyh svojstv na primere dernovo-podzolistyh pochv [Spatial variability of soil conditions by the example of soddy-podzolic soils]. LK. Moscow, 2008. 160 p. (In Russian)

Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaja E.V. Lateral'noe raspredelenie form metallov v tundrovyh, taezhnyh i lesostepnyh katenah Vostochno-Evropejskoj ravniny [Lateral distribution of metal forms in tundra, taiga and forest-steppe catenas of the East European Plain] // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija. 2016. № 3. P. 29–39. (In Russian)

Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A. Microelements in soils of conjugated landscapes with different degrees of hydromorphysm in the Kamennaya steppe // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 3. P. 254–261.

Sipos P. Distribution and sorption of potentially toxic metals in four forest soils from Hungary // Central European J. of Geosciences. 2009. V. 1–2. P. 183–192.

Sipos P., Nemeth T., Mohai I., Dodony I. Effect of soil composition on adsorption of lead as reflected by a study on a natural forest soil profile // Geoderma. 2005. V. 124. P. 363–374.

Soderzhanie i formy mikrojelementov v pochvah [Concentrations and forms of microelements in soils] / Ed.: N.G. Zyrin MGU, Moscow, 1979. 387 p. (In Russian)

Struktura, funkcionirovanie i jevoljucija sistemy biogeocenozov Baraby. V I. Biogeocenozy i ih komponenty [Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenosis system. V. I. Biogeocenoses and their components]. Nauka, Novosibirsk, 1974. 307 p. (In Russian)

Syso A.I. Zakonomernosti raspredeleniya himicheskih elementov v pochvoobrazuyushih porodah i pochvah Zapadnoj Sibiri [Regularities of distribution of chemical elements in soilforming rocks and soils of Western Siberia]. SO RAS, Novosibirsk, 2007. 277 p. (In Russian)

Syso A.I., Sokolov V.A., Petukhov V.L. et al. Ecological and Biogeochemical Evaluation of Elements Content in Soils and Fodder Grasses of the Agricultural Lands of Siberia // J. Pharm. Sci. & Res. 2017. V. 9. № 4. 2017. P. 368–374.

> Received 14.03.2018 Revised 15.11.2018 Accepted 21.02.2019