

УДК 550.424.4; 631.416.9

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

ЛАТЕРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ МЕТАЛЛОВ В ТУНДРОВЫХ, ТАЕЖНЫХ И ЛЕСОСТЕПНЫХ КАТЕНАХ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Для оценки миграции металлов изучено латеральное распределение обменных, органоинеральных, специфически сорбированных гидроксидами Fe и Mn форм металлов, и валового содержания Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr и Zn в модельных суглинистых катенах на юге Большеземельской тундры, юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины и Плавском плато. Установлено, что в почвах понижено валовое содержание Fe, Sr и Mn при околосларковых уровнях остальных металлов; в ряду тундровых – таежных – лесостепных катен уменьшается валовое содержание Pb, обменных соединений Fe, Cu, Zn и специфически сорбированного Fe и, наоборот, увеличивается валовое содержание Fe, Ni, Zn, Cu, Mn, органоинеральных Pb, Ni, Co, Zn. Сделан вывод, что контрастность латерального распределения форм металлов уменьшается от тундровых к таежным и лесостепным катенам.

Ключевые слова: катена, водосбор, латеральное распределение, подвижность металлов, глеезем, криометаморфическая почва, дерново-подзолистая почва, чернозем, Восточно-Европейская равнина.

Введение. Одним из первых на важность исследования гипергенных процессов как удобной модели для оценки миграции веществ в геологическом круговороте обратил внимание А.И. Перельман. Особенно значителен его вклад в разработку учения о водной миграции элементов в ландшафтах, отражением которой является радиальная и латеральная структура геохимических катен – совокупность сопряженных в рельефе элементарных ландшафтов. Повышенное внимание в своих работах он уделял изучению поведения Br, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Se, Sr и особенно U, отмечая важность оценки миграционной способности элементов в разных геохимических обстановках. Новаторские идеи А.И. Перельмана реализовались в представлениях о геохимических барьерах, классах водной миграции, типоморфных элементах, созданной им первой ландшафтно-геохимической карте России и географогенетической классификации катен. В этих трудах синтезированы результаты ландшафтно-геохимических исследований в XX в.

Водосборы балок как геохимические микроарены, играющие важную роль в перемещении вещества, – традиционные модельные объекты для оценки радиальной и латеральной структуры геохимических ландшафтов. Достаточно полно изучена их дифференциация по валовому содержанию металлов. Распределение подвижных форм, извлекаемых из почв вытяжками нейтральных солей или слабых кислот, в качестве более чуткого показателя, реагирующего на изменения физико-химических условий, исследовано не так детально. В суглинистых

катенах с подзолистыми почвами и глееземами изучены соединения металлов, извлекаемые вытяжками Тамма и Мера–Джексона: соединения Mn, Ni и Co – на Валдайской возвышенности [Никифорова, 1979]; Fe – в междуречье рек Вычегда и Вятка [Канев, 2011]. Обменные, органоинеральные и специфически сорбированные гидроксидами Fe и Mn соединения металлов в катенах фоновых ландшафтов изучали в лесостепи Приволжской [Касимов и др., 1992] и Среднерусской возвышенностей [Щеглов и др., 2013; Семенков и др., 2013, 2015a]. Для других регионов есть данные только о латеральном распределении валового содержания элементов.

Цель работы – изучение почвенно-геохимической структуры балочных катен на суглинистых отложениях в качестве моделей для оценки миграции металлов в фоновых ландшафтах тундры, тайги и лесостепи Восточно-Европейской равнины.

На равнинах, как правило, модельными объектами для изучения почвенно-геохимической структуры служат ландшафты на лёссовидных суглинках с зональным типом растительности и почв. Для исследования в качестве модельных объектов выбраны монолитные (с однородными почвообразующими породами) суглинистые микроарены с максимальной для конкретной ландшафтной зоны контрастностью условий миграции в катенах [Семенков и др., 2015б]. В тундрах на Восточно-Европейской равнине они представлены сопряжением междуречных глееземов, склоновых криометаморфических почв и глееземов подчиненных ландшафтов, в тайге – подзолистыми остаточными карбонатными почва-

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, академик РАН; 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

ми и глееземами, в лесостепи – черноземами и лугово-черноземными почвами. В связи с этим в тундре и лесостепи выбраны микроарены на лёссовидных суглинках, в тайге – на карбонатных моренных суглинках, так как подзолистые почвы на них контрастнее по величине pH и текстурной дифференциации, чем на подзолистых почвах на лёссовидных суглинках [Тонконогов, 2010].

Материалы и методы исследований. Исследованы фоновые катены трех типичных микроарен с уклонами бортов 4–5° в тундровых и таежных ландшафтах и 7–10° – в лесостепных (рис. 1).

Тундровые катены на лёссовидных суглинках изучены на водосборе площадью 0,25 га в междуречье рек Уса и Кара в 30 км на юг от г. Воркута. Междуречье занято ерником зеленомошно-беломошным на маломощных (до 30 см) мерзлотных глееземах (тундрово-глеевых почвах). На склонах и в днище балки под ерником зеленомошно-беломошным и зеленомошным из-за увеличения глубины протаивания формируются криометаморфические почвы (разрезы 7, 8, 10 и 11) и криометаморфизованные глееземы [Буданцева и др., 2015].

частях склонов под ельником с примесью сосны и осины, разнотравным или кисличным развиты дерново-подзолистые остаточно-карбонатные почвы (разрезы 1 и 9), в том числе с вложенным субпрофилем подзола (разрезы 2 и 5). В воронке сбора талых вод под таволжатником дерново-подзолистые глееватые остаточно-карбонатные почвы отличаются от склоновых сизовой окраской горизонта BTg (разрезы 4 и 8). В днище балки под еловым с примесью березы смородиново-разнотравно-зеленомошным лесом сформировались глееземы (разрезы 3 и 16).

Лесостепные катены с агроландшафтами Плавского плато изучены на водосборе площадью 80 га на левобережье р. Плага – левого притока Упы, в 70 км на юг от г. Тула. На междуречье и склонах развиты агрочерноземы глинисто-иллювиальные (выщелоченные и оподзоленные черноземы) на лёссовидных суглинках. Верхняя часть днища балки со стратоземами (лугово-черноземными почвами) распаханна (разрез 6), в средней и нижней – покрыта злаково-разнотравным лугом (разрезы 7 и 8) [Семенов и др., 2015a].

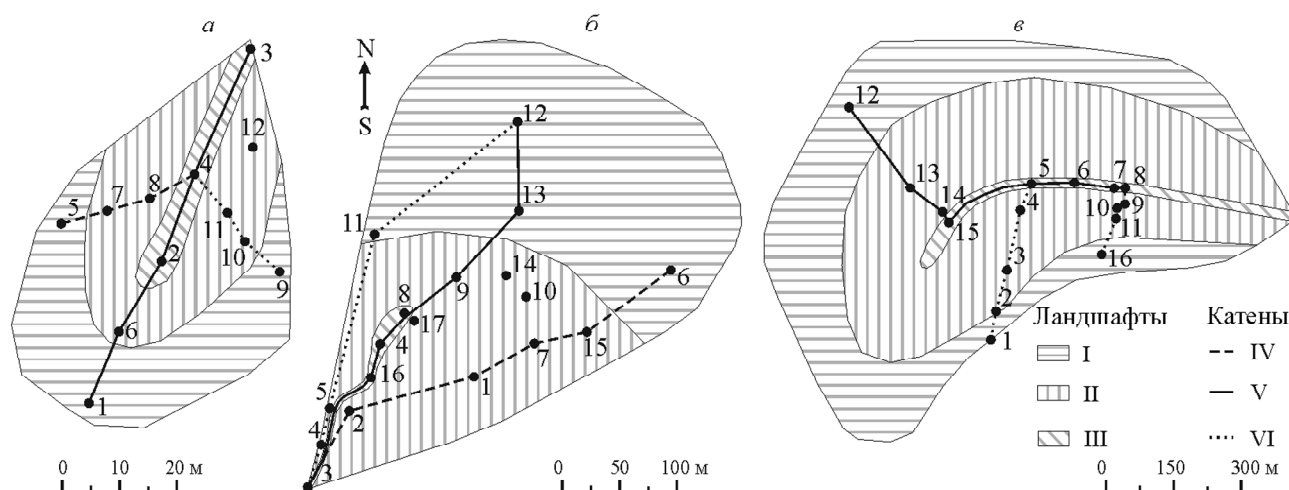


Рис. 1. Модельные микроарены (а – тундровая, б – таежная, в – лесостепная): 1–17 – места заложения разрезов. Элементарные ландшафты: I – автономный выровненной поверхности междуречья, II – трансэлювиальный склонов, III – трансэлювиально-аккумулятивный днищ балок; катены: IV – правая, V – центральная, VI – левая

Fig. 1. Model microareas (a – tundra, b – taiga, c – forest steppe): 1–17 – site locations of sections. Elementary landscapes: I – autonomous flat watershed surface; II – transeluvial slope; III – transeluvial-accumulative ravine bottoms. Catenae: IV – right, V – central, VI – left

Таежные катены на моренных карбонатных суглинках исследованы в юго-западной части Мезенско-Вычегодской равнины на водосборе площадью 8,7 га (Ляльский стационар Института биологии Коми СО РАН, в 70 км на север от г. Сыктывкар). На междуречье под елово-пихтовым можжевельником злаково-разнотравно-зеленомошным лесом формируются подзолистые остаточно-карбонатные почвы (разрезы 6, 7, 12, рис. 1, б). Верхняя часть слабопокатых склонов занята молодым березово-ивовым мертвopoкpoвным лесом с подростом ели и сосны, чередующимся с участками разнотравно-злакового луга, на дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах (разрезы 7, 10, 11, 13–15, рис. 1, б). В средней и нижней

В балках изучали продольную катену вдоль днища и две поперечные катены от правого и левого бортов. Всего заложено 32 почвенных разрезов, 13 точек поверхностного опробования, отобрано 176 проб почв, в том числе 60 из гумусового горизонта. Латеральная почвенно-геохимическая структура катен оценена по гумусовым горизонтам, наиболее ярко отражающим результат взаимодействия биоты с минеральным веществом почв, а также характер поверхностного стока химических элементов.

Химико-аналитические исследования выполнены в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Содержание гумуса и величина pH водной суспензии

определены по [Аринушкина, 1962], гранулометрический состав – дифрактометрическим методом; валовое содержание металлов – рентген-флуоресцентным методом, содержание металлов в вытяжках – атомно-абсорбционным методом. Непрочно связанные соединения Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Zn, Cu, Sr и Sr экстрагировали в течение 18 ч тремя параллельными вытяжками: 1н HNO_3 (соотношение почва : раствор = 1:10), ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8 (1:5) и его раствором с 1%-ной этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА) (1:5). Обменные соединения металлов извлекали ацетатно-аммонийным буфером. Количество органоминеральных соединений рассчитывали по разнице между концентрацией элементов в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера с ЭДТА и чистым буфером; специфически сорбированные гидроксидами Fe и Mn формы – по разнице содержания в азотнокислой и ацетатно-аммонийной вытяжках [Минкина и др., 2009]. Количество прочно связанных соединений (силикатные соединения, или остаточная фракция) рассчитывали по разнице между валовым содержанием металла и содержанием трех подвижных форм.

Валовое содержание металлов в почвах сравнивали с кларковыми уровнями. Кларк концентрации (КК) – отношение содержания металла в почве к его содержанию в литосфере по А.П. Виноградову [1962], кларк рассеяния (КР) – величина, обратная КК. Характер латерального распределения металлов и его контрастность в гумусовых горизонтах почв катен оценивали с помощью коэффициента латеральной дифференциации (L) – отношения содержания в почвах подчиненных ландшафтов к содержанию в почвах автономных позиций. Связь между распределением металлов и физико-химическими свойствами считали значимой по значениям коэффициента линейной корреляции r с уровнем значимости $>0,95$.

Результаты исследований и их обсуждение.

Уровень содержания металлов. Содержание металлов в гумусовом горизонте почв катен соответствует или меньше кларка литосферы (таблица, рис. 2). Кислые глеевые почвы Большеземельской тундры на лёссовидных суглинках наиболее обеднены металлами: ($\text{KР}_{\text{Fe}}=1,9$; $\text{KР}_{\text{Sr}}=2,2$; $\text{KР}_{\text{Mn}}=6,1$). Содержание подвижных форм металлов соответствует фоновым значениям [Ковда и др., 1959; Микроэлементы..., 1981б; Geochemical..., 2005; Kabata-Pendias, 2011; Reimann et al., 2014]. Геохимические спектры подзолистых почв и глееземов таежных катен Мезенско-Вычегодской равнины, а также черноземов и лугово-черноземных почв лесостепных катен Плавского плато отличаются мало. Глееземы и криометаморфические почвы катен Большеземельской тундры содержат больше Pb, Sr и меньше Mn, Ni, Co при близком уровне содержания Fe, Cr, Cu, Zn (рис. 2).

Содержание подвижных форм металлов варьирует в гумусовом горизонте почв каждой микроаре-

ны на уровне 20–80%, типичном для почв Восточно-Европейской равнины [Микроэлементы..., 1973]. Значения коэффициента вариации $>100\%$ свойственны преимущественно соединениям металлов с содержанием в почвах, близким к порогу чувствительности метода. В тундровых глееземах и криометаморфических почвах они характерны⁴ для обменного Zn_{272} , органоминеральных Cu_{105} , Ni_{124} , Pb_{221} , Fe_{546} , Mn_{664} , Zn_{6471} , специфически сорбированного Mn_{327} . В подзолистых, дерново-подзолистых почвах и глееземах высокая вариабельность выявлена для обменных Cu_{1637} , Zn_{151} , органоминеральных Ni_{415} , Zn_{100} и специфически сорбированных Ni_{199} . В лесостепных черноземах она повышена только у специфически сорбированного Cr_{120} . Вариабельность содержания металлов в силикатной форме меньше, чем в обменной, органоминеральной или специфически сорбированной для Fe, Sr, Cr, Cu, Zn и находится на одном уровне для Mn, Co, Ni и Pb, т.е. чем больше доля силикатных соединений от валового содержания, тем меньше вариабельность ее содержания [Самсонова, 2008; Семенов и др., 2013].

В ряду тундровые глееземы–таежные подзолистые–лесостепные черноземы уменьшается содержание валового Pb₁₇ и увеличивается содержание валовых Fe_{1,2}, Ni_{1,3}, Zn_{1,4}, Cu_{1,6}, Mn_{3,5}. Для Cu, Ni, Zn такая же закономерность установлена в зональном ряду почв Восточно-Европейской равнины [Ковда и др., 1959; Микроэлементы..., 1973]. Содержание Mn, несмотря на его высокую биофильность, зависит преимущественно от состава почвообразующих пород [Микроэлементы..., 1973]. От почв тундро-

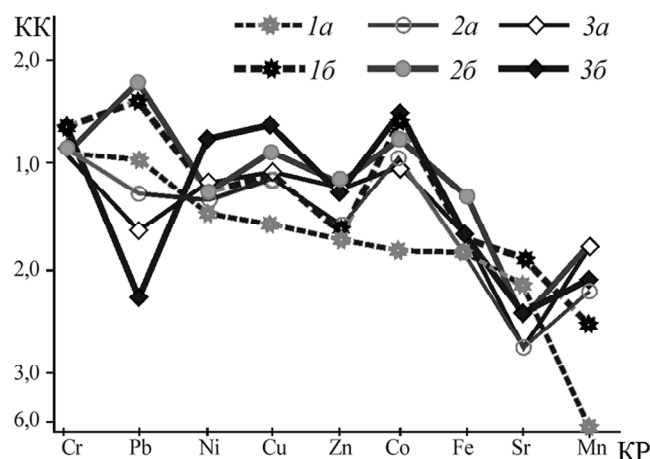


Рис. 2. Геохимические спектры гумусовых горизонтов (а) и почвообразующих пород (б): 1 – тундровая (6 проб в гумусовом горизонте, 7 проб в почвообразующей породе), 2 – таежная (23/10), 3 – лесостепная (31/3) микроарены. Кларки концентрации (КК) и рассеяния (КР) относительно литосферы, по [Виноградов, 1962]

Fig. 2. Geochemical spectra of humus horizons (a) and soil-forming rocks (b): 1 – tundra microarena (6 samples from humus horizon, 7 samples from soil-forming rocks); 2 – taiga microarena (23/10); 3 – forest steppe microarena (31/3). Clarks of concentrations (CC) and dispersal (CD) relative to the lithosphere [Vinogradov, 1962]

⁴ В подстрочных индексах указаны значения коэффициента вариации, %.

Содержание гранулометрических фракций, гумуса (%), металлов (мг/кг) и величина рН в гумусовых горизонтах почв автономных ландшафтов микроарен

Катены		Фракция						pH	Co					Cr					Cu					Fe					
									C _{орг}																				
		I	II	III	IV	V	VI			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Тундровые	п(1)	0,1	15	56	12	13	3,9	4,4	0,4	0	0,1	9	9,5	1,2	–	2,2	94	98	0,6	2,2	2,7	24	30	608	9	0,57	1,6	2,2	
	ц(1)	1,6	19	55	12	11	2,4	6,8	0,4	0	0,1	5	5,5	1	–	1,1	87	89	1,2	1,8	4,9	13	21	718	15	0,87	1,5	2,5	
	л(1)	1,1	11	51	12	19	7,1	0,4	0,7	0,4	0,4	22	24	0,5	–	1,2	92	93	2,2	3,2	2,8	35	43	307	226	0,33	2,3	2,6	
Таежные	п(3)	29	32	22	6,8	8,4	1,8	4,9	3,1	0,3	0,9	1,7	13	18	1	–	2,2	87	90	0,14	0,9	2,4	34	44	83	1364	0,42	1,9	2,4
	ц(3)	29	28	23	7,7	10	2,4	4,5	1,4	0,3	0,6	1,6	15	18	1,3	–	2,8	87	90	0,4	3,5	2,8	31	44	186	1364	0,44	1,9	2,4
	л(1)	29	32	22	6,8	8,4	1,8	4	3,1	0,3	0,9	1,7	13	18	1	–	2,2	87	90	0,1	0,9	2,4	34	44	83	1364	0,43	1,9	2,4
Лесо- степные	п ₁ (2)	–	1,2	53	15	25	5,8	5,8	3,6	0,1	2,2	1,9	16	19	0,2	0,1	0,8	85	85	0,1	2,4	3,8	37	42	1,8	295	0,05	2,8	2,9
	ц(3)	–	0,2	53	16	25	5,7	5,5	2,6	0,1	2,9	1,1	14	19	0,2	0,1	0,5	91	92	0,1	2,6	3,5	40	46	1,5	357	0,05	2,8	3
	п ₂ (1)	2,2	2	54	14	22	5,3	5,5	3,4	0,1	1,7	2,3	14	18	0,1	0,4	0,7	84	85	0,1	2,7	2,9	38	44	1,2	337	0,05	2,8	2,9
Катены	Mn						Ni			Pb					Sr					Zn									
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
Тундровые	п(1)	9,6	0	7,3	134	150	0,2	0,1	0,1	39	39	0,6	0	2	14	17	0,7	–	–	–	169	170	0,27	0	2,8	46	49		
	ц(1)	4,5	0,4	1,1	113	120	0,2	0,1	0,1	40	40	0,6	0	1,9	8,6	11	–	–	–	–	142	142	0,24	1,1	2	46	49		
	л(1)	59	45	119	122	345	0,8	0	–	48	49	0,6	0,6	2	24	27	0,5	0,3	–	–	188	186	0,7	–	6,5	45	52		
Таежные	п(3)	43	190	113	216	575	0,2	–	1	43	45	0,59	1,2	1,4	6,4	11	9,9	–	–	–	114	124	0,16	1,5	8,9	51	60		
	ц(3)	10	140	60	141	347	0,3	–	0,8	44	45	0,7	1	3,2	6,4	12	9,9	–	–	–	114	127	0,16	0,6	4,7	49	57		
	л1	43	190	113	216	575	0,2	–	1	44	45	0,6	1,2	1,4	6,4	12	9,9	–	–	–	114	124	0,16	1,5	8,9	51	60		
Лесо- степные	п ₁ (2)	13	191	128	275	588	0,1	4,1	6,1	44	44	52	0,5	2,1	0,8	8,8	8,1	9	–	3,7	116	128	0,12	1,1	3,6	61	68		
	ц(3)	18	235	127	201	560	0,2	3,9	5,8	42	42	52	0,2	3,4	0,9	5,1	10	9,7	–	2,6	121	131	0,01	1,2	5,1	72	76		
	п ₂ (1)	12	196	176	209	592	0,2	3,7	5,4	41	41	50	0,2	3,8	1,1	5,9	11	7,8	–	4,9	116	126	0,01	3,5	3,3	64	71		

Примечания. Катены: л – левая, п – правая, ц – центральная, в скобках – число проб. Форма металлов: 1 – обменная, 2 – органоминеральная, 3 – сорбированная гидроксидами Fe и Mn, 4 – силикатная, 5 – валовое содержание. Прочерк – содержание ниже предела обнаружения. Гранулометрические фракции: I – крупнопесчаная и среднепесчаная, II – мелкопесчаная, III – крупнопылеватая, IV – среднепылеватая, V – мелкопылеватая, VI – илистая. Полуторным выделены значения, отличающиеся более чем в 1,5 раза от среднего содержания по микроарене; * в %.

вых катен к таежным и лесостепным уменьшается содержание обменных Fe_{610} , Zn_{11} , Cu_9 , специфически сорбированного Fe_{19} , что отражает уменьшение их подвижности при смене в этих почвах глеевой среды кислородной. Содержание органоминерального Pb увеличивается в 4 раза, Co и Ni – в 15 и 26 раз, Zn – в 330 раз соответственно, специфически сорбированных Mn и Ni – в 27 и 30 раз, что отражает аккумуляцию на биогеохимическом барьере в гумусовых горизонтах.

Тундровые катены. В гранулометрическом составе легкосуглинистых глееземов и криометаморфических почв катен на юго-западе Большеземельской тундры доминирует крупная пыль (рис. 3, а). Почвы очень кислые: pH составляет $3,7 \pm 0,3$ ($n=13$) в горизонте BHF и достоверно не отличается в раз-

ных ландшафтах, равномерно распределяясь в междуречных и склоновых глееземах с минимумом в верхней части криометаморфических почв. Содержание $C_{орг}$ уменьшается с глубиной с $25 \pm 4\%$ ($n=13$) в подстильно-торфяном горизонте O до $4,4 \pm 2,7\%$ ($n=5$) в горизонте BHF и до $0,3\%$ ($n=32$) в горизонтах G, CRM и в мерзлоте.

В тундровой микроарене глееземы и криометаморфические почвы подчиненных ландшафтов обеднены песчаной фракцией ($L=0,1 \div 0,5$); склоновые криометаморфические почвы содержат больше ила и меньше гумуса ($L=1,6$ и $0,6$ соответственно).

В горизонте BHF глеезема автономного ландшафта катены правого борта балки содержится больше крупного и среднего песка относительно среднего по микроарене, а также несколько увели-

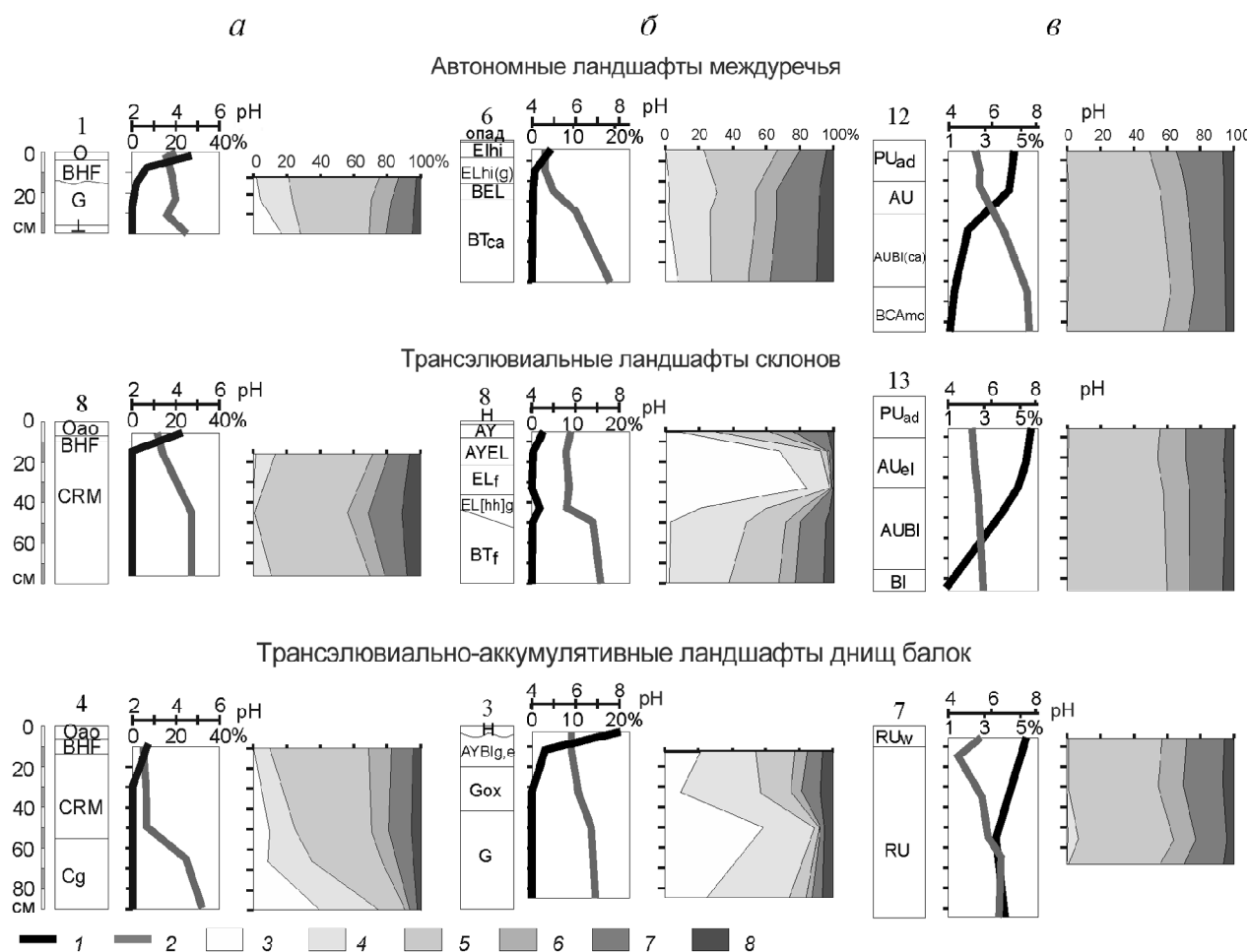


Рис. 3. Радиальное распределение величины pH (1), содержания гумуса (2) и гранулометрических фракций (3 – крупный и средний песок, 4 – мелкий песок, 5 – крупная пыль, 6 – средняя пыль, 7 – мелкая пыль, 8 – ил) в почвах; а – тундровая микроарена: глеезем криотурбированный (разрез 1), криометаморфическая грубогумусированная глееватая почва (разрез 4), криометаморфическая грубогумусовая почва (разрез 8); б – таежная микроарена: глеезем перегнойно-окисленно-глеевый (разрез 3), подзолистая поверхностно-глееватая остаточно-карбонатная почва (разрез 6), дерново-подзолистая со вторым гумусовым горизонтом остаточно-карбонатная почва (разрез 8); в – лесостепная микроарена: стратозем темногумусовый (разрез 7), агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный (разрез 12), агрочернозем глинисто-иллювиальный (разрез 13). Названия горизонтов почв даны по [Классификация..., 2004]

Fig. 3. Radial distribution of pH (1), humus content (2) and granulometric fractions (3 – coarse and medium sand, 4 – fine sand, 5 – coarse silt, 6 – medium silt, 7 – fine silt, 8 – mud) in soils; а – tundra microarena: cryoturbated gley soil (section 1), cryometamorphic humified gley soil (section 4), cryometamorphic humified soil (section 8); б – taiga microarena: gley soil humified-oxidized (section 3), podzolic surface-gley residual carbonate soil (section 6), sod-podzolic residual carbonate soil with second humus horizon (section 8); в – forest steppe microarena: black humified stratosoil (section 7), agrochernoze clayey-illuvial typical (section 12), agrochernoze clayey-illuvial (section 13). Names of soil horizons according to [Klassifikatsiya..., 2004]

$\dot{a}$

Катены		Тундровые									Тасжыные									Лесостепные											
Профиль		п			ц			л			п			ц			л			п ₁			ц			п ₂					
Ландшафт		А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА			
Фракции	I																														
	II																														
	III																														
	IV																														
	V																														
	VI																														
Гумус																															
Co	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Cr	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Cu	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Fe	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Mg	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Pb	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Sr	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					

б



Рис. 4. Латеральное распределение гранулометрических фракций, гумуса и форм металлов в гумусовом горизонте катен. Катены: п – правая, ц – центральная, л – левая; косая – содержание ниже предела обнаружения; прочерк – нет данных.

Форма металлов: 1 – обменная, 2 – органоминеральная, 3 – специфически сорбированная гидроксидами Fe и Mn, 4 – силикатная и валовое содержание; прочерк – содержание ниже предела обнаружения.

Гранулометрические фракции: I – крупнопесчаная и среднеспесчаная, II – мелкпесчаная, III – крупнопылеватая, IV – среднеспылеватая, V – мелкпесчаная, VI – илистая. Значения коэффициента L: 5 – <0,2; 6 – 0,3–0,7; 7 – 0,8–1,3; 8 – 1,4–1,9; 9 – 2,0–4,9; 10 – 5,0–20; 11 – >21

Fig. 4. Lateral distribution of granulometric fractions, humus and metal forms in humus horizon of catenae. Catenaes: r – right, c – central, l – left; oblique line – concentration less than detectable limit; dash line – data absent.

Metal forms: 1 – exchangeable, 2 – organic matter bounded, 3 – Fe and Mn oxide fractions, 4 – silicic and total content; dash line – concentration less than detectable limit.

Granulometric fractions: I – coarse and medium sand, II – fine sand, III – coarse silt, IV – medium silt, V – fine silt, VI – mud.

Coefficient L values: 5 – <0,2; 6 – 0,3–0,7; 7 – 0,8–1,3; 8 – 1,4–1,9; 9 – 2,0–4,9; 10 – 5,0–20; 11 – >21

чено содержание органоминерального Mn (таблица). В глееземах автономного ландшафта катены левого борта балки больше доля илистой фракции, что, вероятно, привело к увеличению содержания обменных форм Ni, Cu, Mn, Zn, органоминеральных Co, Mn, Pb, Sr, специфически сорбированных Co, Mn, Zn, силикатных Co, Pb и валового Co; для большинства элементов это подтверждается значимой корреляцией с ней ($r=0,35\div0,64$, $n=36$).

В тундровых катенах латеральное распределение металлов высококонтрастно (рис. 4). В подчиненных ландшафтах максимально содержание валовых и силикатных Mn, Co, Cu и Pb ($L=1,3\div2,1$), вероятно, из-за их накопления на латеральном биогеохимическом барьере (рис. 4), который ранее отмечался в таежных песчаных катенах Н–Fe-класса Мещеры и бассейна Оки [Авессаломова, 2012]. Повышенное содержание Mn и Cu выявлено ранее в песчаных катенах тундр Западной Сибири [Московченко, 1998]. В почвах днища балки тундровой микроарены понижено содержание валового Cr и силикатного Pb ($L=0,6$). Содержание Fe, Sr, Ni и Zn изменяется мало ($L=1,0\div1,2$).

В почвах склонов на кислородном барьере накапливаются обменные соединения Mn, Cu и Zn, а также Sr ($L=2\div10$). В днище балки рассеиваются Sr и Cu ($L<0,4$) и накапливается Zn ($L=2$). Равномерно распределены Fe, Co, Cr, Ni и Pb ($L=0,8\div1,0$).

Органоминеральные соединения Fe аккумулируются в почвах подчиненных ландшафтов ($L=4\div12$), а Pb рассеиваются ($L<0,4$). Содержание этой формы Co и Sr ниже порога чувствительности метода. Остальным металлам свойственно сложное распределение. Mn и Zn рассеиваются в почвах склонов ($<0,7$) и накапливаются в днище балки ($L=1,3\div21$);

Ni и Cu характеризуются обратной закономерностью ($L=2,5\div2,6$ и $0,6\div0,9$ соответственно).

Специфически сорбированные Mn, Co, Ni и Zn накапливаются на биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов, Pb – только в глееземах и криометаморфических почвах днища балки ($L=1,4\div7,1$), Fe рассеивается в почвах склонов, Cu – в днище балки ($L=0,6\div0,7$). Содержание Cr остается постоянным, а Sr – не превышает порога чувствительности.

Изменение содержания песчаной фракции, гумуса и окислительно-восстановительных условий среды привело к высококонтрастному распределению металлов в гумусовом горизонте почв тундровых катен с преимущественным накоплением в подчиненных ландшафтах (рис. 4).

Таежные катены. В легкосуглинистых остаточнокорбонатных подзолистых, дерново-подзолистых почвах и глееземах таежных катен на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины преобладает песчаная фракция и лишь в отдельных образцах – мелко- и крупнопылеватая. В горизонте АУ величина pH слабо варьирует, увеличиваясь с глубиной от 4,0 до 7,4 в автономных подзолистых почвах и от 5,2 до 6,6 в дерново-подзолистых почвах и глееземах трансэлювиально-аккумулятивных ландшафтов (рис. 3,б). Содержание $C_{орг}$ уменьшается с глубиной с 25% в органогенных горизонтах до 1,5% в АУ и 0,1% в ВТ с локальным максимумом во втором гумусовом горизонте, где его в 1,5–2 раза больше, чем в горизонте ЕL.

В почвах склонов и в днище балки таежной микроарены увеличивается доля мелкого песка ($L=1,4\div1,5$) за счет крупной пыли ($L=0,8$). Значения pH в верхнем корнеобитаемом слое почв увеличи-

ваются с 4–5 в автономных ландшафтах до 6 в подчиненных, вероятно, из-за влияния грунтовых вод, насыщающихся ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} при прохождении через толщу карбонатных моренных суглинков. Среднее содержание гумуса в почвах подчиненных ландшафтов в 2,3 раза меньше, чем в остаточно-карбонатных подзолистых почвах междуречья при высоком уровне вариабельности ($C_v=100\%$).

В подзолистых почвах автономных ландшафтов левого борта балки повышена гумусность, что привело к увеличению содержания обменных соединений Mn, органоминеральных Cu, Zn и специфически сорбированных Zn (таблица). Для Cu и Mn это подтверждается значимыми значениями коэффициента корреляции с содержанием гумуса: $r=0,57$ и $0,64$ соответственно ($n=64$).

В гумусовом горизонте почв таежных катен на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины латеральное распределение металлов контрастно: $0,4 < L < 5,0$ (рис. 4). Почвы автономных и подчиненных ландшафтов по содержанию валовых и силикатных соединений практически не отличаются ($L=0,8 \div 1,2$). Только Pb рассеивается ($L=0,4$) в остаточно-карбонатных дерново-подзолистых почвах склонов, а в глееземах увеличивается валовое содержание Mn ($L=1,5$). В почвах подчиненных ландшафтов повышенное содержание Mn ранее отмечалось в таежных катенах Смоленско-Московской возвышенности, заповедника Тульские засеки на покровных и моренных суглинках и на песчаных в Мещере [Геохимия..., 1983; Побединцева, Дианова, 1983; Ландшафтно-геохимические..., 1989; Касимов и др., 2003]. В таежных катенах равномерное распределение валовых Fe и Cr выявлено на покровных и моренных суглинках на юге Смоленско-Московской возвышенности [Касимов и др., 2003], Ni и Zn – в заповеднике Тульские засеки [Побединцева, Дианова, 1983], Cu – в Мещере [Ландшафтно-геохимические..., 1989].

Распределение подвижных и слабоподвижных соединений металлов контрастнее валовых и силикатных. В почвах подчиненных позиций рассеиваются обменные Fe, Cr, Cu, Ni ($L=0,4 \div 0,7$), органоминеральные Cu, Zn ($L=0,6 \div 0,7$) и специфически сорбированные Ni и Zn ($L < 0,6$). Накопление свойственно всем подвижным формам Mn ($L=1,3 \div 2,4$) и Sr, органоминеральным Co и Ni, специфически сорбированным Co и Cr ($L=1,6 \div 5,0$). Формы остальных металлов распределены равномерно в гумусовом горизонте подзолистых, дерново-подзолистых почв и глееземов.

Несмотря на условия, благоприятные для выноса металлов (увеличение доли песчаных фракций и снижение гумусности), в почвах подчиненных ландшафтов, частота встречаемости значений коэффициента близка – $L < 0,8$ и $L > 1,3$. Это указывает на то, что в таежных катенах на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины с подзолистыми почвами и глееземами растительность захватывает биогенные элементы за счет повышенной продуктивности или консервации в мортмассе, что ранее отмечалось для

валового содержания металлов в кислых таежных катенах центра Восточно-Европейской равнины [Авессаломова, 2012]. На биогеохимическом барьере в почвах нижних звеньев катен накапливаются подвижные формы Co, Mn и Sr.

В таежных катенах с подзолистыми и дерново-подзолистыми остаточно-карбонатными почвами и глееземами латеральная почвенно-геохимическая структура металлов контрастна, повышена аккумуляция подвижных соединений микроэлементов (Co, Mn, Sr и Zn) на биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов.

Лесостепные катены. В средне-тяжелосуглинистых выщелоченных и оподзоленных черноземах и лугово-черноземных почвах лесостепных катен Плавского плато преобладает крупная пыль (рис. 3, в). Черноземы содержат в горизонтах PU и AU 5,0% гумуса и имеют слабокислую ($\text{pH } 5,2\text{--}5,9$) реакцию среды, возрастающую до $6,0\text{--}7,2$ в горизонтах VI и BC_{Amc}. В лугово-черноземных почвах днища балки содержание $C_{\text{орг}}$ и величина pH в верхней метровой толще варьируют в пределах $4,0\text{--}6,0\%$ и $5,0\text{--}6,0$ соответственно [Семенков и др., 2013].

Выщелоченные черноземы автономных ландшафтов трех катен сходны по гранулометрическому составу, величине pH и гумусности (таблица). Небольшие различия в доле песчаных фракций несущественно влияют на содержание форм металлов. В одной из катен правого борта повышенное содержание обменных соединений Zn, вероятно, обусловлено большей природной вариабельностью его соединений ($C_v=92\%$).

В лесостепных катенах Плавского плато латеральное распределение металлов в гумусовых горизонтах почв преимущественно равномерное из-за их слабоконтрастной дифференциации по физико-химическим свойствам, что, вероятно, типично для лесостепных и степных катен с черноземами и лугово-черноземными почвами и отмечалось ранее в литературе [Снытко, 1978; Касимов и др., 1992; Щеглов и др., 2013].

Наиболее контрастно распределены Pb и Zn, соединения которых накапливаются преимущественно в подчиненных ландшафтах ($L=1,3 \div 3,1$) (рис. 4), что ранее отмечалось для них в сходных по условиям миграции катенах Приволжской возвышенности [Касимов и др., 1992]. Рассеяние в оподзоленных черноземах склонов характерно для специфически сорбированного Zn, силикатных соединений и валового содержания Pb ($L=0,4 \div 0,7$). Также повышена контрастность дифференциации у силикатных соединений Mn ($L=0,7$) и органоминеральных Cr ($L=0,7 \div 2,0$).

В лесостепных катенах с выщелоченными и оподзоленными черноземами и лугово-черноземными почвами выявлено слабоконтрастное латеральное распределение гранулометрических фракций, pH, гумуса и различных форм металлов.

Таким образом, от тундровых катен к таежным и лесостепным (рис. 4) из-за более однородного распределения гранулометрических фракций, величины

pH и содержания гумуса уменьшается контрастность латерального распределения форм металлов. Между частотой обнаружения сходного латерального распределения металлов на одной микроаре и значением коэффициента вариации их содержания в гумусовом горизонте почв выявлена обратная зависимость: коэффициент корреляции Спирмана составляет $r = -(0,30-0,81)$ ($n=53$), т.е. в разных катенах одной микроарены при небольшом числе проб из почв автономных ландшафтов и высокой вариабельности содержания металлов формируются разные структуры латерального распределения.

В подчиненных ландшафтах большинства тундровых, таежных и лесостепных катен аккумулируются обменные Mn, Co и Zn. Мигрирующие и накапливающиеся в подчиненных ландшафтах тундровых и таежных катен обменные соединения Co, Pb, Sr, органоминеральные и специфически сорбированные соединения Fe распределяются равномерно в лесостепных катенах.

Выводы:

– в ряду почв глееземы Большеземельской тундры – подзолистые почвы Мезенско-Вычегодской равнины – выщелоченные черноземы Плавского плато уменьшается валовое содержание Pb и увеличивается содержание Fe, Ni, Zn, Cu и Mn. Содержание обменных форм Fe, Cu, Zn и специфически сорбированного Fe уменьшается из-за смены глеевой обстановки на кислородную; увеличивается содержание органоминеральных соединений Pb, Co, Ni,

Zn, аккумулирующихся на биогеохимическом барьере в гумусовых горизонтах;

– на юге Большеземельской тундры в катенах с глееземами и криометаморфическими почвами на лёссовидных суглинках изменение содержания илистой фракции, гумуса и окислительно-восстановительных условий среды привело в подчиненных ландшафтах к контрастному увеличению содержания подвижных форм Fe, Mn, Co, Cr, Pb, Sr и Zn;

– на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины в катенах с подзолистыми и дерново-подзолистыми остаточными-карбонатными почвами и глееземами на карбонатных моренных суглинках с уменьшающейся концентрацией крупной пыли и гумуса и увеличивающимся содержанием мелкого песка и pH установлено контрастное латеральное распределение Mn, Co, Cu, Ni, Pb, Zn из-за аккумуляции их подвижных соединений на биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов;

– на Плавском плато в катенах с выщелоченными и оподзоленными черноземами и лугово-черноземными почвами на лёссовидных суглинках, слабоконтрастных по латеральному распределению гранулометрических фракций, величины pH и содержания гумуса, концентрация форм металлов в почвах автономных и подчиненных ландшафтов отличается мало;

– уменьшение контрастности изменения физико-химических свойств почв в ряду тундровые – таежные – лесостепные катены ведет к уменьшению контрастности латеральной дифференциации металлов.

Благодарности. Полевые и химико-аналитические исследования выполнены в 2009–2010 гг. в рамках проекта Минобрнауки РФ с МГУ (соглашение № 8673), обобщение полученных результатов – за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

Авторы благодарны Н.Н. Ивановой, В.В. Каганову, Д.В. Карелину, А.В. Почикалову, М.П. Тентюкову за помощь в сборе материала.

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.
- Буданцева Н.А., Горшков Е.И., Исаев В.С. и др. Инженерно-геологические и геохимические особенности бугристых ландшафтов в районе учебно-научного полигона «Хановей» // Инженерная геология. 2015. № 3. С. 4–20.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Канев В.В. Динамика содержания кислоторастворимых соединений железа в дерново-подзолистых почвах южной части республики Коми // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1312–1326.
- Касимов Н.С., Самонова О.А., Асеева Е.Н. Фоновая почвенно-геохимическая структура лесостепи Приволжской возвышенности // Почвоведение. 1992. № 8. С. 5–22.
- Касимов Н.С., Самонова О.А., Кошелева Н.Е. Фоновая геохимическая дифференциация ландшафтов смешанных лесов центра Русской равнины // География и окружающая среда. СПб.: Наука, 2003. С. 261–277.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 67 с.
- Ландшафтно-геохимические основы фоновый мониторинга природной среды. М.: Наука, 1989. 264 с.
- Микроэлементы в почвах Советского Союза. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 282 с.
- Микроэлементы в почвах СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 252 с.
- Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав и соединения тяжелых металлов в почвах. Р. на/Д: Эверест, 2009. 208 с.
- Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.
- Никифорова Е.М. Микроэлементы в южнотаежных ландшафтах Валдайской возвышенности // Геохимия ландшафта и практика народного хозяйства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 57–93.
- Побединцева И.Г., Дианова Т.М. Тяжелые металлы в широкотравяных лесах заповедника «Тюльские засеки» // Тяжелые металлы в природных и техногенных ландшафтах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. С. 46–62.

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

Семенов И.Н., Асеева Е.Н., Терская Е.В. Геохимическая структура лесостепных катен балочного водосбора в бассейне р. Упа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 6. С. 68–75.

Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Радиальная геохимическая структура почв лесостепных суглинистых катен балочного водосбора в центре Среднерусской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 5. С. 42–53.

Семенов И.Н., Мирошников А.Ю., Усачева А.А. Распределение цезия-137 глобальных выпадений в таежных и тундровых катенах бассейна реки Обь // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 2. С. 154–173.

Снытко В.А. Геохимические исследования метаболизма в геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 150 с.

Тонконогов В.Д. Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М.: Изд. Почвенного института имени В.В. Докучаева, 2010. 304 с.

Щеглов Д.И., Горбунова Н.С., Семенова Л.А., Хатунцева О.А. Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной степи различной степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 3. С. 282–290.

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

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

Reimann C., Birke M., Demetriades A. et al. Chemistry of Europe's Agricultural Soils. Pt. A. Hannover: BGR, 2014. Data DVD.

Поступила в редакцию 11.03.2016
Принята к публикации 18.03.2016

I.N. Semenov¹, N.S. Kasimov², E.V. Terskaya³

LATERAL DISTRIBUTION OF METAL FORMS IN TUNDRA, TAIGA AND FOREST STEPPE CATENAE OF THE EAST EUROPEAN PLAIN

To evaluate the metal migration pathways, we investigated the lateral distribution of exchangeable, organic matter bounded, Fe and Mn oxide fractions of metals, as well as the total content of Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, Zn in a model loamy catenae of the southern Bol'shezemel'skaya tundra, southwestern Mezen'-Vychegda Plain, and Plavsk Plateau. Soils were shown to be depleted in Fe, Sr, and Mn, whereas other metals have close to clark concentrations. In the succession of catenae tundra-taiga-forest steppe, the total concentration of Pb decreases, as do the total concentrations of exchangeable compounds of Fe, Cu, Zn and Fe oxide fractions of metals. Contrary, the total content of Fe, Ni, Zn, Cu, Mn, organic matter bounded Pb, Ni, Co and Zn increase. The lateral distribution of metal forms becomes more even in the direction from tundra to taiga, and further to forest steppe catenae.

Keywords: catena, catchment, lateral distribution, mobility of metals, gley soils, cryometamorphic soils, sod-podzolic soils, chernozem, East European Plain.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project N 14-05-00222). We are thankful to N.N. Ivanova, V.V. Kaganov, D.V. Karelin, A.V. Pochikalov, M.P. Tentyukov for their assistance in data collection.

REFERENCES

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

Budanceva N.A., Gorshkov E.I., Isaev V.S. i dr. Inzhenerno-geologicheskie i geohimicheskie osobennosti bugristyh landshaftov v rajone uchebno-nauchnogo poligona «Hanovej» [Engineering-geological and geochemical features of palsa and litala landscapes in the area of the Khanovey science education station], Inzhenernaja geologija, 2015, no 3, pp. 4–20 (in Russian).

Geochemical Atlas of Europe. Pt. 1. Background information, methodology and maps. Espoo, Geol. Surv. of Finland, 2005, 526 p.

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

Kanev V.V. Dinamika sodержanija kislotorastvorimyh soedinenij zheleza v dernovo-podzolistyh pochvah juzhnoj chasti respubliki Komi [Dynamics of acid-soluble iron compounds in soddy-podzolic soils of the Southern Komi Republic], Pochvovedenie, 2011, no 11, pp. 1312–1326 (in Russian).

Kasimov N.S., Samonova O.A., Aseeva E.N. Fonovaja pochvenno-geohimicheskaja struktura lesostepi Privolzhskoj vozvyshehnosti [Background soil-geochemical structure of Privolzhskaya Upland forest-steppe], Pochvovedenie, 1992, no 8, pp. 5–22 (in Russian).

Kasimov N.S., Samonova O.A., Kosheleva N.E. Fonovaja geohimicheskaja differenciacija landshaftov smeshannyh lesov centra Russkoj ravniny [Background geochemical differentiation of mixed forests in the Central Russian Upland], Geografija i okruzhajushhaja sreda, Sankt-Peterburg, Nauka, 2003, pp. 261–277 (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Junior Research Scientist; e-mail: semenkov@igem.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Faculty President, Academician RAS, 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

Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia], Smolensk, Ojkumena, 2004, 342 p. (in Russian).

Kovda V.A., Jakushevskaja I.V., Tjurjukhanov A.N. Mikrojelementy v pochvah Sovetskogo sojuza [Microelements in soils of the Soviet Union], Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1959, 67 p. (in Russian).

Landsaftno-geohimicheskie osnovy fonovogo monitoringa prirodnoj sredy [Landscape-geochemical basis of environmental impact assessment], Moscow, Nauka, 1989, 264 p. (in Russian).

Mikrojelementy v pochvah Sovetskogo Sojuza [Trace elements in soils of the USSR], vyp. 1, 1973, 282 p. (in Russian).

Mikrojelementy v pochvah SSSR [Trace elements in soils of the USSR], Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1981, 252 p. (in Russian).

Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. Sostav i soedinenija tjazhelyh metallov v pochvah [Composition and compounds of heavy metals in soils], Rostov-na-Donu, Jeverest, 2009, 208 p. (in Russian).

Moskovchenko D.V. Neftegazodobycha i okruzhajushhaja sreda: jekologo-geohimicheskij analiz Tjumenskoj oblasti [Oil-and-gas-field operation and environment: eco-geochemical analysis in Tumenskaya oblast'], Novosibirsk, Nauka, 1998, 112 p. (in Russian).

Nikiforova E.M. Mikrojelementy v juzhnotaezhnyh landsaftah Valdajskoj vozvyshehnosti // Geohimija landsafta i praktika narodnogo hozjajstva [Microelements in the south taiga landscapes in the Valday Hills], Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1979, pp. 57–93 (in Russian).

Pobedinceva I.G., Dianova T.M. Tjazhelye metally v shirokolistvennyh lesah zapovednika «Tul'skie zaseki» [Heavy metals in the broad-leaves forests in the reserve «Tul'skie zaseki»], Tjazhelye metally v prirodnyh i tehnogennyh landsaftah. Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1983, pp. 46–62 (in Russian).

Reimann C., Birke M., Demetriades A. et al. Chemistry of Europe's agricultural soils. Pt. A. Hannover: BGR, 2014. Data DVD.

Samsonova V.P. Prostranstvennaja izmenchivost' pochvennyh svojstv na primere dernovo-podzolistykh pochv [Spatial variability

of soil conditions on the example of soddy-podzolic soils], Moscow, LK, 2008, 160 p. (in Russian).

Semenkov I.N., Aseeva E.N., Terskaja E.V. Geohimicheskaja struktura lesostepnyh katen balochnogo vodosbora v bassejne r. Upa [Geochemical structure of forest-steppe catenas of a balka drainage area in the Upa River basin], Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5, Geografija, 2013, no 6, pp. 68–75 (in Russian).

Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaja E.V. Radial'naja geohimicheskaja struktura pochv lesostepnyh suglinistykh katen balochnogo vodosbora v centre Srednerusskoj vozvyshehnosti [Radial geochemical structure of loamy soils of forest-steppe catenas of the beam catchment area in the centre of Central Russian Upland], Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, Geografija, 2015, no 5, pp. 42–53 (in Russian).

Semenkov I.N., Miroshnikov A.Ju., Usacheva A.A. Raspredelenie cezija-137 global'nyh vypadenij v taezhnyh i tundrovnyh katenah bassejna reki Ob' [Distribution of global fallouts cesium-137 in taiga and tundra catenae at the Ob river basin], Geologija rudnyh mestorozhdenij, 2015, vol. 57, no 2, pp. 154–173 (in Russian).

Shheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Hatunceva O.A. Mikrojelementy v pochvah sopryazhennykh landsaftov Kamennoj stepi razlichnoj stepeni gidromorfizma [Microelements in soils of conjugated landscapes with different degrees of hydromorphism in the Kamennaya steppe], Pochvovedenie, 2013, no 3, pp. 282–290 (in Russian).

Snytko V.A. Geohimicheskie issledovanija metabolizma v geosistemah [Geochemical studies of metabolism in geosystems], Novosibirsk, Nauka, 1978, 150 p. (in Russian).

Tonkonogov V.D. Avtomorfnoe pochvoobrazovanie v tundrovoj i taezhnoj zonah Vostochno-Evropejskoj i Zapadno-Sibirskoj ravnin [Automorphous soil-forming in tundra and taiga in the East European and West Siberian Plains], Moscow, Pochvennyj institut imeni V.V. Dokuchaeva, 2010, 304 p. (in Russian).

Vinogradov A.P. Srednee sodержanie himicheskikh jelementov v glavnyh tipah izverzhennykh porod zemnoj kory [Average concentration of chemical elements in main types of abyssal rocks in Earth crust], Geohimija, 1962, no 7, pp. 555–571 (in Russian).

Received 11.03.2016

Accepted 18.03.2016