

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 550.424.4; 631.416.9

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

РАДИАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНЫХ СУГЛИНИСТЫХ КАТЕН БАЛОЧНОГО ВОДОСБОРА В ЦЕНТРЕ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Для почв черноземно-овражно-балочных катен в центре Среднерусской возвышенности с доминированием (%) крупной пыли (50–60), содержанием илистой фракции 4–9, гумуса 4–6 и pH 5–6 установлено типичное для черноземов валовое содержание (мг/кг) Fe ($2,9 \pm 0,8$), Mn (573 ± 37), Sr (127 ± 11), Cr (89 ± 3), Zn (70 ± 3), Ni (53 ± 3), Cu (45 ± 3), Co (20 ± 2), Pb (10 ± 4). Содержание обменных, органоминеральных и специфически сорбированных гидроксидами Fe и Mn соединений металлов соответствует уровням, типичным для черноземов России. Суммарная доля подвижных соединений (% от валового содержания) составляет: Mn 30–90, Pb 10–100, Co 10–30, Ni 10–25, Sr 5–25, Cu 7–20, Zn 5–15, Fe 2–4, Cr 0,5–2,0.

В профиле выщелоченных и оподзоленных черноземов содержание Fe, Cr, Ni, Zn, Co, Cu, Pb и Sr преимущественно равномерное, Ca и Mg – увеличивается с глубиной, Mn – уменьшается. Лугово-черноземные почвы (стратоземы) не дифференцированы по валовому содержанию металлов. Органоминеральные соединения металлов накапливаются в верхней части черноземов, однородно распределяясь в лугово-черноземных почвах. Обменные и специфически сорбированные соединения металлов не имеют доминирующего типа распределения. Контрастность распределения металлов уменьшается в почвенном профиле от выщелоченных черноземов к оподзоленным черноземам и лугово-черноземным почвам. Содержание Mn и Fe – основной фактор, контролирующий распределение металлов в почвах.

Ключевые слова: микроэлементы, чернозем, катена, водосбор, радиальное распределение, подвижные формы, Среднерусская возвышенность.

Введение. Анализ радиального и латерального распределения валовых и подвижных форм металлов в почвах, а также определяющих их факторов – основополагающая часть мониторинга состояния окружающей среды [Ландшафтно-геохимические..., 1989]. Формы металлов определяют путем перевода в раствор соединений, которые отличаются типом связи от соединений, оставшихся в твердой фазе, – чем больше доля переходящего в вытяжку металла от валового содержания, тем больше его подвижность. Изучение поведения форм нахождения элементов в почвенных профилях и катенах имеет фундаментальное значение.

Фоновая радиальная и латеральная геохимическая структура лесостепных ландшафтов России изучена достаточно детально: установлены уровни содержания, региональные кларки, закономерности радиального и латерального распределения в почвах валовых и подвижных форм элементов, выполнено биогеохимическое районирование [Аникина и др., 1977; Побединцева, Дианова, 1979; Ильин, Сысо, 2001, Ильин и др., 2003; Протасова, Щербаков, 2003; Сысо, 2004]. В суглинистых черноземных катенах

балочных водосборов в центре Среднерусской возвышенности изучено латеральное распределение гранулометрических фракций, гумуса, актуальной кислотности, валовых, обменных, органоминеральных и специфически сорбированных гидроксидами Fe и Mn форм металлов [Семенков и др., 2013; Самонова и др., 2015]. В обыкновенных черноземах и лугово-черноземных почвах глинистой черноземно-овражно-балочной катены Каменной степи исследовано влияние гидроморфизма на распределение валовых, обменных и специфически сорбированных форм Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb и Cd [Щеглов и др., 2013]. В лесостепных катенах Северного Казахстана и Приволжской возвышенности установлены уровни содержания элементов в основных типах почв, доминирование поверхностно-аккумулятивного распределения металлов в черноземах и элювиального в дерново-подзолистых и серых лесных почвах, повышенная контрастность латерального распределения анионогенных элементов в степных катенах, а катионогенных в лесных; конвергенция микроэлементного состава гумусовых горизонтов почв на различных почвообразующих породах за счет биоген-

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, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв; 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

ной аккумуляции [Касимов, Самонова, 1989; Касимов и др., 1992; Прохорова и др., 1998]. Радиальная геохимическая структура форм нахождения металлов в каскадных ландшафтно-геохимических системах и факторы, влияющие на нее, изучены слабо, особенно баланс основных форм соединений металлов и их связи с физико-химическими свойствами почв.

Цель работы – изучение распределения форм металлов в выщелоченных и оподзоленных (глинисто-иллювиальных) черноземах и лугово-черноземных почвах (стратоземах) черноземно-овражно-балочной катены в центре Среднерусской возвышенности.

Материалы и методы исследований. В центре Среднерусской возвышенности на месте восточно-европейских широколиственных лесов и разнотравно-ковыльных степей развиты преимущественно агроландшафты с сильнорасчлененным долинно-балочным и овражно-балочным рельефом. Детальные почвенно-геохимические исследования проведены на водосборе балки, расположенном в 70 км на юг от г. Тула, на левобережье р. Плага – левого притока р. Упа, типичном для рассматриваемой территории [Belyaev et al., 2012]. По классификации Н.С. Касимова и О.А. Самоновой [2004] изученная катена является лесостепной автохтонной монокатной суглинистой водно-поверхностно-почвенной с луговыми окислительными слабокислыми монотонно-сопряженными ландшафтами со слабой степенью геохимической дифференциации.

На междуречье водосбора и склонах развиты выщелоченные черноземы под сорнотравным лугом или агроценозом (рис. 1, разрезы 1 и 2) на лёссовидных покровных суглинках с системой горизонтов PU–AU–BCAmc–Cca по [Классификация..., 2004]. В составе гумусового горизонта выделены агротемно-гумусовый (PU) и темно-гумусовый (AU) подгоризонты суммарной мощностью 40–50 см темно-серого цвета с буроватым оттенком и комковато-зернистой структурой. Ниже расположен бурый аккумулятивно-карбонатный горизонт (BCAmc) с многочисленными включениями псевдомицелия и неясно выраженной ореховато-призматической структурой.

Трансэлювиальные позиции склонов водосбора заняты оподзоленными черноземами под репешково-овсянницево-мятликовым (*Agrimynia eupatyrja* – *Festuca pratensis* – *Poa pratensis*), сорнотравным лугом или пашней (разрезы 3–6) на лёссовидных покровных суглинках с набором горизонтов AU (PU или PB)–BI–BCAmc–Cca. В оподзоленных черноземах мощность гумусового профиля (PU+AU до 50–70 см, AUBI – до 30 см) и выщелоченного от карбонатов (~1 м) больше, чем в выщелоченных. На наиболее крутых распаханых склонах из-за эрозии и подпахивания срединного горизонта сформировался агроабразийный горизонт PB светло-серого с буроватостью цвета и неясноореховатой структурой (разрез 6).

Днище балки занято лугово-черноземными почвами, распаханymi в верхней части тальвега, под злаково-разнотравным лугом в средней и нижней частях (разрезы 7–9). Гумусовый профиль почв об-

разован наносами мощностью ~2 м в центральной части тальвега балки, перемещенными с междуречья и склонов за счет эрозии [Belyaev et al., 2012]. Система горизонтов RU–D указывает на их принадлежность к темногумусовым стратоземам. В средней части профиля этих почв прослеживаются полосы опесчаненного тяжелосуглинистого материала с повышенным содержанием песчаных фракций.

В пределах водосбора изучены ландшафтно-геохимические профили – продольный от водораздела вдоль тальвега балки и поперечный от водораздела правого борта балки к ее тальвегу. В основных элементарных ландшафтах заложено 9 почвенных разрезов, 7 точек поверхностного опробования и отобрано 57 проб почв.

Содержание гумуса и величина pH водной суспензии определены по стандартной методике [Аринушкина, 1962], гранулометрический состав – на лазерном гранулометре «Analizeter-22»; валовое содержание металлов – рентген-флуоресцентным методом на приборе «Спектроскан Макс GV» в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Непрочно связанные соединения Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Zn, Cu, Cr и Sr экстрагировали в течение 18 ч тремя параллельными вытяжками: 1 н. HNO₃ (соотношение почва:раствор=1:10), ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8 (1:5) и его раствором с 1%-ной ЭДТА (1:5). Обменные соединения металлов извлекали ацетатно-аммонийным буфером. Содержание органоминеральных соединений рассчитано по разнице концентрации элементов в вытяжках ацетатно-аммонийного буфера с этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА) и чистого буфера, а специфически сорбированных гидроксидами Fe и Mn – в азотнокислой и ацетатно-аммонийной вытяжках [Минкина и др., 2009]. Содержание металлов в экстрактах определено атомно-абсорбционным методом на спектрофотометрах «Hitachi 180/70» и «AA-240Z» фирмы «Varian Inc.» (аналитики Т.Г. Сухова, Е.А. Шахпендерян и Е.В. Терская).

Контрастность распределения металлов в профиле почв оценивали по коэффициенту радиальной дифференциации (R) – отношению содержания металла в верхних горизонтах к его содержанию в почвообразующей породе. Содержание металлов, монотонно уменьшающееся с глубиной, соответствует поверхностно-аккумулятивному распределению, увеличивающееся – регрессивному. При наличии максимумов и минимумов содержания металлов в средней части почв распределение считается элювиально-иллювиальным. Сохранение радиального распределения металлов в одном типе почв соответствует стабильной дифференциации, в отличие от изменчивой дифференциации, при которой в разрезах одного типа почв наблюдается разное распределение, например регрессивное и поверхностно-аккумулятивное. Однородное или неконтрастное радиальное распределение соответствует значениям $R=0,8\div1,3$; контрастное – $R=0,5\div0,8$ и $R=1,3\div2,0$; очень контрастное – $R<0,5$ и $R>2,0$. Контрастность распределения металлов в гумусовом

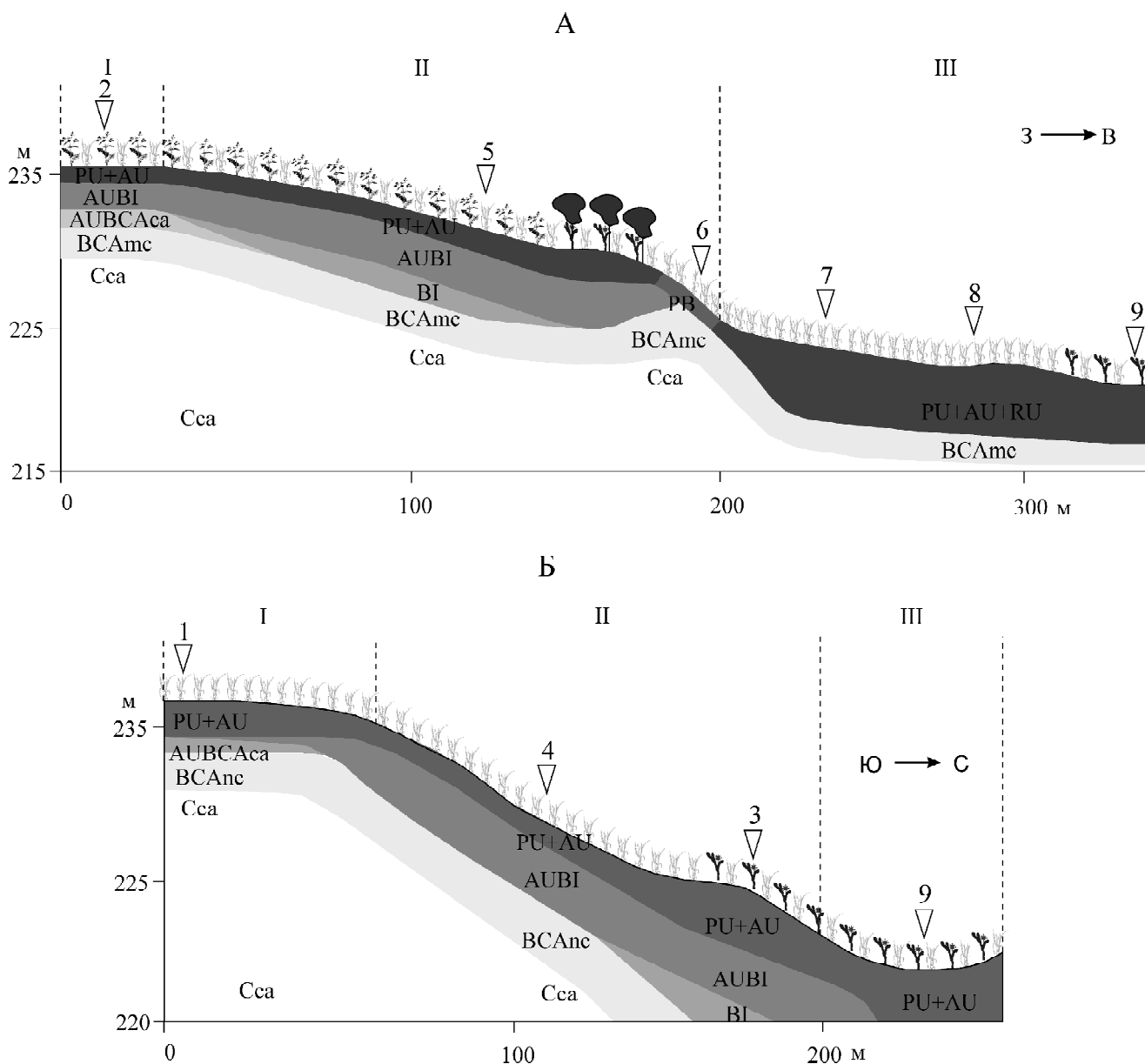


Рис. 1. Катены балочного водосбора: А – поперечная по правому борту, Б – продольная. Элементарные ландшафты: I – автономный выровненной поверхности междуречья с сорнотравным лугом залежи и агроценозом на выщелоченном тяжелосуглинистом черноземе, II – трансэлювиальный склонов балки с сорнотравным залежным лугом, разнотравно-злаковым лугом, лесополосой из дуба черешчатого и агроценозом на оподзоленном тяжелосуглинистом черноземе, III – трансэлювиально-аккумулятивный днища балки с агроценозом и разнотравно-злаковым лугом на тяжелосуглинистых лугово-черноземных почвах (стратоземах водно-аккумулятивных). Почвенные горизонты: AU – темного гумусовый; PU – агро-темного гумусовый; RU – стратифицированный темного гумусовый; PB – агроабразионный; AUBCaca – переходный от темного гумусового к аккумулятивно-карбонатному, вскипающий от 10% HCl; AUBI – переходный от темно-гумусового к глинисто-иллювиальному; BCAmc – аккумулятивно-карбонатный с псевдомикцелием; BI – глинисто-иллювиальный. Цифры – места и номера почвенных разрезов. Мощность почвенных горизонтов вне масштаба

горизонте почв катен оценивалась с помощью значений *коэффициента латеральной дифференциации* (L) – отношения содержания металла в гумусовом горизонте почв подчиненного ландшафта к его содержанию в автономном. Связи между физико-химическими свойствами почв и содержанием металлов оценивали на основе данных корреляционного и факторного анализов.

Результаты исследований и их обсуждение. В гранулометрическом составе черноземов на лёссовидных суглинках Среднерусской возвышенности

доминирует пылеватая фракция [Афанасьева, 1966]. Черноземы и лугово-черноземные почвы изученного балочного водосбора однородны по гранулометрическому составу (%): илстая фракция 4–9, мелкая пыль 19–30, средняя пыль 14–17, крупная пыль 47–61, мелкий песок 0–8, средний и крупный песок 0–2 (таблица). Все фракции распределены равномерно в черноземах и лугово-черноземных почвах. Выщелоченные и оподзоленные черноземы содержат в верхней части профиля (гумусовый горизонт) 5,0% гумуса и имеют слабокислую (pH 5,2–5,9) ре-

Среднее содержание гранулометрических фракций, гумуса (%), металлов (мг/кг) и pH в почвах черноземно-овражно-балочной катены

Свойства почв, металлы		Выщелоченные черноземы			Оподзоленные черноземы			Лугово-черноземные почвы	
		PU	AUBCA	BCA	PU+AU	AUBI	BI	AU	RU
Фракция	I	0,02(6)	0,48(2)	0(2)	0,01(10)	0,01(16)	0(5)	0(9)	0,07(5)
	II	0,73(6)	0,35(2)	0,49(2)	0,64(10)	0,64(16)	0,2(5)	0,98(9)	0,65(5)
	III	53(6)	58(2)	59(2)	54(10)	54(16)	58(5)	52(9)	55(5)
	IV	15(6)	15(2)	15(2)	16(10)	16(16)	15(5)	15(9)	15(5)
	V	25(6)	20(2)	20(2)	24(10)	24(16)	21(5)	24(9)	24(5)
	VI	5,6(6)	5,8(2)	5,2(2)	5,5(10)	5,5(16)	5,8(5)	6,1(9)	5,7(5)
Гумус		5,24	2(2)	1,1(3)	5,11(2)	5,1(16)	2,2(6)	4,4(9)	3,8(9)
pH		5,5(6)	6,3(2)	7,6(3)	5,61(3)	5,6(19)	5,8(5)	5,5(14)	5,5(9)
Fe	1	1,5(6)	1,9(2)	10,3(3)	1,11(3)	1,2(19)	1,6(6)	1,5(14)	2(9)
	2	343(6)	183(2)	128(3)	306(12)	32318	240(6)	372(12)	406(9)
	3	456(4)	607(2)	795(3)	427(12)	428(16)	577(6)	464(12)	501(9)
	4	28147(4)	29930(2)	27095(3)	28068(9)	281371(3)	29970(6)	28151	27177(9)
	5	29419(6)	30721(2)	27759(3)	28796(11)	28828(17)	30856(6)	29069(14)	28047(9)
Mn	1	15(6)	6(2)	21(3)	151(3)	15(19)	7(6)	19(14)	21(9)
	2	211(6)	138(2)	170(3)	203(12)	20318	176(6)	248(12)	268(9)
	3	144(4)	74(2)	98(3)	146(12)	146(16)	68(6)	169(12)	153(9)
	4	217(4)	298(2)	153(3)	199(9)	2081(3)	270(6)	146(10)	128(9)
	5	575(6)	516(2)	447(3)	557(11)	565(17)	508(6)	581(14)	573(9)
Sr	1	9(6)	8,3(2)	35(3)	7,91(3)	8,4(19)	5,9(6)	7,6(14)	8,1(9)
	3	3,9(4)	0,2(2)	3,4(3)	4,6(12)	4,6(16)	0,4(6)	4,8(12)	2,4(9)
	4	118(4)	119(2)	135(3)	112(9)	1151(3)	119(6)	118(10)	120(9)
	5	130(6)	124(2)	171(3)	125(11)	126(17)	125(6)	127(14)	127(9)
Cd	1	0,03(6)	0,02(2)	0,03(3)	0,031(3)	0,03(19)	0,02(6)	0,04(14)	0,03(9)
Co	1	0,08(6)	0,04(2)	0(3)	0,081(3)	0,08(19)	0,04(6)	0,09(14)	0,09(9)
	2	2,2(6)	2,2(2)	2,1(3)	1,9(12)	2.018	1,6(6)	2,3(12)	2,7(9)
	3	2(4)	1,3(2)	1,4(3)	1,7(12)	1,7(16)	1(6)	2,1(12)	1,7(9)
	4	14(4)	21(2)	23(3)	15(9)	14(13)	20(6)	15(10)	15(9)
	5	19(6)	24(2)	25(3)	18(11)	18(17)	23(6)	20(14)	19(9)
Cr	1	0,17(6)	0,19(2)	0,22(3)	0,141(3)	0,15(19)	0,21(6)	0,17(14)	0,16(9)
	2	0,15(6)	0,09(2)	0,03(3)	0,3(12)	0,21(18)	0,28(6)	0,12(12)	0,14(9)
	3	0,62(4)	0,81(2)	0,69(3)	0,55(12)	0,57(16)	0,6(6)	0,51(12)	0,54(9)
	4	87(4)	97(2)	89(3)	89(9)	891(3)	94(6)	88(10)	88(9)
	5	89(6)	98(2)	91(3)	90(11)	90(17)	94(6)	90(14)	89(9)
Cu	1	0,1(6)	0,09(2)	0,17(3)	0,11(3)	0,11(19)	0,09(6)	0,11(14)	0,1(9)
	2	2,6(6)	1,7(2)	1,5(3)	2,5(12)	2,5(18)	1,8(6)	2,5(12)	2,6(9)
	3	3,5(4)	3,7(2)	4,2(3)	3,5(12)	3,5(16)	1,9(6)	3,2(12)	4,3(9)
	4	38(4)	44(2)	49(3)	40(9)	381(3)	45(6)	39(10)	39(9)
	5	45(6)	49(2)	55(3)	43(11)	44(17)	48(6)	45(14)	47(9)

Окончание табл.

Ni	1	0,15(6)	0,12(2)	0,12(3)	0,141(3)	0,15(19)	0,19(6)	0,18(14)	0,17(9)
	2	3,8(6)	2,7(2)	2,4(3)	4,0(12)	3,9(18)	3,4(6)	4(12)	4,3(9)
	3	5,8(4)	3,7(2)	2,9(3)	4,6(12)	5,2(16)	3,8(6)	5,2(12)	5,8(9)
	4	41(4)	49(2)	46(3)	44(9)	431(3)	46(6)	44(10)	43(9)
	5	52(6)	56(2)	51(3)	53(11)	52(17)	54(6)	54(14)	53(9)
Pb	1	0,2(6)	0,4(2)	0,5(3)	0,21(3)	0,2(19)	0,2(6)	0,2(14)	0,2(9)
	2	3,2(6)	0,8(2)	1(3)	3,1(12)	3,1(18)	1,5(6)	3,3(12)	3(9)
	3	1(4)	0,5(2)	1,9(3)	1,4(12)	1(16)	1,7(6)	2,4(12)	1,4(9)
	4	5,4(4)	12,1(2)	2,4(3)	1,9(9)	4,2(13)	8,8(6)	6,1(10)	7,6(9)
	5	9,3(6)	13,8(2)	7,1(3)	5,4(11)	7,7(17)	12,3(6)	12,7(14)	11,5(9)
Zn	1	0,02(6)	0,06(2)	0,01(3)	0,05(13)	0,04(19)	0,03(6)	0,07(14)	0,05(9)
	2	1,2(6)	0,3(2)	0,3(3)	1,3(12)	1,2(18)	0,5(6)	2(12)	1,6(9)
	3	4,3(4)	2,4(2)	7,3(3)	3,1(12)	3,2(16)	2,6(6)	4,3(12)	3,9(9)
	4	65(4)	62(2)	56(3)	64(9)	64(13)	62(6)	62(10)	62(9)
	5	71(6)	65(2)	65(3)	70(11)	70(17)	65(6)	70(14)	68(9)

Примечания. Гранулометрические фракции: I – крупно- и среднеспесчаная, II – мелкопесчаная, III – крупнопылевая, IV – среднеспылевая, V – мелкопылевая, VI – илстая. Формы нахождения элементов: 1 – обменная, 2 – органоминеральная, 3 – специфически сорбированная гидроксидами Fe и Mn, 4 – силикатная, 5 – валовое содержание. Буквенные обозначения почвенных горизонтов см. на рис. 1. В скобках – число проб для осреднения.

акцию среды, возрастающую в его нижней части (рН 6,0–7,2) (горизонты VI и BC_{амс}). В лугово-черноземных почвах днища балки содержание гумуса и рН в верхней метровой толще варьируют в пределах 4–6 и 5–6% соответственно. В черноземах и лугово-черноземных почвах между величиной рН и содержанием гумуса существует обратная связь (значение коэффициента корреляции составляет –0,55).

Валовое содержание металлов в почвах балочного водосбора незначительно отличается от литературных данных о черноземах России и лёссовидных карбонатных суглинках [Аникина и др., 1977; Ландшафтно-геохимические..., 1989; Касимов и др., 1989, 1992; Прохорова и др., 1998; Ахтырцев и др., 1999; Ильин и др., 2003; Протасова, Щербаков, 2003; Сысо, 2004; Протасова, Горбунова, 2006; Горбунова, Протасова, 2006, 2008; Kabata-Pendias, 2011; Щеглов и др., 2013; Самонова и др., 2015]. В гумусовом горизонте изученных выщелоченных и оподзоленных черноземов и лугово-черноземных почв содержится (%) Fe 2,9±0,8, а также (мг/кг) Mn 573±37, Sr 127±11, Cr 89±3, Zn 70±3, Ni 53±3, Cu 45±3, Co 20±2, Pb 10±4 [Семенков и др., 2013]. Содержание обменных и специфически сорбированных соединений металлов близко к средним значениям для черноземов на лёссовидных суглинках [Гамзиков, 1971; Микроэлементы..., 1981; Сеничкина, Абашева, 1986; Lavado, Porcelli, 2000; Podlesakova et al., 2001; Мажайский, 2003; Переломов, Пинский, 2003; Липатов, Вержливцева, 2006; Горбунова, Протасова, 2006, 2008; Протасова, Горбунова, 2006; Азаренко, 2013]. Органоминеральные соединения металлов в черноземах фоновых ландшафтов практичес-

ки не изучены. Нами уровень содержания металлов в почвах детально не рассмотрен из-за особенного внимания к радиальной структуре распределения металлов.

По подвижности металлы образуют три группы (рис. 2): очень подвижные (Mn 30–90, Pb 10–95), подвижные (Co 10–30, Ni 10–25, Sr 5–25, Cu 7–20, Zn 5–15) и слабоподвижные (Fe 2–4, Cr 0,5–2,0). Как и для латеральной почвенно-геохимической структуры [Семенков и др., 2013], по соотношению подвижных форм в почвах выделены 3 группы элементов: с доминированием обменных соединений (Sr), органоминеральных (Mn, Pb и Co), а также с большой ролью специфически сорбированных соединений (Fe, Ni, Cu, Zn и Cr).

Радиальное распределение металлов в катенах.

По контрастности радиального распределения металлов почвы катен делятся на 2 группы – черноземы и лугово-черноземные.

Выщелоченные и оподзоленные черноземы. В профиле выщелоченных и оподзоленных черноземов выделяются две части: верхняя (гумусовый горизонт) – слабокислая, богатая органическим веществом и нижняя – нейтральная и слабощелочная с низким содержанием гумуса, что определяет контрастность радиальной дифференциации металлов. Валовое содержание Ca и Mg увеличивается в карбонатных горизонтах в 1,5–2,0 раза; Fe, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, Sr и Zn – остается постоянным. Марганец, как биофильный элемент, характеризуется поверхностно-аккумулятивным распределением в выщелоченных черноземах и равномерным в оподзоленных черноземах за счет повышенной латеральной

миграции [Семенков и др., 2013]. В изученных черноземах в центре Среднерусской возвышенности Mn, Ni, Cu и Co распределены равномерно. В ее южной части они аккумулируются в верхней части профиля почв из-за накопления гумуса и ослабления элювиирования [Протасова, Щербаков, 2003].

Обменные соединения Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr в изученных выщелоченных и оподзоленных черноземах накапливаются с глубиной, что для Mn, Cr и Ni установлено ранее в обыкновенных черноземах Каменной степи [Щеглов и др., 2013]. Для Fe, Sr, Ni и Cr это связано с осаждением на щелочном геохимическом барьере в горизонте ВСА черноземов за счет накопления их водорастворимых гидроксидов и карбонатов, что подтверждается наличием положительной связи с величиной pH. В изученных выщелоченных черноземах содержание обменных соединений Fe и Sr увеличивается в 2–10 раз с глубины 30–50 см при появлении псевдомицеллярных карбонатных новообразований (рис. 2). В оподзоленных черноземах склонов щелочной барьер появля-

ется на глубине 85 см из-за более глубокого залегания карбонатного горизонта.

В гумусовых горизонтах выщелоченных и оподзоленных черноземов накапливаются Co и Zn: Co слабоконтрастно ($R = 1,3 \div 2,0$) накапливается в черноземах на междуречьях и склонах; Zn – контрастно в выщелоченных и оподзоленных черноземах (5,0–50,0 и 1,3–10,0 соответственно). В выщелоченных черноземах Cd распределен равномерно и накапливается в гумусово-аккумулятивном горизонте оподзоленных черноземов. Медь характеризуется изменчивой дифференциацией из-за высокой вариабельности содержания.

Органоминеральные соединения всех металлов в большинстве изученных разрезов черноземов накапливаются в гумусовом горизонте, что отмечено для типичных черноземов заповедника Михайловская целина в Сумской области (Украина) [Касимов и др., 1989].

Специфически сорбированные соединения Fe, Cr, Pb и Zn концентрируются в изученных выщело-

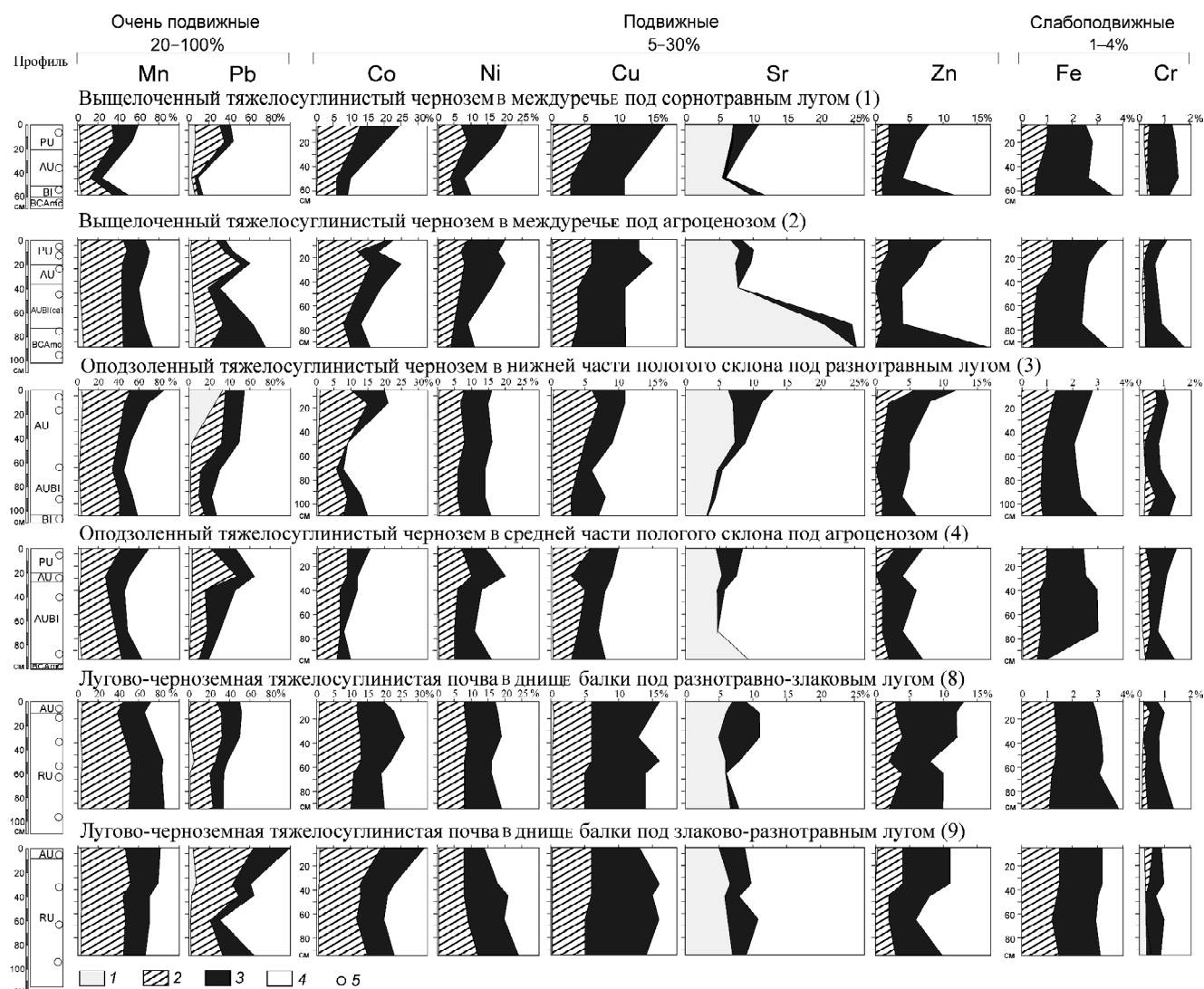


Рис. 2. Формы нахождения металлов в почвах лесостепной катены. Формы нахождения элементов: 1 – специфически сорбированная, 2 – органоминеральная, 3 – обменная, 4 – силикатная; для всех элементов суммарное содержание четырех форм составляет 100%. На графиках приводится только поле распределения подвижных (1–3) форм, оставшуюся часть баланса составляет силикатная форма (4); 5 – место отбора пробы. Буквенные обозначения почвенных горизонтов см. на рис. 1

ченных черноземах; содержание Mn, Ni, Sr, Cu и Co уменьшается с глубиной или остается неизменным; в оподзоленных черноземах радиальная дифференциация этих элементов изменчива. Отсутствие доминирующего типа радиального распределения этой формы металлов, по-видимому, свойственно черноземам Среднерусской возвышенности [Горбунова, Протасова, 2006; 2008; Протасова, Горбунова, 2006].

По мере увеличения глубины залегания карбонатного горизонта контрастность распределения металлов уменьшается от выщелоченных черноземов на междуречье к оподзоленным черноземам на склонах.

Лугово-черноземные почвы. Профиль изученных лугово-черноземных почв состоит из гумусированного материала, перемещенного со склонов и междуречья, что определяет преимущественно изменчивую дифференциацию валовых и подвижных форм металлов за счет их высокой вариабельности по почвенному профилю ($R = 0,6 \div 1,1$). Это связано с тем, что весь их почвенный профиль представлен однородным материалом из агротемногумусового горизонта выщелоченных и оподзоленных черноземов междуречья и склонов.

В лугово-черноземных осолоделых почвах Среднерусской возвышенности с более контрастной радиальной дифференциацией физико-химических свойств также наблюдалось относительно однородное распределение валового содержания Cu, Ni, Co, Cr и Zn. Только Mn и Pb накапливались ($R = 9 \div 10$) в гумусовом горизонте [Ахтырцев и др., 1999]. В лугово-черноземных почвах изученного балочного водосбора также выявлено контрастное распределение форм этих металлов. Органоминеральные и специфически сорбированные соединения Pb, а также специфически сорбированные соединения Mn накапливаются в поверхностных горизонтах ($R = 1,3 \div 2,0$) двух разрезов лугово-черноземных почв, а силикатного Mn – рассеиваются ($R = 0,4 \div 0,8$).

Слабая контрастность радиального распределения валового содержания металлов и их подвижных форм, по-видимому, – типичная черта лугово-черноземных почв Среднерусской возвышенности [Ахтырцев и др., 1999].

Изменение радиального распределения металлов в почвах катен. Контрастность радиального распределения форм металлов уменьшается в соответствии с изменениями физико-химических свойств от выщелоченных черноземов междуречья к оподзоленным черноземам склонов и лугово-черноземным почвам днища балки. Распределение обменных Cr, Ni, Pb, Fe и Sr изменяется в этом ряду с регрессивного на равномерное, а значения коэффициента R от $0,1 \div 0,5$ в гумусовом горизонте выщелоченных черноземов увеличиваются до $0,4 \div 0,6$ в оподзоленных черноземах и до $0,6 \div 1,1$ в лугово-черноземных почвах. Контрастность радиальной дифференциации уменьшается у органоминеральных соединений от черноземов к лугово-черноземным почвам с поверхностно-аккумулятивной на равномерную – значения R в гуму-

совом горизонте уменьшаются от $1,4-10,0$ до $0,7-1,5$. Специфически сорбированным соединениям металлов свойственна контрастная радиальная дифференциация (значения R варьируют преимущественно от $0,3$ до $2,0$ в гумусовом и срединном горизонтах) при отсутствии доминирующего типа радиального распределения.

В серых лесных почвах широколиственных лесов на севере Среднерусской возвышенности контрастность радиальной дифференциации металлов в катене также уменьшается за счет бокового внутрипочвенного стока и вертикальной дренированности от автономных ландшафтов к подчиненным [Побединцева, Гаврилова, 1989]. В изученных выщелоченных и оподзоленных черноземах и лугово-черноземных почвах в центре Среднерусской возвышенности, где процессы элювиирования ослаблены, а биогенная аккумуляция высока, доминирует равномерное латеральное распределение валовых и подвижных форм металлов за исключением соединений Pb, сорбированных гидроксидами Fe и Mn, а также обменных Zn, Co и Mn [Семенков и др., 2013]. В нейтральных и слабощелочных условиях луговых степей на юго-западе Среднерусской возвышенности содержание металлов максимально в горизонте AU (наиболее контрастное у Mn и Cu) и уменьшается с глубиной вследствие их активной аккумуляции на биогеохимическом барьере при очень слабом элювиировании [Побединцева, Дианова, 1979].

Таким образом, радиальная дифференциация валовых и подвижных форм металлов всегда контрастнее латеральной – значения R и L варьируют в пределах $0,1-10$ и $0,4-3,0$ соответственно [Семенков и др., 2013]. При регрессивном радиальном распределении металлов в черноземах ($R = 0,1 \div 0,8$ в гумусовом горизонте) и равномерном в лугово-черноземных почвах (обменные соединения Fe, Pb, Cr, Ni и Sr; специфически сорбированные Fe и Cr) наблюдается их равномерное латеральное распределение в гумусовых горизонтах почв катен ($L = 0,8 \div 1,2$), по-видимому, из-за выноса в нижнюю часть почвенного профиля или за пределы катен.

Подвижные Fe, Cr, Pb и Mn накапливаются в гумусовых (органогенные соединения) и карбонатных горизонтах (обменные соединения). Подвижность Cu, Co и Ni остается постоянной в черноземах и лугово-черноземных почвах, а Sr и Zn – увеличивается в карбонатном горизонте.

По данным регрессионного анализа (уровень значимости $\geq 0,01$) в изученных черноземах и лугово-черноземных почвах содержание обменных соединений большинства металлов (Co, Cu, Ni, Cd, Zn и Cr) зависит от содержания Fe и Mn, для Pb велика роль илистых и мелкопылеватых частиц, для Sr – величины pH. Содержание гумуса определяет распределение органоминеральных соединений Pb, Cu и Fe, что хорошо согласуется с высокой способностью этих металлов образовывать прочные органические комплексы [Filgueiras et al., 2002; Kabata-Pendias, 2011; Кропачева и др., 2015; Fan

et al., 2015]. В изученных почвах содержание органоминеральных соединений Co, Ni и Zn коррелирует с содержанием форм Fe и Mn, а марганца – с содержанием крупнопылевой фракции. Накопление специфически сорбированных соединений Mn, Pb, Co, Ni, Cu, Zn в изученных черноземах и лугово-черноземных почвах из центра Среднерусской возвышенности зависит от валового содержания макроэлементов (Fe и Mn) или подвижных форм Mn. Значимость влияния величины pH в изученных почвах установлена для специфически сорбированных Cr, Zn (положительная связь) и Fe (отрицательная связь), крупной пыли – для Sr и Ni (отрицательная связь), мелкой пыли – для Ni (отрицательная связь). В серых лесных, лугово-черноземных и луговых почвах, выщелоченных и оподзоленных черноземах Приволжской возвышенности содержание растворимых в 1н HCl форм Mn, Cr, Pb и Ni зависело от валового содержания соответствующего металла, гумуса и величины pH; Zn – только от двух последних факторов [Касимов и др., 1995]. Валовая, обменная и специфически сорбированные формы Fe и Mn оказывают большое влияние на содержание металлов в изученных черноземах и лугово-черноземных почвах. Из-за наличия обратной связи между содержанием гумуса и величиной pH не установлено взаимное влияние этих показателей на содержание подвижных форм металлов за исключением органоминеральных соединений Fe.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе почва – растение в условиях юга Западной Сибири. Омск: Вариант-Омск, 2013. 232 с.
- Аникина А.П., Бахнов В.К., Ильин В.Б. Закономерности распределения микроэлементов в почвенном покрове Западно-Сибирской равнины // Этюды по биогеохимии и агрохимии элементов-биофилов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 12–27.
- Афанасьева Е.Ф. Черноземы Среднерусской возвышенности. М.: Наука, 1966. 224 с.
- Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б., Яблонских Л.А. Тяжелые металлы и радионуклиды в гидроморфных почвах лесостепи Русской равнины и их профильное распределение // Почвоведение. 1999. № 4. С. 435–444.
- Гамзиков Г.П. Содержание микроэлементов в почвах Омской области // Микроэлементы в почвах, растительности и водах южной части Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1971. С. 38–54.
- Горбунова Н.С., Протасова Н.А. Особенности внутрипрофильной дифференциации содержания подвижных соединений никеля, свинца и кадмия в черноземах ЦЧР // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. Биология. Химия. Фармация. 2006. № 1. С. 109–115.
- Горбунова Н.С., Протасова Н.А. Формы соединений марганца, меди и цинка в черноземах Центрально-Черноземного региона // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2008. № 2. С. 77–85.
- Ильин В.Б., Сысо А.И. Почвенно-геохимические провинции в Обь-Иртышском междуречье: причины и следствия // Сибирский экол. журн. 2001. № 2. С. 111–118.
- Ильин В.Б., Сысо А.И., Байдина Н.Л. и др. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири // Почвоведение. 2003. № 5. С. 550–556.
- Касимов Н.С., Геннадиев А.Н., Лычагин М.Ю. Фоновая геохимическая дифференциация ландшафтов и мониторинг природной среды // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 5. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 162–179.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Самонова О.А. Подвижные формы тяжелых металлов в почвах лесостепи Среднего Поволжья (опыт многофакторного регрессионного анализа) // Почвоведение. 1995. № 6. С. 705–713.
- Касимов Н.С., Самонова О.А. Фоновая почвенно-геохимическая структура лесостепи Северного Казахстана // Почвоведение. 1989. № 4. С. 20–35.
- Касимов Н.С., Самонова О.А. Катенарная ландшафтно-геохимическая дифференциация // География, общество, окружающая среда. Т. 2. М.: Городец, 2004. С. 479–551.
- Касимов Н.С., Самонова О.А., Асеева Е.Н. Фоновая почвенно-геохимическая структура лесостепи Приволжской возвышенности // Почвоведение. 1992. № 8. С. 5–22.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Кропачева Т.Н., Дидик М.В., Корнев В.И. Моделирование влияния ЭДТА на сорбцию тяжелых металлов гумусовыми кислотами // Почвоведение. 2015. № 4. С. 424–428.
- Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. М.: Наука, 1989. 264 с.
- Липатова Д.Н., Вержливецкая Л.А. Содержание и распределение подвижных форм Cu, Zn, Co, Cd, Pb в почвах агролан-

Выводы:

– радиальная геохимическая структура выщелоченных и оподзоленных черноземов лесостепных катен определяется наличием биогеохимического и щелочного барьеров и их отсутствием в лугово-черноземных почвах;

– в выщелоченных и оподзоленных черноземах на щелочном барьере аккумулируются обменные и специфически сорбированные соединения Ni, Cu, Zn, Fe и Cr; на биогеохимическом – подвижные (обменные, органоминеральные и специфически сорбированные) соединения Mn, Co и Pb, а также органоминеральные формы Ni, Cu, Zn, Fe и Cr;

– для черноземов при равномерном распределении валового содержания металлов характерно регрессивное профильное распределение обменных Fe, Pb, Cr, Ni, Sr и специфически сорбированных соединений Fe и Cr, поверхностно-аккумулятивное обменных, органоминеральных и специфически сорбированных Mn, Co и Pb, а также органоминеральных форм Ni, Cu, Zn, Fe и Cr;

– равномерное распределение металлов в лугово-черноземных почвах определяется однородностью их физико-химических свойств и отсутствием радиальных геохимических барьеров.

– контрастность радиального распределения металлов уменьшается в ряду автономные выщелоченные черноземы → трансалювиальные оподзоленные черноземы → подчиненные лугово-черноземные почвы за счет выноса наиболее подвижных соединений.

дшафтов Тульской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2006. № 3. С. 34–42.

Мажайский Ю.А. Особенности распределения тяжелых металлов в профилях почв Рязанской области // Агрохимия. 2003. № 8. С. 74–79.

Микроэлементы в почвах СССР. М., 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.

Переломов Л.В., Пинский Д.Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2003. № 6. С. 682–691.

Побединцева И.Г., Гаврилова И.П. Широколиственные леса Среднерусской возвышенности // Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. М., 1989. С. 118–128.

Побединцева И.Г., Дианова Т.М. Геохимические особенности ландшафта луговой степи Пселско-Ворсклинского междуречья // Геохимия ландшафта и практика народного хозяйства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 96–119.

Протасова Н.А., Горбунова Н.С. Формы соединений никеля, свинца и кадмия в черноземах Центрально-Черноземного региона // Агрохимия. 2006. № 8. С. 68–76.

Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. 267 с.

Прохорова Н.В., Матвеев Н.М., Павловский В.А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 1998. 131 с.

Самонина О.А., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П. Металлы в почвах малого водосбора лесостепной зоны (Среднерусская лесостепь) // Почвоведение. 2015. № 6. С. 675–684.

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

Сеничкина М.Г., Абашева Н.Е. Микроэлементы в почвах Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 176 с.

Сысо А.И. Общие закономерности распределения микроэлементов в покровных отложениях и почвах Западной Сибири // Сибирский экол. журн. 2004. № 3. С. 273–287.

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.

Belyaev V., Shamshurina E., Markelov M. et al. Quantification of the sediment budget of a river basin, based on reconstruction of the post-fallout redistribution of Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs // Proceedings of a ICCE-IAHS symposium «Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment». Chengdu, CAS, 2012, pp. 394–403.

Fan T.-T., Wang Yu-J., Li Ch.-B. et al. Effects of Soil Organic Matter on Sorption of Metal Ions on Soil Clay Particles // Soil Sci. Soc. Amer. J., 2015. Vol. 79, pp. 794–802.

Filgueiras A.V., Lavilla I., Bendicho C. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples // J. Environm. Monitoring. 2002. Vol. 4, iss. 6, pp. 823–857.

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

Lavado R.S., Porcelli C.A. Contents and main fractions of trace elements in Typic Argiudolls of the Argentinean Pampas // Chem. Spec. and Bioavailability. 2000. Vol. 12, no 2, pp 67–70.

Podlesakova E., Nemek J., Vacha R. Mobility and bioavailability of trace elements in soils // Trace elements in soils. Bioavailability, flux, and transfer. L., N. Y., Washington: Lewis publishers, 2001, pp. 21–42.

Поступила в редакцию 08.09.2015

Принята к публикации 11.09.2015

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

VERTICAL GEOCHEMICAL STRUCTURE OF SOILS OF THE FOREST-STEPPE LOAMY CATENAS OF A BALKA WATER CATCHMENT AREA IN THE CENTRE OF THE SREDNERUSSKAYA UPLAND

Chernozem soils of gully-balka catenas in the centre of the Srednerusskaya Upland have the following parameters of the humus horizon: 50–60% of coarse silt, 4–9% of clay fraction, 4–6% of humus and pH 5–6. The soils showed typical total concentrations of Fe, Sr, Cr, Zn, Ni, Cu, Co and Pb. Concentrations of exchangeable and organo-mineral metal compounds, as well as those specifically absorbed by Fe and Mg hydroxides are in line with background values characteristic for Russian chernozems. Total amounts of mobile compounds as percentage of the total concentrations are 30–90 for Mn, 10–100 for Pb, 10–30 for Co, 10–25 for Ni, 5–25 for Sr, 7–20 for Cu, 5–15 for Zn, 2–4 for Fe and 0.5–2.0 for Cr. In leached and podzolic chernozems the concentrations of Fe, Cr, Ni, Zn, Co, Cu, Pb and Sr are mostly without variation; those of Ca and Mg increase and of Mn decrease down the soil profile. Total concentrations of metals show no differentiation in meadow chernozem soils. Organo-mineral metal compounds accumulate in the upper layers of chernozems and are evenly distributed in meadow chernozem soils. Exchangeable and specifically absorbed metal compounds have no predominant type of vertical distribution. The contrasts in metal distribution along the soil profile decrease from leached chernozems to podzolic chernozems and meadow chernozem soils. The main factor governing the vertical distribution of metals in soils is the concentration of Fe and Mn.

Keywords: trace elements, chernozem, catena, water catchment, vertical distribution, mobile forms, Srednerusskaya Upland.

Acknowledgement. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 14-27-00083).

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, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; e-mail: secretary@geogr.msu.ru

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

REFERENCES

- Afanas'eva E.F. Chernozemy Srednerusskoj vozvyshehnosti [Chernozems of Central Russian Upland], Moscow, Nauka, 1966. 224 p. (in Russian).
- Ahtyrcev B.P., Ahtyrcev A.B., Jablonskih L.A. Tjzhelye metally i radionuklidy v gidromorfnyh pochvah lesostepi Russkoj ravniny i ih profil'noe raspredelenie [Content and distribution of heavy metals and radionuclides in hidromorphic soils of the forest-steppe zone of the Russian plain], Pochvovedenie, 1999, no 4, pp. 435–444 (in Russian).
- Anikina A.P., Bahnov V.K., Il'in V.B. Zakonomernosti raspredelenija mikrojelementov v pochvennom pokrove Zapadno-Sibirskoj ravniny [Behavior of trace elements distribution in soil cover of Western Siberia], Jetjudy po biogeohimii i agrochimii jelementov-biofilov. Novosibirsk, Nauka, 1977, pp. 12–27 (in Russian).
- Azarenko Ju.A. Zakonomernosti sodержanija, raspredelenija, vzaimosvjazj mikrojelementov v sisteme pochva – rastenie v uslovijah juga Zapadnoj Sibiri [Content, distribution, relation of trace elements in soil – plant system, Western Siberia, Russia], Omsk: Variant-Omsk, 2013, 232 p. (in Russian).
- Belyaev V., Shamshurina E., Markelov M. et al. Quantification of the sediment budget of a river basin, based on reconstruction of the post-fallout redistribution of Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs // Proceedings of a ICCE-IAHS symposium «Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment». Chengdu, CAS, 2012, pp. 394–403.
- Fan T.-T., Wang Yu.-J., Li Ch.-B. et al. Effects of Soil Organic Matter on Sorption of Metal Ions on Soil Clay Particles // Soil Sci. Soc. Amer. J., 2015. Vol. 79, pp. 794–802.
- Filgueiras A.V., Lavilla I., Bendicho C. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples // J. Environm. Monitoring. 2002. Vol. 4, iss. 6, pp. 823–857.
- Gamzikov G.P. Soderzhanie mikrojelementov v pochvah Omskoj oblasti, Mikrojelementy v pochvah, rastitel'nosti i vodah juzhnoj chasti Zapadnoj Sibiri [Trace elements content in soils of the Omsk region, Russia], Novosibirsk: Nauka, 1971, pp. 38–54 (in Russian).
- Gorbunova N.S., Protasova N.A. Osobennosti vnutriprofil'noj differenciacii sodержanija podviznyh soedinenij nikelja, svinca i kadmija v chernozemah CChR [Peculiarities of vertical distribution of nickel, lead, and cadmium fractions in chernozems of the Central Chernozem region, Russia], Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Ser. Biologija. Himija. Farmacija, 2006, no 1, pp. 109–115 (in Russian).
- Gorbunova N.S., Protasova N.A. Formy soedinenij manganca, medi i cinka v chernozemah Central'no-Chernozemnogo regiona [Manganese, copper and zinc fractions in chernozems of the Central Chernozem region, Russia], Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Ser. Himija. Biologija. Farmacija, 2008, no 2, pp. 77–85 (in Russian).
- Il'in V.B., Syso A.I. Pochvenno-geohimicheskie provincii v Ob'-Irtyskom mezhdurech'e: prichiny i sledstvija [Pedogeochemical provinces in the Ob-Irtys interfluvial causes and consequences], Sibirskij jekologicheskij zhurnal, 2001, no 2, pp. 111–118 (in Russian).
- Il'in V.B., Syso A.I., Baidina N.L. et al. Background concentrations of heavy metals in soils of southern Western Siberia, Eurasian Soil Science, 2003, Vol. 36, no 5, pp. 494–500.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in soils and plants. L., N.Y.: CRC Press, 2011. 505 p.
- Kasimov N.S., Gennadiev A.N., Lychagin M.Ju. Fonovaja geohimicheskaja differenciacija landshaftov i monitoring prirodnoj sredy [Geochemical structure of background landscapes and environmental impact assessment], Monitoring fonovogo zagrjaznenija prirodnyh sred, Vol. 5, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, pp. 162–179 (in Russian).
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Samonova O.A. Podvizhnye formy tjzhelyh metallov v pochvah lesostepi Srednego Povolzh'ja (opyt mnogofaktornogo regressionnogo analiza) [Mobile forms of heavy metals in soils of Middle Volga forest-steppe (Experience of Multivariate Regression Analysis)], Pochvovedenie, 1995, no 6, pp. 705–713 (in Russian).
- Kasimov N.S., Samonova O.A. Fonovaja pochvenno-geohimicheskaja struktura lesostepi severnogo Kazakhstana [Background soil-geochemical structure of the Northern Kazakhstan forest-steppe], Pochvovedenie, 1989, no 4, pp. 20–35 (in Russian).
- Kasimov N.S., Samonova O.A. Landshaftno-geohimicheskie sistemy i processy [Landscape-geochemical structure of catenae], Geografija, obshhestvo, okružhajushhaja sreda. Vol. 2. Moscow, Gorodec, 2004, pp. 479–551 (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).
- Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia], Smolensk, Ojkumena, 2004, 342 p. (in Russian).
- Kropacheva T.N., Didik M.V., Kornev V.I. Modelirovanie vlijanie JeDTA na sorbciju tjzhelyh metallov gumusovymi kislotami [Simulation of the influence of EDTA on the sorption of heavy metals by humic acids] // Pochvovedenie, 2015, no 4. pp. 424–428 (in Russian).
- Landshaftno-geohimicheskie osnovy fonovogo monitoringa prirodnoj sredy [Landscape-geochemical basis of environmental impact assessment], Moscow, Nauka, 1989, 264 p. (in Russian).
- Lavado R.S., Porcelli C.A. Contents and main fractions of trace elements in Typic Argiudolls of the Argentinean Pampas // Chem. Spec. and Bioavailability. 2000. Vol. 12, no 2, pp. 67–70.
- Lipatov D.N., Verzhiliceva L.A. Soderzhanie i raspredelenie podviznyh form Cu, Zn, Co, Cd, Pb v pochvah agrolandshaftov Tul'skoj oblasti [Concentration and distribution of Cu, Zn, Co, Cd, Pb fractions in soil of arable landscapes in Tula region, Russia], Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 17, Pochvovedenie, 2006, no 3, pp. 34–42 (in Russian).
- Mazhayskij Ju.A. Osobennosti raspredelenija tjzhelyh metallov v profiljah pochv Rjazanskoj oblasti [The Distribution of Heavy Metals in the Profile of Soils of Ryazan Oblast], Agrochimija, 2003, no 8, pp. 74–79 (in Russian).
- Mikrojelementy v pochvah SSSR [Trace elements in soils of the USSR], Moscow, 1981, 252 p. (in Russian).
- Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. Sostav i soedinenija tjzhelyh metallov v pochvah [Composition and compounds of heavy metals in soils], Rostov-na-Donu, Jeverest, 2009, 208 p. (in Russian).
- Perelomov L.V., Pinski D.L. Formy Mn, Pb i Zn v seryh lesnyh pochvah Srednerusskoj vozvyshehnosti [Mn, Pb, and Zn in gray forest soils of the Central Russian Upland] // Pochvovedenie, 2003, no 6. pp. 682–691 (in Russian).
- Pobedinceva I.G., Dianova T.M. Geohimicheskie osobennosti landshafta lugovoj stepi Pselsko-Vorsklienskogo mezhdurech'ja [Geochemical peculiarities of meadowy steppe landscape the Psel River and the Vorskla River basins watershed], Geohimija landshafta i praktika narodnogo hozjajstva, Moscow, Izd-vo MGU, 1979, pp. 96–119 (in Russian).
- Pobedinceva I.G., Gavrilova I.P. Shirokolistvennye lesa Srednerusskoj vozvyshehnosti [Broad-leaves forest of Central Russian Upland] In Landshaftno-geohimicheskie osnovy fonovogo monitoringa prirodnoj sredy, Moscow, 1989, pp. 118–128 (in Russian).
- Podlesakova E., Nemek J., Vacha R. Mobility and bioavailability of trece elements in soils // Trace elements in soils. Bioavailability, flux, and transfer. L., N. Y., Washington: Lewis publishers, 2001, pp. 21–42.
- Prohorova N.V., Matveev N.M., Pavlovskij V.A. Akkumuljacija tjzhelyh metallov dikorastushhimi i kul'turnymi rastenijami v lesostepnom i stepnom Povolzh'e [Accumulation of heavy metals by wild and cultivated plants in forest-steep and steppe landscapes of Povolzh'ye region, Russia]. Samara, Izd-vo Samarskogo un-ta, 1998. 131 p. (in Russian).

Protasova N.A., Gorbunova N.S. Formy soedinenij nikelja, svinca i kadmija v chernozemah Central'no-Chernozemnogo regiona [Nickel, lead, and cadmium fractions in chernozems of the Central Chernozem region, Russia], *Agrohimija*, 2006, no 8, pp. 68–76 (in Russian).

Protasova N.A., Shherbakov A.P. Mikrojelementy (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) v chernozemah i seryh lesnyh pochvah Central'nogo Chernozem'ja [Trace elements (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) in mollisols of the Central Chernozem region, Russia], *Voronezh, VGU*, 2003, 267 p. (in Russian).

Samonova O.A., Gennadiyev A.N., Koshovskii T.S., Zhidkin A.P. Metally v pochvah malogo vodosbora lesostepnoj zony (Srednerusskaja lesostep') [Metals in the soils of a small watershed in the forest-steppe zone of the central Russian upland], *Pochvovedenie*, 2015, no 6, pp. 675–684 (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], *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*, 2013, no 6, pp. 68–75 (in Russian).

Senichkina M.G., Abasheva N.E. Mikrojelementy v pochvah Sibiri [Trace elements in soils of Siberia], *Novosibirsk: Nauka*, 1986, 176 p. (in Russian).

Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A. Mikrojelementy v pochvah soprjazhennyh landshaftov 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).

Syso A.I. Obshhie zakonomernosti raspredelenija mikrojelementov v pokrovyh otlozhenijah i pochvah Zapadnoj Sibiri [General Regularities of the Distribution of Microelements in the Surface Deposits and Soils of West Siberia], *Sibirskij jekologicheskij zhurnal*, 2004, no 3, pp. 273–287 (in Russian).

Received 08.09.2015

Accepted 11.09.2015