

УДК 550.42:631.435(470.318)

О.А. Самонова¹, Н.С. Касимов², Е.Н. Асеева³

МЕТАЛЛЫ В ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЯХ ПОЧВ ОВРАЖНОЙ СИСТЕМЫ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ СМОЛЕНСКО-МОСКОВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ)

Изучено латеральное распределение Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb во фракциях 1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,001 и <0,001 мм в гумусовых горизонтах почв овражной системы в бассейне р. Протва (лесная зона). Металлы накапливаются в определенных гранулометрических фракциях почв: Ti – во всех пылеватых, Zr – в крупнопылеватой фракции; Zn и Pb – в физической глине; Mn, Co, Ni, Cr, Fe – в илистой фракции; второй максимум этих элементов установлен в крупном и среднем песке. С размерностью фракции связаны вариабельность содержания металлов и распределение в системе почв – от водосборной области оврага к его склонам, днищу и конусу выноса. Относительно равномерно распределены элементы в илистой, а также в средне- и мелкопылеватой фракциях и более контрастно в песчаных фракциях. Латеральные изменения концентрации металлов обусловлены разным генезисом (песчаные фракции) и дифференциацией вещества в процессе его миграции (пылеватые и илистая фракции).

Ключевые слова: металлы, гумусовые горизонты почв, гранулометрические фракции, механическая миграция, латеральное распределение.

Введение. Геохимический анализ природных систем на региональном и локальном уровнях базируется на изучении латеральных миграционных потоков. В речных бассейнах перемещение твердого материала со склонов междуречий в долины рек осуществляется в основном по оврагам и балкам [Голосов, 2006]. Большое значение в миграции вещества в таких системах имеет супензионный сток частиц разной размерности, что определяет необходимость анализировать поведение элементов в отдельных гранулометрических фракциях. Актуальность и практическая значимость распределения тяжелых металлов по фракциям почв в овражно-балочных системах связана с возможностью их аккумуляции и последующего выноса в подчиненные ландшафты речных долин.

Овражно-балочная сеть хорошо развита в бассейне р. Протва, в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности, сложенной моренными и покровными суглинками. Большинство оврагов на этой территории относится к эрозионным формам, которые формировались в конце плейстоцена под влиянием изменения естественной ландшафтно-климатической обстановки. Детальные геоморфологические исследования на изучаемой территории выявили две возрастные генерации оврагов – плейстоценовые и голоценовые, отличающиеся по морфологии и истории развития [Панин и др., 2009]. В работах [Самонова, Асеева, 2010; Самонова и др., 2011] проанализировано пространственное распределение содержания металлов и основных по-

члененно-геохимических показателей в поверхностном горизонте почв двух типичных и хорошо изученных в геоморфологическом отношении каскадных ландшафтно-геохимических систем, включающих водосборную область, склоны, днище и конус выноса и относящихся к разным возрастным генерациям, – голоценового оврага и плейстоценовой балки. Транзит металлов в этих системах происходит с илистыми и пылеватыми частицами; рассеяние и аккумуляция металлов зависят в основном от морфологии систем и литогеохимического состава слагающих их отложений, а распределение металлов в поверхностных горизонтах почв связано с их гранулометрическим составом [Samonova et al., 2014; Самонова, Асеева, 2012].

В большинстве работ, посвященных вопросам фракционного анализа химических элементов в почвах, содержится характеристика тонких гранулометрических фракций, к которым часто приурочен максимум содержания металлов, концентрирующихся в тонкодисперсных глинистых минералах с высокой поглотительной способностью [Förstner, 1982; Huang et al., 2014]. В крупных фракциях они аккумулируются лишь при наличии большого количества тяжелых минералов [Протасова, 2003]. Влияние почвообразующих пород и свойственных им ассоциаций тяжелых минералов на микроэлементный состав гранулометрических фракций почв подробно рассмотрено в [Acosta et al., 2011], а воздействие некоторых почвообразовательных процессов (текстурная дифференциация почв и гумусонакопление) на изменение кон-

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

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

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

центрации элементов в определенных фракциях в почвенном профиле – в работах [Синкевич, Стрижова, 1966; Тонконогов и др., 1987; Титова и др., 1996; Самонова, Асеева, 2006; Hardy, Cornu, 2006].

Мы анализировали распределение химических элементов в гранулометрических фракциях почв оврага и его водосбора – каскадной системе локального уровня. Цель исследования – выявить основные закономерности латеральной дифференциации Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb во фракциях размерностью 1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,001 и <0,001 мм в гумусовых горизонтах почв овражной системы и факторы, ее определяющие. Работа представляет собой следующий этап более детального анализа поведения металлов в малой эрозионной форме – овраге.

Латеральная (*L*) миграция, присущая объекту исследования, расположенному в бассейне р. Протва, происходит в условиях литологически и генетически неоднородного субстрата, который определяет основные черты его исходной геохимической структуры. В зависимости от формы нахождения химических элементов их перемещение происходит в основном по поверхности почвы в виде растворов и суспензий [Касимов и др., 2002; Samonova et al., 2014]. Именно в гумусовых горизонтах почв геохимическая дифференциация гранулометрических фракций, сопровождающая процессы механического перемещения вещества (сортировка, выветривание, диспергирование частиц, осаждение элементов из растворенной фазы при ионообменных реакциях, сорбции и т.д.), проявляется максимально активно.

Материалы и методы исследований. Исследован овр. Волчий, расположенный на юго-восточном склоне Смоленско-Московской возвышенности, в центральной части бассейна р. Протва, на территории Сатинского учебного полигона географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. Это один из 4-х оврагов на исследованной территории, сформировавшихся во второй половине голоценена под влиянием гидроклиматических причин и экстремального проявления ливневой активности. Овраг Волчий заложен на левом коренном берегу долины р. Протва с крутизной 7–10°, в отличие от более древних овражных систем он имеет водосбор очень небольшой площади ($S=1,7$ га) и малую протяженность – около 200 м (рис. 1), в плане представлен простой ромбовидной формой. Он имеет на всем протяжении четкие бровки и прямые склоны крутизной от 20 до 50°, V-образный, а в приустьевой части – U-образный поперечный профиль. В верхней части овраг прорезает маломощные покровные суглинки, флювиогляциальные пески и сильноопесчаненную московскую морену; в средней части углубляется в легкоразмываемую 15-метровую толщу водно-ледниковых песков и алевритов, частично вскрывая верхнюю часть тяжелосуглинистой, насыщенной крупнообломочным материалом днепровской морены. В целом продольный профиль имеет правильную вогнутую форму [Панин и др., 2009], глубина оврага в средней части достигает 8 м. Продукты эрозионной деятельности оврага

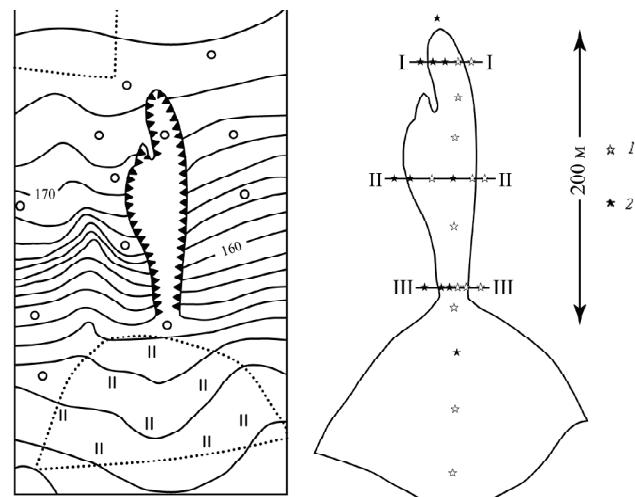


Рис. 1. Фрагмент топографической карты (горизонтали проведены через 2 м) и схема отбора проб в гумусовых горизонтах почв овр. Волчий и его конуса выноса. Римские цифры – катены, начинающиеся выше бровок и пересекающие склоны оврага и его днище.

1 – места отбора проб; 2 – места отбора проб, для которых в отмытых гранулометрических фракциях определено содержание металлов

Fig. 1. The segment of a topographic map (contour lines drawn at 2 m interval) and the scheme of the gully with sampling sites. Roman numerals correspond to cross sections stretching from beyond the gully edge through its sides to its bottom.

1 – sampling sites, 2 – sites where concentrations of metals were measured not only in bulk soil sample, but also in grain-size fractions

полно представлены на конусе выноса, наложенном на пойму. Это связано с тем, что борта долины на этом участке не были подвержены размыву рекой в течение всего голоцена [там же]. В настоящее время овраг не проявляет признаков активности.

Водосборная территория овр. Волчий – трансэлювиальный ландшафт с еловым землянично-овсяницевым сообществом на дерново-среднеподзолистых почвах. Окружающие овраг склоны коренного берега р. Протва покрыты еловыми, ельово-березовыми и ельово-сосновыми мертвопокровными сообществами на дерново-слабоподзолистых почвах. Слоны и днище оврага заняты кустарниково-ми сообществами из черемухи и бересклета на дерновых и дерновых слаборазвитых почвах [Герасимова, Исаченкова, 2003], на конусе выноса под луговым землянично-клеверо-злаковым сообществом развиты дерновые среднемощные почвы.

В ландшафтно-геохимическом отношении овраг представляет собой каскадную систему склоны → днище → конус выноса, взаимодействующую с окружающими трансэлювиальными ландшафтами водосборной области и склонов долины р. Протва. Элементарные ландшафты днища, расположенные на разных уровнях рельефа (от верховьев к низовьям), с изменяющимися растительными сообществами и гранулометрическим составом почв также образуют каскадную систему.

Перпендикулярно простианию оврага в среднем через 100 м заложено 3 ландшафтно-геохими-

ческих профиля, пересекающих борта оврага и днище. Из гумусового горизонта (0–10 см) отобраны пробы в водосборной области и на склонах долины р. Протва, окружающих овраг (в 2–3 м от бровки оврага), на средних частях склонов оврага, в днище и на конусе выноса. По днищу пробы между профилями отбирали через 35–40 м. Во всех пробах определены величины pH_{KCl} , содержание C_{opr} (по Тюрину). Гранулометрический анализ выполнен пирофосфатным методом. Распределение валового содержания металлов и их подвижных форм в гумусовых горизонтах почв овражной системы, исследованное по данным анализа 25 проб, которые в целом характеризуют систему, описано в [Samonova et al., 2014].

Для изучения содержания и латерального распределения металлов в гранулометрических фракциях выбрано 11 проб, характеризующих почвы водосборной области, которая примыкает к правому склону (борту) оврага, а также из правого склона, из днища от верховьев к низовым и конуса выноса (рис. 1). В почвах правого склона оврага наблюдалось более равномерное распределение геохимических параметров, чем в почвах левого склона, описанных ранее [Samonova et al., 2014]. Предполагается, что для отдельных фракций эта ситуация не изменится, что позволит корректнее интерпретировать результаты средних значений геохимических параметров для коротких выборок (в среднем 3 пробы в каждой фракции из почв разных ландшафтов оврага) и повысить точность определения средних.

В этих пробах (всего 55 проб) выделены гранулометрические фракции (мм) 1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,001 и <0,001 методом отмучивания водой (химическая лаборатория Института географии РАН, Е.А. Агафонова). Масса каждой фракции составляла 3–5 г. Количественным спектральным ме-

гумуса и величины pH , а также значения коэффициента корреляции Спирмена для выявления линейных закономерностей изменения концентраций элементов вдоль днища оврага [Дмитриев, 1995]. Выполнена статистическая оценка распределения содержания металлов по гранулометрическим фракциям в общей выборке, состоящей из 11 проб для каждой фракции. Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв оврага оценивали с использованием коэффициента латеральной дифференциации (L), равного отношению среднего содержания элемента в данной выборке (склон, днище и т.д.) к его содержанию в почвах водосбора (трансэлювиальные ландшафты, окружающие овраг).

Результаты исследований и их обсуждение.
Латеральное распределение гранулометрических фракций и гумуса в поверхностном горизонте почв оврага. Гранулометрический состав гумусовых горизонтов почв и содержание гумуса приведены в табл. 1. Содержание фракции крупного и среднего песка увеличивается от трансэлювиальных ландшафтов территории, окружающей овраг, к конусу выноса от 4,2 до 31,8% из-за вреза оврага в песчаные флювиогляциальные отложения, а содержание илистых и пылеватых фракций уменьшается (рис. 2). Для всех фракций (за исключением илистой) выявлены статистически достоверные линейные тренды изменения их содержания вдоль днища – для крупного, среднего песка и мелкого песка положительные ($r=1$, $r=0,8$ соответственно), для крупной, средней и мелкой пыли – отрицательные ($r=-0,9$; $p=0,04$), что свидетельствует о накоплении песчаных фракций и одновременном рассеянии более мелких фракций.

Вариации содержания гумуса (от 1,4 до 7,1%) в большой степени определяются развитостью дер-

Таблица 1

Среднее содержание гумуса и гранулометрических фракций (%) в гумусовом горизонте почв правого борта оврага Волчий

Почвы элементов рельефа оврага*	Гумус, %	Гранулометрическая фракция, мм						
		1,0–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,001	<0,001	$\Sigma > 0,01$	$\Sigma < 0,01$
Дерново-средне- и слабоподзолистые почвы водосбора (4)	3,5	4,2	14,7	50,6	19	11,6	69,4	30,6
Дерновые почвы склонов оврага (3)	4,8	15,5	25,8	29,9	15,8	13,1	71,2	28,8
Дерновые слаборазвитые почвы днища (3)	4,6	21,7	22,2	34,4	12,7	9,0	78,3	21,7
Дерновые среднемоющие конуса выноса (1)	3,3	31,8	23,2	25,8	8,3	10,8	80,8	19,1

* В скобках – число проб.

тодом проанализировано содержание Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Ti, Zr, Fe (Бронницкая геолого-геохимическая экспедиция Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, ИМГРЭ).

Рассчитаны средние арифметические значения содержания гранулометрических фракций, металлов,

нового процесса и зависят от проектного покрытия растительностью – максимальное содержание гумуса приурочено к задернованным почвам склонов оврага, что подтверждает возможность накопления почвенного материала на склонах в результате сползания верхнего почвенного горизонта [Ажи-

гиров и др., 1987; Геннадиев и др., 2008; Голосов, 2006]. Между содержанием органического вещества и фракцией средней и мелкой пыли существует достоверная положительная корреляция, что согласуется с данными о накоплении гумуса во фракциях мелкой пыли и ила [Кузнецов, 2004]. В днище оврага – от верховьев к низовьям – проявляется линейный тренд уменьшения содержания гумуса, совпадающий с распределением пылеватых частиц и физической глины [Самонова, Асеева, 2010].

Содержание металлов в гранулометрических фракциях почв оврага. В почвах, не подверженных техногенному воздействию, содержание металлов зависит от минералогического состава отдельных фракций и степени их трансформации в процессе выветривания и почвообразования [Побединцева, 1975; Förstner, 1982; Доброльский, 1983; Anda et al., 2009; Acosta et al., 2011]. В общей выборке проб выявлена приуроченность повышенных значений концентрации металлов к частицам определенной размерности. Титан концентрируется во всех пылеватых фракциях, Zr – в крупнопылеватой (рис. 3). Повышенное содержание Ti и Zr в фракции крупной пыли, по-видимому, связано с накоплением в этой фракции устойчивых акцессорных минералов (сфен, рутил, циркон), характерных для четвертичных отложений на территории исследования [Комплексный..., 1992]. В отдельных случаях Zr накапливается в фракции мелкого песка, что также связано с присутствием в ней циркона [Побединцева, 1975; Berrow, Mitchel, 1991; Anda et al., 2009].

Максимум содержания Pb приходится на средне- и мелкопылеватую фракцию, Zn – на илистую, в более крупных фракциях они не накапливаются (рис. 3), что описано в [Пляскина, Ладонин, 2005; Hardy, Cornu, 2006].

Для илистой фракции гумусовых горизонтов почв характерно высокое содержание Fe, Mn, Co, Ni, Cr [Варшал и др., 1993; Титова и др., 1996; Huang et al., 2014; Berrow, Mitchel, 1991; Hardy, Cornu, 2006]. В распределении этих металлов часто наблюдается второй максимум, приуроченный к фракции крупного и среднего песка, а их среднее содержание минимально (кроме Cr) в фракции крупной пыли, что связано с возможным эоловым генезисом этой фракции и (или) преобразованием при выветривании. В почвах некоторых регионов в пылеватых фракциях из-за особенностей их минералогического состава, напротив, отмечается повышенное содержание Co, Ni [Синкевич, Стрижова, 1966; Hardy, Cornu, 2006; Побединцева, 1975].

Вариабельность содержания металлов зависит от размерности фракций. Она максимальна в фракции крупного и среднего песка, где коэффициент вариации (Cv) для большинства элементов составляет более 50%, а для Ti и Mn – 101 и 128%

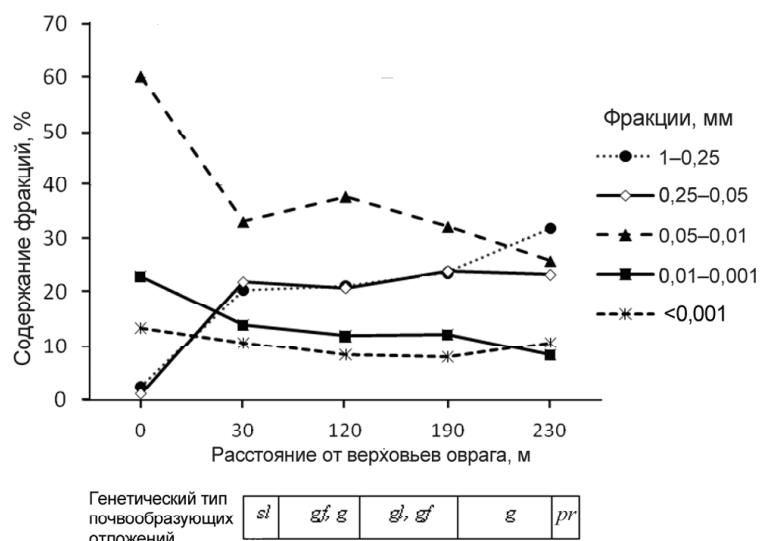


Рис. 2. Распределение гранулометрических фракций в гумусовом горизонте почв днища оврага от верховьев к конусу выноса и генетические типы почвообразующих отложений: sl – покровные суглинки, gf – флювиогляциальные пески, gl – озерно-ледниковые отложения (алевролиты), g – завалуненные моренные суглинки, pr – современные пролювиальные отложения

Fig. 2. Distribution of grain-size fractions in humus horizons along the gully bottom from its headcuts to the fan and genetic types of soil parent material: sl – mantle loams; gf – glacio-fluvial sands; gl – lacustrine deposits (silt and fine sand); g – glacial till (stony loam); pr – fan alluvium

соответственно, и лишь для Pb – ~30%. В фракции мелкого песка значения Cv для Ti, Mn, Cr, Zr, Co уменьшаются, но увеличиваются для Ni, Zn, Fe. В пылеватых фракциях значения коэффициента вариации для всех металлов (кроме Fe и Mn) уменьшаются. В илистой фракции значение Cv минимально для большинства элементов – 15–29% (за исключением Mn, для которого вариабельность содержания в 2–3 раза выше, Cv=50%). Самые низкие значения коэффициента вариации в пылеватых и илистых фракциях (8%) характерны для Cr. Низкая вариабельность содержания элементов в тонких фракциях объясняется их относительно однородным химическим составом, что связано с преобладанием вторичных глинистых минералов и максимальным преобразованием почвенными процессами.

Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв оврага. Фракция крупного и среднего песка (1–0,25 мм). Максимальное содержание всех элементов (за исключением Ti) установлено в почвах водосбора (табл. 2). Почвы внутренних частей оврага (здесь и далее – склонов и днища), как правило, значительно обеднены металлами. Рассеяние элементов происходит в почвах склонов оврага: $Mn_{0,2}Zn_{0,3}Co_{0,3}Ni_{0,4}Cr_{0,5}Fe_{0,6}Zr_{0,6}Pb_{0,7}$, (числовой индекс здесь и далее – значение коэффициента латеральной дифференциации L). Относительно склонов в днище содержание Zn, Ni, Cr увеличивается в 1,5–2 раза; содержание других элементов изменяется мало. Для Zr характерно относительно равномерное распределение внутри оврага (рис. 4).

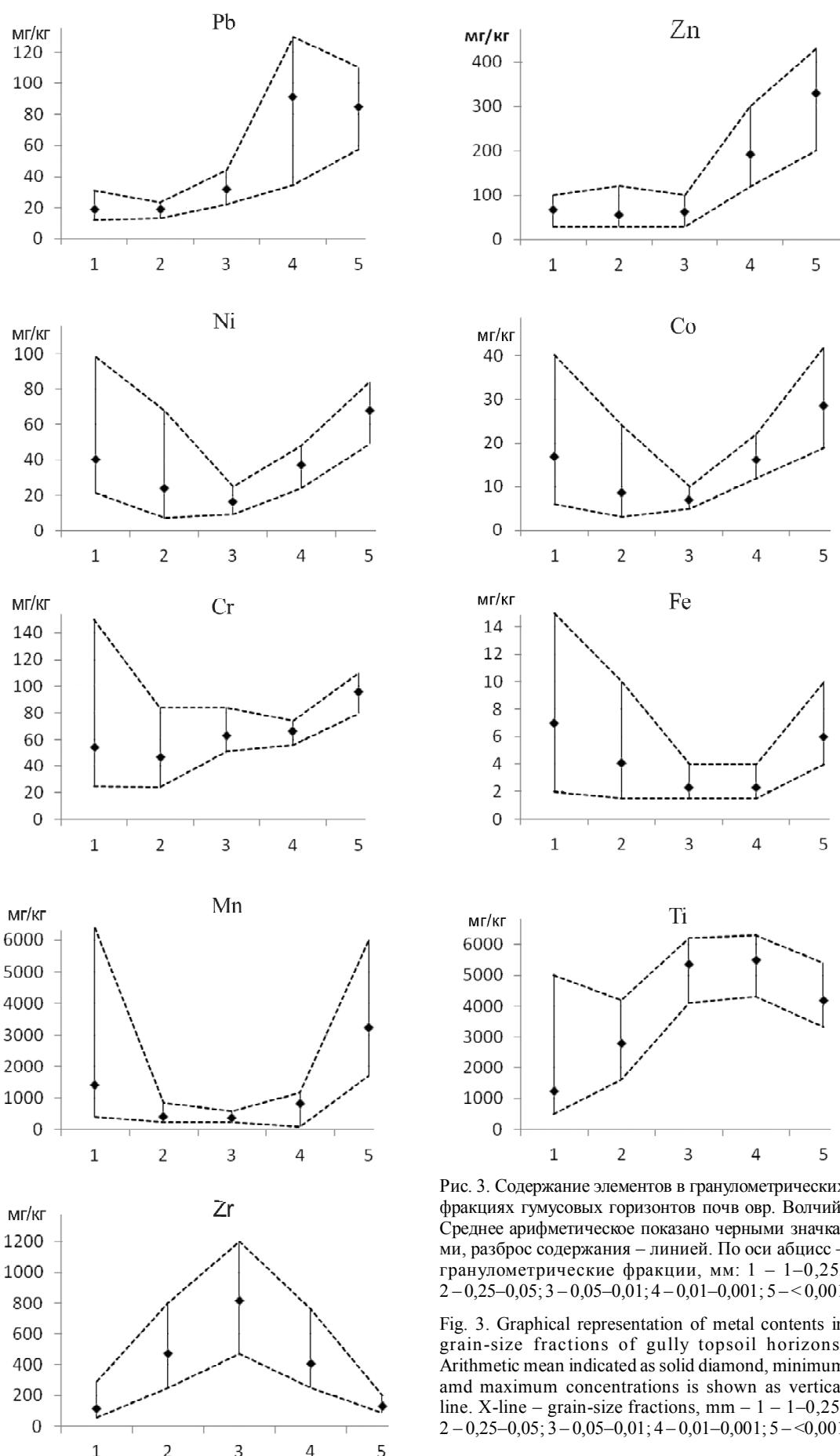


Рис. 3. Содержание элементов в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов почв овр. Волчий. Среднее арифметическое показано черными значками, разброс содержания – линией. По оси абсцисс – гранулометрические фракции, мм: 1 – 1–0,25; 2 – 0,25–0,05; 3 – 0,05–0,01; 4 – 0,01–0,001; 5 – < 0,001

Fig. 3. Graphical representation of metal contents in grain-size fractions of gully topsoil horizons. Arithmetic mean indicated as solid diamond, minimum and maximum concentrations is shown as vertical line. X-line – grain-size fractions, mm – 1 – 1–0,25; 2 – 0,25–0,05; 3 – 0,05–0,01; 4 – 0,01–0,001; 5 – < 0,001

Таблица 2

Среднее содержание^{*} металлов (мг/кг) в гранулометрических фракциях и общей почвенной массе гумусовых горизонтов почв овр. Волчий

Элементы системы ^{**}	Фракция, мм											
	1–0,25				0,25–0,05				0,05–0,01			
	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ
Zn	80	20	63	20	38	20	75	20	53	73	70	50
Pb	22	16	19	12	19	19	20	13	30	37	31	24
Co	30	10	10	6	13	5	8	3	6	8	8	5
Ni	63	23	34	22	35	12	24	15	12	17	21	18
Cr	78	35	53	25	59	36	50	24	61	73	61	52
Mn	2810	607	670	450	523	283	450	250	283	447	433	330
Ti	900	810	893	5000	3050	2767	2900	1600	5525	4733	5500	6200
Zr	160	93	87	80	610	397	447	250	860	737	787	1000
Fe, %	10,3	6	5,3	2	6	2,5	4	1,5	1,6	2,7	3	1,5
Элементы системы	Фракция, мм											
	0,01–0,001				<0,001				Общая почвенная масса горизонтов			
	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ
Zn	190	200	190	190	338	350	320	280	80	100	80	60
Pb	89	93	97	80	92	86	83	60	30	20	20	20
Co	16	18	15	16	32	24	28	33	10	10	10	10
Ni	36	37	38	43	74	61	73	52	30	30	30	30
Cr	67	67	65	70	96	103	95	80	40	50	50	30
Mn	788	1050	627	880	4475	2067	2867	2800	550	400	600	400
Ti	5450	5200	5767	5800	4350	4033	3867	5000	3500	3000	3000	2000
Zr	420	373	477	260	153	130	100	130	350	300	200	200
Fe, %	3	3,7	2,3	4	6,8	4,7	5,7	8	—	—	—	—

При мечания. В – водосборная область (4); СКЛ – склоны оврага (3); ДН – днище оврага (3); КВ – конус выноса (1), в скобках – число проб. * Среднее арифметическое для фракций, медианное значение для общей почвенной массы горизонтов; ** элементы системы. Полужирным выделено максимальное среднее содержание элемента в фракции.

Минимальные значения концентрации Pb, Co, Cr, Mn, Zr, Fe приурочены к конусу выноса. Здесь же отмечается накопление Ti, что свидетельствует об изменении минералогического состава фракции в процессе транспортировки песчаных осадков и их переотложения, увеличения в ней доли кварца и устойчивых акцессорных минералов [Шванов, 1987].

Вдоль днища оврага происходит уменьшение содержания металлов от верховьев овражной системы к ее низовьям, что хорошо согласуется с результатами L-анализа и выводом о возможности рассеяния металлов в этой фракции в процессе транспортировки частиц по днищу к конусу выноса. Достоверные линейные отрицательные тренды ($r=-1$ и $r=-0,9$; $p<0,05$) установлены для Mn, Pb и Co; менее

отчетливо они выражены для Fe, Zr и Cr ($r=-0,8$ для Fe и $r=-0,7$ для Zr и Cr).

Фракция мелкого песка (0,25–0,05 мм). Максимальное содержание большинства элементов (за исключением Zn) наблюдается в почвах водосбора (рис. 4). Уменьшаясь в почвах склонов оврага ($\text{Ni}, \text{Co}, \text{Fe}_{0,4}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{Cr}_{0,6}, \text{Zr}_{0,7}$), содержание большинства из них относительно склонов увеличивается в днище системы: Ni, Fe, Mn, Co, Cr – в 1,5–2 раза, а Zn – в 3,8 раза. Уменьшение содержания на склонах (по сравнению с фракцией крупного и среднего песка) происходит менее резко для Mn, Zn, Cr, но более интенсивно для Fe, а накопление Zn в днище приводит к двукратному превышению его содержания относительно почв водосбора (табл. 2). Между склонами и днищем Zr, Ti и Pb распределены равно-

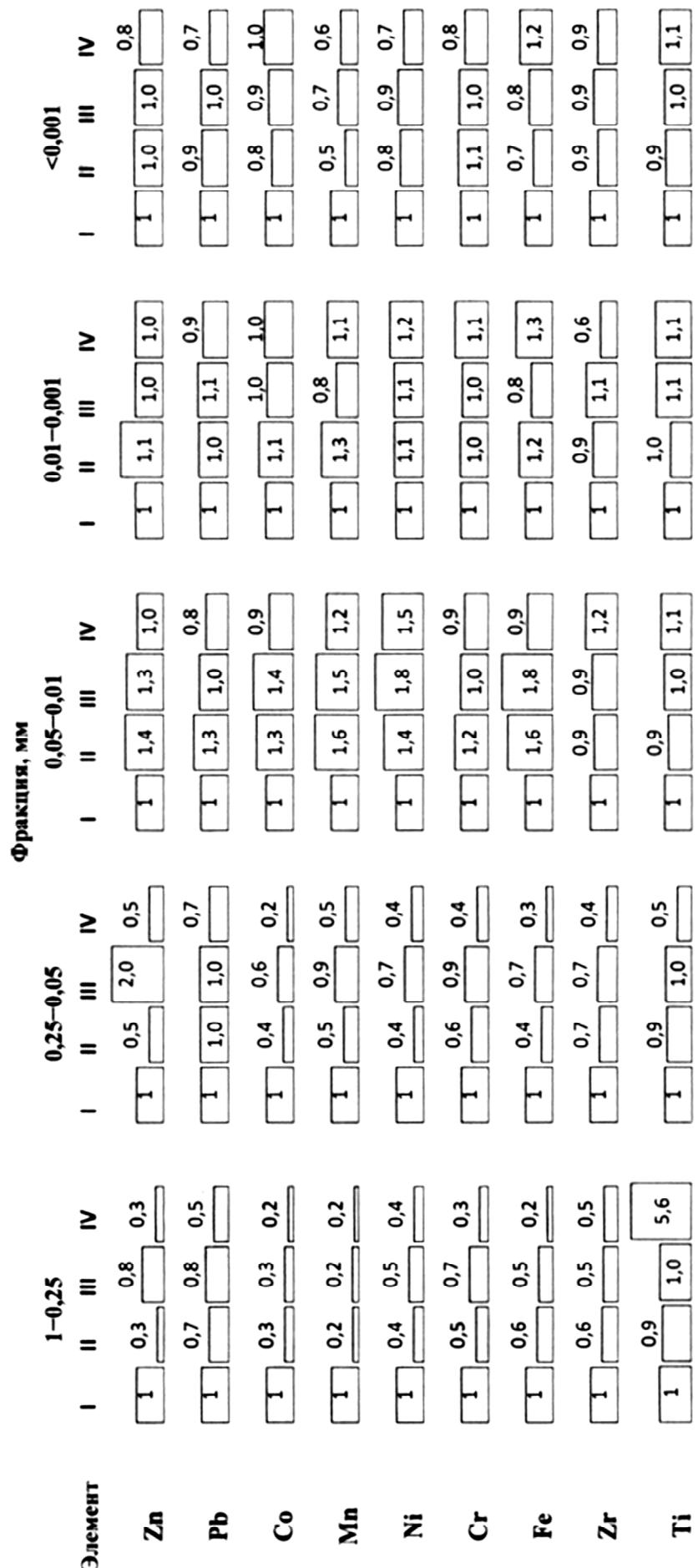


Рис. 4. Диаграммы значений коэффициента латеральной дифференции металлов (L) в гранулометрических фракциях гумусового горизонта почв овражной системы: I – водосборная область, II – склоны оврага, III – днище оврага, IV – конус выноса. Чисфры – значения L

Fig. 4. The diagrams displaying L coefficients for metal concentrations in grain-size fractions across the gully external and internal units: I – catchment area; II – slope; III – bottom; IV – bottom fan.
The numbers are L values

мерно. В почвах конуса выноса минимально содержание Fe, Zr, Ti, Mn, Cr, Co, Pb (табл. 2).

Концентрация Fe уменьшается вдоль днища оврага. Высокое значение коэффициента корреляции ($r=-0,9$; $p=0,04$) свидетельствует о рассеянии этого элемента от верховьев к низовым оврага, возможно, в процессе транспортировки частиц фракции. Менее достоверные линейные тренды рассеяния выявлены в распределении содержания Mn, Co, Ni, Zr ($r=-0,7$; $p=0,19$).

Таким образом, латеральная геохимическая дифференциация фракции мелкого песка мало отличается от дифференциации фракции крупного и среднего песка. В обеих песчаных фракциях прослеживается влияние литогенного фактора, определяющего меньшую концентрацию металлов в почвах внутренних частей оврага по сравнению с водосбором. Внутри овражной системы в этих фракциях происходит накопление многих элементов в днище и их рассеяние в почвах конуса выноса.

Фракция крупной пыли (0,05–0,01 мм). В крупной пыли, в отличие от песчаных фракций, повышенное содержание элементов приурочено преимущественно к почвам внутренней части оврага – его склонам (бортам) и днищу. В почвах склонов оврага содержание большинства металлов относительно водосбора увеличивается Fe, Mn_{1,6}, Ni, Zn_{1,4}, Co, Pb_{1,3}, Cr_{1,2}, а Ti и Zr не меняется. Почвы склонов и днища почти не отличаются по содержанию металлов (рис. 4). Более заметные изменения состава фракции наблюдаются при переходе к почвам конуса выноса, где, как и в песчаных фракциях, Fe, Co, Zn Mn, Pb, Cr, Ni, рассеиваются, а Ti и Zr накапливаются (рис. 4).

Для большинства элементов линейные тренды изменения концентраций вдоль днища отсутствуют, за исключением Pb, содержание которого уменьшается вниз по днищу оврага ($r=-0,72$; $p=0,17$).

Фракция средней и мелкой пыли (0,01–0,001 мм). В почвах склонов оврага и водосбора отмечаются близкие значения концентрации Pb, Cr, Ti, Zn, Co и Zr (рис. 4). Содержание Mn и Fe увеличивается на склонах оврага в 1,3 и 1,2 раза соответственно.

В почвах внутренних частей оврага (рис. 4) сохраняется относительно равномерное распределение Pb, Cr, Ti, Zn, Co, более контрастно ведут себя Mn и Fe. В системе склоны→днище→конус выноса концентрация Mn и Fe сначала уменьшается, а затем в почвах конуса выноса увеличивается в 1,7 и 1,4 раза соответственно. Zr распределен относительно равномерно между склонами и днищем, однако на конусе выноса его содержание уменьшается в 1,8 раза. Относительно почв водосбора в почвах конуса выноса слабо накапливаются Fe и Ni (в 1,3 раза).

В распределении металлов вдоль днища оврага в составе этой фракции, в отличие от более крупных фракций, выявляются положительные линейные тренды, в частности в поведении Ni ($r=1,0$; $p<0,001$) и с меньшей степенью достоверности Mn ($r=0,72$; $p=0,17$), что указывает на накопление этих элементов от верховьев к низовым системе.

Таким образом, фракция средней и мелкой пыли имеет относительно однородный геохимический состав по сравнению с более крупными фракциями, что свидетельствует об ее одинаковом генезисе и/или преобразовании процессами выветривания. Латеральное изменение геохимического состава этой фракции, где значительно повышается доля вторичных минералов [Минкина и др., 2011], проявляется в виде вариации содержания Mn и Fe, что, возможно, связано с перераспределением их подвижных соединений.

Илистая фракция (<0,001 мм). Большинство элементов распределено равномерно, за исключением Mn и Fe, содержание которых в почвах водосбора выше, чем на склонах оврага (рис. 4), в 2,2 и 1,4 раза соответственно.

Между склонами и днищем оврага различия в содержании отчетливо проявляются только для Mn (рис. 4). Для других элементов, в том числе Fe, вариации выражены очень слабо (1,1–1,2 раза). К конусу выноса содержание Fe увеличивается (рис. 4), Mn – практически не меняется, а концентрация Ni и Pb в почвах конуса выноса по сравнению с днищем меньше в 1,4 раза, а Cr и Zn – в 1,2 раза.

Среди металлов в распределении содержания вдоль днища, от верховьев к низовым оврага, отрицательный линейный тренд прослеживается лишь для Pb и Mn, но выражен он с невысокой степенью достоверности ($r=-0,8$; $p=0,10$).

В целом илистая фракция отличается слабым изменением содержания металлов в почвах внешней и внутренней частей оврага. Изменение ее геохимического состава связано в основном с вариациями содержания Mn и Fe. С песчаными фракциями ее сближает тип распределения металлов в системе почвы водосбора – почвы склонов, а также по днищу от верховьев к низовым оврага, а с фракцией средней и мелкой пыли – накопление Fe в почвах конуса выноса.

Выводы:

- по особенностям распределения металлов между гранулометрическими фракциями в гумусовых горизонтах почв оврага выделяются три группы элементов: первая – Ti и Zr, накапливающиеся в пылеватых фракциях (Ti – во всех пылеватых фракциях, Zr – в крупнопылеватой); вторая – Zn и Pb, содержание которых больше в физической глине; третья – Fe, Mn, Co, Ni, Cr с повышенным содержанием в илистой фракции и вторым максимумом во фракции крупного и среднего песка;

- вариабельность содержания большинства металлов в гранулометрических фракциях снижается в ряду песок→пыль→ил. Латеральное изменение содержания металлов в фракциях связано с разным генезисом фракций (преимущественно песчаных) в почвах водосбора и внутренних частей оврага и преобразованием в процессе миграции (песчаные, пылеватые и илистая фракции);

- песчаные фракции в почвах на покровных суглинках водосбора характеризуются более высоким содержанием металлов, чем почвы внутренних ча-

стей оврага на флювиогляциальных и гляциальных отложениях; повышенная концентрация элементов в фракции крупной пыли приурочена преимущественно к почвам склонов и днища оврага, что, возможно, связано с перераспределением Fe и Mn;

– латеральное изменение фракции средней и мелкой пыли и илистой фракции в гумусовых горизонтах почв гетеролитной системы слабое, проявляется лишь в виде вариаций содержания Mn и Fe вследствие высокой подвижности их соединений в почвах лесной зоны;

– рассеяние большинства металлов в почвах конуса выноса обусловлено преобразованиями минералогического состава почвенного материала в

Благодарности. Исследование выполнено за № 14-27-00083).

процессе его транспортировки по днищу оврага и наиболее контрастно проявляется во фракциях физического песка, где одновременно происходит накопление элементов, связанных с устойчивыми акцессорными минералами; Ti накапливается в крупном и среднем песке, Zr – в крупнопылеватой фракции. В тонких фракциях выявлена аккумуляция Fe, обусловленная его миграционной активностью;

– результаты анализа позволяют корректнее интерпретировать роль гранулометрического фактора и выявлять индикационные свойства каждой фракции для решения научных и практических задач геохимии ландшафтов.

счет гранта Российского научного фонда (проект

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ажигиров А.А., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др. Исследование стока воды и наносов на склоновых водосборах в бассейне р. Протвы. М.: ВИНТИ, 1987. № 6389-В87. 175 с.

Варшал Г.И., Вельюханова Т.К., Кощеева И.Я. Геохимическая роль гуминовых кислот в миграции элементов // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 97–117.

Геннадьев А.Н., Голосов В.Н., Маркелов М.В. и др. Разработка метода разновозрастных трассеров для оценки стадийности почвенно-эрзационных процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 24–31.

Герасимова М.И., Исаченкова Л.Б. Почвы и почвенный покров Сатинского учебного полигона. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 39 с.

Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.

Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.

Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.

Касимов Н.С., Самонова О.А., Кошелева Н.Е. Миграционная способность тяжелых металлов в почвах смешанных лесов // География и окружающая среда. М.: ГЕОС, 2000. С. 415–428.

Комплексный анализ четвертичных отложений Сатинского учебного полигона / Под ред. Г.И. Рычагова, С.А. Антоно娃. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 128 с.

Кузнецов Р.В. Распределение гумуса и минералов по гранулометрическим фракциям в основных типах почв Ростовской области: Автoref. канд. дисс. Ростов-на-Дону, 2004.

Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.

Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджисева С.С. и др. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.

Панин А.В., Каревская И.А., Фузенина Ю.Н., Шеремецкая Е.Д. Среднеголоценовая фаза оврагообразования в юго-западном Подмосковье // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 60–70.

Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2005. № 4. С. 36–43.

Побединцева И.Г. Почвы на древних корах выветривания. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 191 с.

Протасова Н.А. Редкие и рассеянные элементы (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) в почвообразу-

ющих породах Центрального Черноземья // Вестн. ВГУ. Сер. Химия, биология, фармация. 2003. № 2. С. 164–171.

Самонова О.А., Асеева Е.Н. Геохимический анализ покровных и моренных суглинков бассейна средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006а. № 2. С. 43–48.

Самонова О.А., Асеева Е.Н. Геохимическая трансформация покровных и моренных суглинков бассейна средней Протвы в процессе почвообразования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006б. № 6. С. 67–74.

Самонова О.А., Асеева Е.Н. Металлы в почвах эрозионных ландшафтно-геохимических систем (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 118–142.

Самонова О.А., Асеева Е.Н. Почвенно-геохимическая дифференциация малых эрозионных форм в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 80–88.

Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н. Подвижные формы металлов в почвах эрозионных ландшафтно-геохимических систем (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 6. С. 67–75.

Синкевич З.А., Стрижкова Г.П. Содержание меди, цинка, никеля, кобальта и молибдена в гранулометрических фракциях некоторых почв Молдавии // Вопросы исследования и использования почв Молдавии. Вып. 4. Кишинев: Карта Молдовеняска, 1966. С. 68–72.

Титова Н.А., Травникова Л.С., Кахнович З.Н. и др. Содержание тяжелых металлов в гранулометрических и денситометрических фракциях почв // Почвоведение. 1996. № 7. С. 888–898.

Тонконогов В.Д., Градусов Б.П., Рубилина Н.Е. и др. К дифференциации минералогического и химического составов дерново-подзолистых и подзолистых почв // Почвоведение. 1987. № 3. С. 68–81.

Шванов В.Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 1987. 269 с.

Acosta J.A., Martínez-Martínez S., Faz A., Arocena J. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials // Geoderma. 2011. Vol. 161, N 1. P. 30–42.

Anda M., Chittleborough D.J., Fitzpatrick R.W. Assessing parent material uniformity of a red and black soil complex in the landscapes // Catena. 2009. Vol. 78, N 2. P. 142–153.

Berrill M.L., Mitchell R.L. Location of trace elements in soil profiles: total contents of particle-size separates // Trans. R. Soc. Edinb. Earth scie. 1991. Vol. 82, N 3. P. 195–209.

Burt R., Wilson M.A., Mays M.D., Lee C.W. Major and trace elements of selected pedons in the USA // J. Environ. Qual. 2003. Vol. 32. P. 2109–2121.

Förstner U. Chemical forms of metal accumulation in recent sediments // Ore genesis. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 191–199.

Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation // Geoderma. 2006. Vol. 133, N 3–4. P. 295–308.

Huang B., Li Z., Huang J. et al. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil // J. Hazardous Mat. 2014. Vol. 264. P. 176–183.

Marshall P., Fairbridge R.W. Encyclopedia of geochemistry. Kluwer Academic Publish., 1999. 1821 p.

Panin A.V., Fuzeina J.N., Belyaev V.R. Long-term development of Holocene and Pleistocene gullies in the Protva River basin, Central Russia // Geomorphology. 2009. Vol. 108. P. 71–91.

Samonova O.A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S. Metals in soils of erosional systems in forest zone in the central part of European Russia // J. Geochem. Explor. 2014. Vol. 144. P. 247–259.

Поступила в редакцию 05.11.2015
Принята к публикации 16.03.2016

O.A. Samonova¹, N.S. Kasimov², E.N. Aseyeva³

**GRAIN SIZE DISTRIBUTION
OF METALS IN SOILS OF A GULLY SYSTEM
(SOUTHEASTERN SMOLENSK-MOSCOW UPLAND)**

The lateral distribution of Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb in 1–0,25, 0,25–0,05, 0,05–0,01, 0,01–0,001 and <0,001 mm grain-size fractions of humus soil horizons was studied in a gully system located in the central Protva River basin (forest zone). The metals tend to accumulate in certain grain-size fractions: Ti – in all silt fractions; Zr – in the coarse silt fraction; Zn and Pb – in the fractions finer than 0,01 mm. Clay fraction is enriched in Mn, Co, Ni, Cr, Fe; second maximum of these metals is restricted to the coarse-grained and medium-grained sand. The particle size defines the variability of metal contents and their lateral distribution across the gully catchment area, its slopes, bottom and fan. A relatively uniform distribution of metals is found in clays, as well as in medium- and fine-grained silt, while sand fractions show a clearly uneven distribution of elements. Lateral patterns of metal distributions are dependent on different factors including the origin of soil particles (sand fraction) and the changes occurring during their migration (sand, silt, and clay fractions).

Keywords: metals, humus soil horizon, grain-size fractions, physical migration, lateral distribution.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083).

REFERENCES

- Acosta J.A., Martínez-Martínez S., Faz A., Arocena J. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials // Geoderma. 2011. Vol. 161, N 1. P. 30–42.
- Anda M., Chittleborough D.J., Fitzpatrick R.W. Assessing parent material uniformity of a red and black soil complex in the landscapes // Catena. 2009. Vol. 78, N 2. P. 142–153.
- Azhigirov A.A., Golosov V.N., Dobrovolskaja N.G. et al. Issledovanie stoka vody i nanosov na sklonovyh vodosborah v bassejne r. Protvy [A study of water and sediment flow on slope catchments in the Protva river basin], Moscow, VINITI, 1987, no 6389-V87, 175 p. (in Russian).
- Berrill M.L., Mitchell R.L. Location of trace elements in soil profiles: total contents of particle-size separates // Trans. R. Soc. Edinb. Earth scie. 1991. Vol. 82, N 3. P. 195–209.
- Burt R., Wilson M.A., Mays M.D., Lee C.W. Major and trace elements of selected pedons in the USA // J. Environ. Qual. 2003. Vol. 32. P. 2109–2121.
- Dmitriev E.A. Matematicheskaja statistika v pochvodenedii [Mathematical statistics in soil science], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1995, 320 p. (in Russian).
- Dobrovolskij V.V. Geografija mikroelementov. Global'noe rassejanie [Geography of trace elements. Global dispersion], Moscow, Mysl', 1983, 272 p. (in Russian).
- Förstner U. Chemical forms of metal accumulation in recent sediments // Ore genesis. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 191–199.
- Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation // Geoderma. 2006. Vol. 133, N 3–4. P. 295–308.
- Huang B., Li Z., Huang J. et al. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil // J. Hazardous Mat. 2014. Vol. 264. P. 176–183.
- Gennadiev A.N., Golosov V.N., Markelov M.V. et al. Razrabotka metoda raznovozrastnyh trasserov dlja ocenki stadijnosti pochvenno-jerozionnyh processov [The development of a method of different-age tracers to evaluate soil erosion stages], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2008, no 3, pp. 24–31 (in Russian).
- Gerasimova M.I., Isachenkova L.B. Pochvy i pochvennyj pokrov Satinskogo uchebnogo poligona [Soil and soil cover of the Satino training station], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2003, 39 p. (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Research Scientist, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: oasamonova@mail.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, Senior Research Scientist, PhD in Geography; e-mail: aseyeva@mail.ru

Golosov V.N. Jerozionno-akkumulativnye processy v rechnyh bassejnah osvoennyh ravnin [The erosional and accumulative processes in river basins in cultivated plains], Moscow, GEOS, 2006, 296 p. (in Russian).

Kasimov N.S., Samonova O.A., Kosheleva N.E. Migracionnaja sposobnost' tjazhelyh metallov v pochvah smeshannyh lesov [The migration ability of heavy metals in soils of mixed forests], Geografija i okruzhajushhaja sreda, Moscow, GEOS, 2000, pp. 415–428 (in Russian).

Kompleksnyj analiz chetvertichnyh otlozhenij Satinskogo uchebnogo poligona [The integrated analysis of the Quaternary deposits of the Satino training station], Eds. G.I. Rychagov, S.A. Antonov, Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1992, 128 p. (in Russian).

Kuznecov R.V. Raspredelenie gumusa i mineralov po granulometricheskim frakcijam v osnovnyh tipah pochv Rostovskoj oblasti [The distribution of humus and minerals across particle size fractions in the main types of soils of the Rostov region], PhD thesis, Rostov-na-Donu, 2004 (in Russian).

Ladonin D.V. Soedinenija tjazhelyh metallov v pochvah – problemy i metody izuchenija [The compounds of heavy metals in soil – the problems and methods of study], Pochvovedenie, 2002, no 6, pp. 682–692 (in Russian).

Marshall P., Fairbridge R.W. Encyclopedia of geochemistry. Kluwer Academic Publish., 1999. 1821 p.

Minkina T.M., Pinskij D.L., Mandzhieva S.S. et al. Vlijanie granulometricheskogo sostava na pogloshchenie medi, svinka i cinka chernozemnymi pochvami Rostovskoj oblasti [The impact of particle size distribution on the copper, lead and zinc absorption in chernozemic soils of the Rostov region], Pochvovedenie, 2011, no 11, pp. 1304–1311 (in Russian).

Panin A.V., Fuzeina J.N., Belyaev V.R. Long-term development of Holocene and Pleistocene gullies in the Protva River basin, Central Russia // Geomorphology. 2009. Vol. 108. P. 71–91.

Panin A.V., Karevskaia I.A., Fuzeina Ju.N., Sheremeckaja E.D. Srednegolocenovaja faza ovragoobrazovaniya v jugo-zapadnom Podmoskov'e [The middle Holocene stage of ravine formation in the south-western part of the Moscow region], Vestnik Moskovskogo universiteta, seriya 5, Geografija, 2009, no 6, pp. 60–70 (in Russian).

Pljaskina O.V., Ladonin D.V. Soedinenija tjazhelyh metallov v granulometricheskikh frakcijah nekotoryh tipov pochv [Compounds of heavy metals in certain types of granulometric fractions of soil], Vestnik Moskovskogo universiteta, seriya 17, Pochvovedenie, 2005, no 4, pp. 36–43 (in Russian).

Pobedinceva I.G. Pochvy na drevnih korah vyvetrivanija [The soils on ancient weathering crusts], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1975, 191 p. (in Russian).

Protasova N.A. Redkie i rassejannye jelementy (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) v pochvoobrazujushhih porodah Central'nogo Chernozem'ja [Rare and trace elements (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) in the parent materials of the Central Chernozemic Belt region], Vestnik VGU, serija Himija, biologija, farmacija, 2003, no 2, pp. 164–171 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Geohimicheskij analiz pokrovnyh i morennnyh suglinkov bassejna Srednej Protvy

[Geochemical analysis of mantle and moraine loams of the Central Protva river basin], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2006a, no 2, pp. 43–48 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Geohimicheskaja transformacija pokrovnyh i morennnyh suglinkov bassejna Srednej Protvy v processe pochvoobrazovaniya [Geochemical transformation of mantle and moraine loams as a result of soil formation in the Central Protva river basin], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2006b, no 6, pp. 67–74 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Metally v pochvah jerozionnyh landshaftno-geochemicalsikh sistem (jugo-vostochnaja chast' Smolensko-Moskovskoj vozvyshennosti) [Metals in soil erosion landscape-geochemical systems (south-eastern part of Smolensk-Moscow Upland)], Geohimija landshaftov i geografija pochv. 100 let so dnja rozhdenija M.A. Glazovskoj, Moscow, APR, 2012, pp. 118–142 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Pochvenno-geochemicalska differenciacija malyh jerozionnyh form v jugo-vostochnoj chasti Smolensko-Moskovskoj vozvyshennosti [Soil-geochemical differentiation of small erosional landforms in the south-eastern part of Smolensk-Moscow Upland], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2010, no 6, pp. 80–88 (in Russian).

Samonova O.A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S. Metals in soils of erosional systems in forest zone in the central part of European Russia // J. Geochem. Explor. 2014. Vol. 144. P. 247–259.

Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseeva E.N. Podvizhnnye formy metallov v pochvah jerozionnyh landshaftno-geochemicalsikh sistem (jugo-vostochnaja chasti Smolensko-Moskovskoj vozvyshennosti) [Metals' mobile forms in soils of erosional landscape-geochemical systems (south-eastern part of Smolensk-Moscow Upland)], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2011, no 6, pp. 67–75 (in Russian).

Shvanov V.N. Petrografija peschanyh porod (komponentnyj sostav, sistematika i opisanie mineral'nyh vidov) [Petrography of sandy rocks (the component composition, taxonomy and description of mineral species)], Leningrad, Nedra, 1987, 269 p. (in Russian).

Sinkevich Z.A., Strizhova G.P. Soderzhanie medi, cinka, nikelja, kobalta i molibdena v granulometricheskikh frakcijah nekotoryh pochv Moldavii [The content of copper, zinc, nickel, cobalt and molybdenum in several granulometric fractions of soil Moldova], Voprosy issledovanija i ispol'zovaniya pochv Moldavii, Kishinev, Kartya Moldovenyaska, 1966, no 4, pp. 68–72 (in Russian).

Titova N.A., Travnikova L.S., Kahnovich Z.N. et al. Soderzhanie tjazhelyh metallov v granulometricheskikh i densimetriceskikh frakcijah pochv [The content of heavy metals in soil grain size fractions], Pochvovedenie, 1996, no 7, pp. 888–898 (in Russian).

Tonkonogov V.D., Gradusov B.P., Rubilina N.E. et al. K differenciacii mineralogicheskogo i himicheskogo sostavov derno-podzolistyh i podzolistyh pochv [About the differentiation of mineralogical and chemical composition of sod-podzolic and podzolic soils], Pochvovedenie, 1987, no 3, pp. 68–81 (in Russian).

Varshal G.I., Veljuhanova T.K., Kosheeva I.Ja. Geohimicheskaja rol' guminovyh kislot v migracii jelementov [Geochemical role of humic acids in the migration of elements], Guminovye veshhestva v biosfere. Moscow, Nauka, 1993, pp. 97–117 (in Russian).

Received 05.11.2015

Accepted 16.03.2016