

УДК 550.42:631.435(470.318)

О.А. Самонова¹, Е.Н. Асеева², Н.С. Касимов³**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМ ФРАКЦИЯМ В БАЛОЧНОЙ ПОЧВЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ СМОЛЕНСКО-МОСКОВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ)**

Исследовано содержание и 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 гумусовых горизонтов почв балочной системы в бассейне р. Протва. Содержание металлов определяется размерностью гранулометрической фракции: в крупном и среднем песке минимально содержание Ti, Zr и Cr, в крупной пыли концентрируется Zr, а содержание Fe, Mn, Co, Ni, Zn, Pb, Cu минимально, в средней и мелкой пыли накапливается Ti, в илстой фракции – Fe, Mn, Co, Ni, Cr, Pb, Zn. Вариабельность содержания большинства металлов уменьшается в ряду песок→пыль→ил. Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв обусловлено их геохимической трансформацией в процессе перемещения от трансэлювиальных ландшафтов территории, окружающей балку, по склонам и днищу балки, от верховьев к низовьям. В крупном и среднем песке наиболее высокое содержание всех металлов, кроме Fe, выявлено в почвах днища или конуса выноса. В мелком песке металлы, кроме Zn и Ti, концентрируются в почвах трансэлювиальных ландшафтов. В средней и мелкой пыли все металлы, кроме Fe, Zr и Ti, накапливаются в почвах склонов и днища балки. В илстой фракции Zn и Mn концентрируются в почвах днища, а остальные элементы – в почвах трансэлювиальных ландшафтов. В крупной пыли латеральное распределение большинства металлов наиболее равномерно. Вдоль днища балки от верховьев к низовьям уменьшается содержание Ti и Zr – в крупном и среднем песке, Cu – в средней и мелкой пыли, Zr и Zn – в илстой фракции; содержание Cr растет в крупной пыли, Mn и Ti – в средней и мелкой пыли, Ni – в илстой.

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

Введение. Оценка фонового или антропогенно-измененного эколого-геохимического состояния ландшафтов основана на представлении о «фоновой геохимической структуре ландшафта», включающей характеристику его радиальной (R) – в вертикальном профиле ландшафта, и латеральной (L) – в катенах, дифференциации содержаний химических элементов, которые описываются различными коэффициентами или уравнениями [Глазовская, Касимов, 1987]. Это понятие в дальнейшем расширилось за счет информации о формах нахождения элементов (F -анализ), экстрагируемых различными вытяжками из твердой фазы почв, а также их гранулометрического фракционирования (G -анализ).

Соответствие размеров аэрозольных частиц атмосферных выпадений PM_1 (<1 микрона) и илстой фракции почв, частиц PM_{10} (менее 10 микрон) и пылевой фракции определяет важность G -анализа при эколого-геохимических исследованиях ландшафтов. Таким образом, фоновые и антропогенно-измененные геохимические структуры представляют собой взаимоотношения большого количества данных о распределении химических элементов в ландшафтных системах.

Настоящая работа охватывает ту часть этой проблематики, которая относится к фоновому гранулометрическому фракционированию металлов в почвах балочной ландшафтно-геохимической системы, типичной для лесных ландшафтов севера Калужской области. Относительная близость ландшафтов территории к Московской агломерации позволяет использовать полученные данные в качестве фоновых для эколого-геохимического анализа территорий «Новой» и «Старой» Москвы.

В ландшафтно-геохимических системах перемещение твердофазного вещества почвы (механическая миграция) осуществляется в форме плоскостной и линейной эрозии [Голосов, 2006; Геннадиев с соавт., 2013]. Важную роль в механической миграции играет суспензионный перенос частиц разной размерности, что определяет необходимость анализа поведения химических элементов в гранулометрических фракциях-носителях.

Перемещение твердого вещества и составляющих его различных гранулометрических фракций определяется длиной, крутизной, формой, экспозицией склонов, фазой снеготаяния и потенциалом дождевых осадков. В подтаежной зоне Западно-Сибирской равнины почвенная масса, переносимая мик-

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

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

³ 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.

ропотоками воды, до 40% состоит из физической глины [Евсеева, Квасникова, 2006]. На ранних стадиях снеготаяния в составе делювия преобладает крупная пыль, а на более поздних – крупная и мелкая пыль, мелкий песок. По прямым склонам наиболее активно переносятся фракции крупного и среднего песка и тонкой пыли [Евсеева с соавт. 2016].

В процессе перемещения по склонам частиц различной размерности происходит латеральная дифференциация химических элементов в результате разнообразных физических, физико-химических, химических и биохимических процессов, что мы предлагаем называть геохимической трансформацией гранулометрических фракций. В гумусовых горизонтах почв геохимическая трансформация гранулометрических фракций, а также физико-химическая миграция, проявляются максимально активно по сравнению с более глубокими почвенными горизонтами [Самонова, Асеева 2008].

Исследования геохимии гранулометрических фракций в почвах, в основном, посвящены тонким фракциям, к которым часто приурочен максимум содержания металлов, концентрирующихся в тонкодисперсных глинистых минералах с высокой поглощательной 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 содержание химических элементов в гранулометрических фракциях почв подробно рассмотрено [Acosta et al., 2011]; радиальное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв с текстурной дифференциацией на лёссовидных отложениях – в [Hardy, Cornu, 2006], где концентрация металлов во всех гранулометрических фракциях, кроме илистой, отмечена в гор. Вт. Поверхностно-аккумулятивное распределение металлов в средне- и мелкопесчаных, мелкопылеватой и илистой фракциях дерново-подзолистых и дерновых почв, обусловленное сорбционными процессами и равномерное распределение или накопление в нижней части профиля почв в составе крупно- и среднepyлеватых фракций описано ранее [Самонова, Асеева, 2008].

В почвах фоновых территорий содержание металлов зависит от минералогического состава отдельных фракций и их изменения в процессе выветривания и почвообразования [Побединцева, 1975; Förstner, 1982; Добровольский, 1983; Acosta et al., 2011]. Для почв техногенноизмененных территорий при разных типах антропогенного воздействия выявлены фракции-носители химических элементов. Тяжелые металлы накапливаются в средне-, мелкопылеватой и илистой фракциях городской пыли [Власов, Касимов, Кошелева, 2014]. Вне зоны техногенного воздействия в речных взвесах и донных отложениях, как и в почвах, максимальные концентрации металлов связаны с тонкими фракциями, однако и в песчаных фракциях могут отмечаться повышенные концентрации некоторых металлов за счет при-

сутствия тяжелых минералов [Förstner, 1982] или крупных частиц загрязняющих веществ [Thorne, Nickless, 1981].

Пространственное распределение валовых и подвижных форм металлов и основных почвенно-геохимических показателей в поверхностном горизонте почв двух каскадных ландшафтно-геохимических систем – голоценового оврага и плейстоценовой балки описано [Samonova et al., 2014]: оно связано с изменением гранулометрического состава, величины pH, содержания гумуса; транзит металлов в этих системах происходит с илистыми и пылеватыми частицами. Характеристика латерального распределения металлов в гранулометрических фракциях поверхностного горизонта почв молодой и литологически неоднородной формы – оврага, врезающегося в покровные и моренные суглинки, флювиогляциальные пески приведена нами ранее [Самонова, Касимов, Асеева, 2016]. Выявлено относительно равномерное распределение элементов в илистой, а также средне- и мелкопылеватой фракциях и более контрастное – в песчаных фракциях. Латеральное изменение концентрации металлов обусловлено различным генезисом (песчаные фракции) и дифференциацией вещества в процессе его миграции (песчаные, пылеватые и илистая фракции).

Цель данного исследования – анализ содержания и латерального распределения 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 гумусовых горизонтов почв в литологически однородной, суглинистой, эрозионной форме – балке.

Объект исследования. Балка Сенокосная (55°12'58" с. ш., 36°22'21" в. д., рис. 1, А) расположена на левом берегу р. Протва в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности на территории Сатинского учебного полигона МГУ. Длина балки 400 м, глубина в средней части – 12–13 м; она имеет 2 отвершка длиной до 100 м, и ящикообразный поперечный профиль (рис. 1, Б). Балка наследует более древнюю эрозионную форму, в ее бортах выделяется не менее двух возрастных генераций склонов [Фузеина, Панин, 1998]. Верхние пологие (3–5°) части склонов с плавными, часто невыраженными бровками являются реликтами более древних форм. Крутые (20–40°) с четкими бровками склоны, опирающиеся на днище, сформировались в процессе углубления современной эрозионной формы. Верховье балки приурочено к древнему озерному понижению. Склоны балки сложены валунными суглинками, перекрытыми покровными суглинками мощностью от 1,1 до 1,45 м [Еременко, 2009], и даже более 2 м [Сысуев, 2014], поэтому подстилающие их опесчаненные моренные суглинки или отдельные линзы песчаных отложений существенно не влияют на гранулометрический состав верхнего горизонта почв. Для Сенокосной балки характерна современная активизация линейной эрозии [Фузеина, Панин, 1998] и формирование вторичного овражного вреза, по которому идет временный сток воды, в значительной степени определяющий лате-

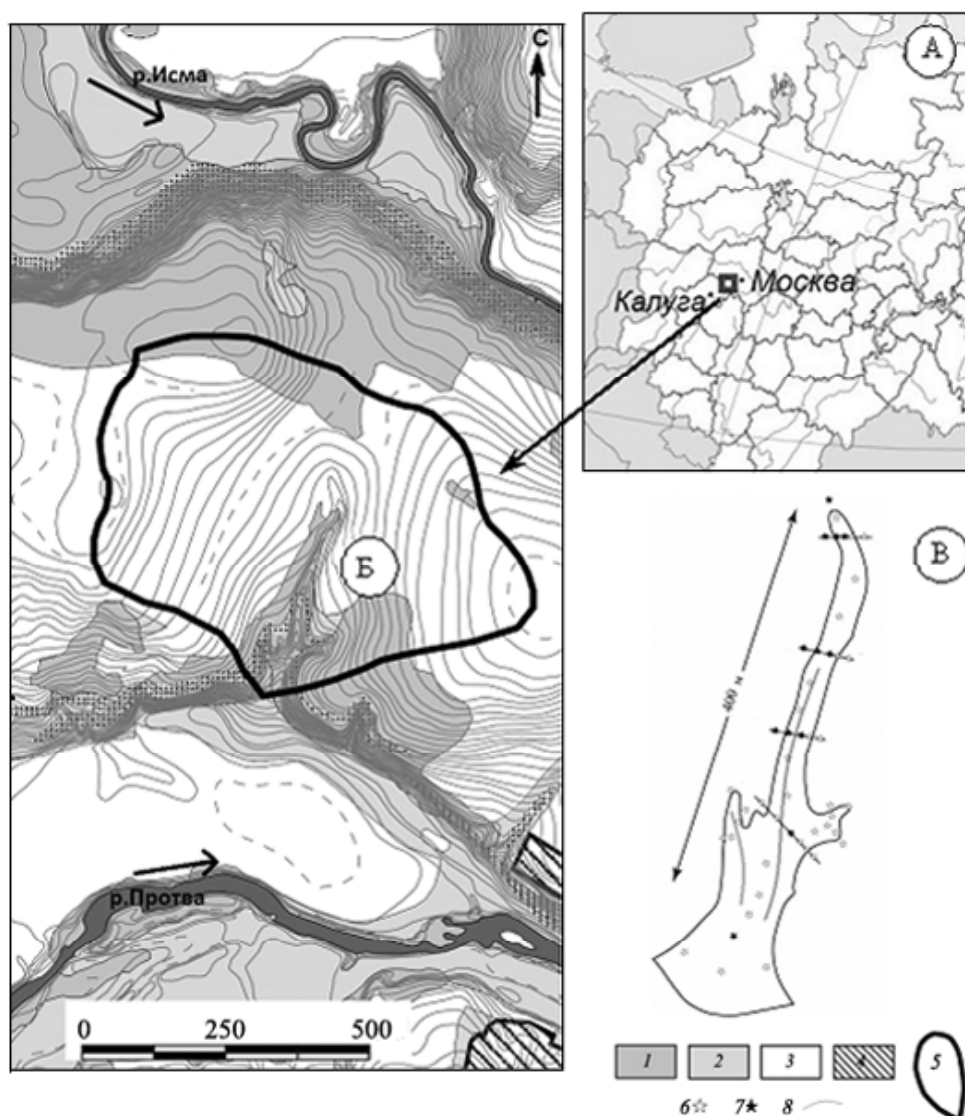


Рис. 1. Местоположение: А – ключевого участка; Б – Сенокосной балки и ее водосборной области на территории исследования (фрагмент карты из работы [Panin et al., 2009]); В – схема отбора проб в гумусовых горизонтах почв балочной системы и ее конуса выноса. На карте 1, Б горизонталы проведены через 1 м. Условные обозначения: 1 – лесная растительность; 2 – луговая растительность; 3 – обрабатываемые и залежные сельскохозяйственные земли; 4 – небольшие сельские населенные пункты (деревни); 5 – границы водосбора балки; 6 – места отбора проб; 7 – пробы, в которых отмыты гранулометрические фракции и определялось содержание металлов; 8 – вторичный эрозионный врез в днище балки

Fig. 1. А – location of the study area; Б – location of the balka and its catchment within the study area (the map fragment from [Panin et al., 2009]); В – the scheme of sampling sites (humus horizons of soils of the balka system and its detrital fan). The contour lines on map 1, Б are at 1 m interval. 1 – forest vegetation; 2 – meadow vegetation; 3 – cultivated and abandoned agricultural lands; 4 – villages; 5 – the catchment boundary; 6 – the sampling sites; 7 – the sites where the concentrations of metals were measured both in a bulk soil sample and in the separated grain-size fractions; 8 – secondary erosion channel in the balka's bottom

ральное распределение металлов в почвенной массе в целом и в ее отдельных гранулометрических фракциях. На конус выноса поступают наносы, образовавшиеся за счет размыва балочного аллювия вторичным овражным врезом (А.В. Панин, устное сообщение). Однако этот врез не вскрывает моренные суглинки (устное сообщение Ю.Н. Фузеиной) и гранулометрический состав анализируемых отложений не отличается от покровных суглинков (табл. 1). Трансэлювиальные ландшафты, окружающие эрозионную форму (балку), а также ее склоны, днище и

конус выноса образуют каскадную почвенно-геохимическую систему [Глазовская, 1987]. Латеральная (*L*) миграция в балочной почвенно-геохимической системе осуществляется в суглинистых отложениях, гранулометрическая однородность которых определяет ее монолитность.

Большая часть водосборной области Сенокосной балки (рис. 1, Б) занята агроландшафтами на дерново-среднеподзолистых освоенных почвах. Лишь в древнем озерном понижении развивается естественная растительность – разнотравно-щучко-

вое, с примесью ивы, сообщество на дерново-подзолистых грунтово-глеевых почвах. На средних и нижних частях склонов долины р. Протва сформировались дубово-еловые и елово-дубовые широколиственные сообщества на дерново-слабоподзолистых почвах. Склоны и днище балки заняты липово-березовыми и березово-рябиновыми крупнотравно-широколистными сообществами на дерновых и дерновых слабо развитых суглинистых почвах. Элементарные ландшафты днища балки, расположенные на разных уровнях рельефа (от верховьев к низовьям), с изменяющимися растительными сообществами и гранулометрическим составом почв представляют собой продольную каскадную ландшафтно-геохимическую систему. Хорошо выражен конус выноса, наложенный на старичное понижение, где под злаково-разнотравным сообществом развиты дерновые почвы. Его гипсометрический уровень соответствует средней пойме, периодически затопливаемой во время весеннего половодья.

Материалы и методы исследований. Вкосте простирания балки, в среднем через 100 м, заложены 3 ландшафтно-геохимических профиля, пересекающие борта балки и днище. Из гумусового горизонта (0-10 см) отобраны пробы в почвах трансэлювиальных ландшафтов, окружающих балку (в 2-3 м от бровки), на средних частях склонов балки, в днище и на конусе выноса. По днищу между профилями пробы отбирали через 35-40 м. Во всех 47 пробах определены величины pH_{KCl} , содержание $C_{орг}$ (по Тюрину), гранулометрический анализ выполнен пиррофосфатным методом.

Латеральное распределение металлов исследовалось в пяти гранулометрических фракциях 11 проб: трансэлювиальных ландшафтов, окружающих балку, ее правого склона, днища от верховьев к низовьям и конуса выноса (рис. 1, В). В почвах правого склона балки геохимические параметры распределены более равномерно, чем в почвах левого склона [Samonova et al., 2014]. Предполагается, что для отдельных фракций ситуация не изменится, и интерпретация результатов средних значений геохимических параметров для коротких (в среднем 3 пробы) выборок будет корректной.

В этих пробах выделены фракции (мм): 1-0,25($G1$) – ситовым методом; 0,25-0,05($G2$); 0,05-0,01($G3$); 0,01-0,001($G4+G5$) и <0,001($G6$) – методом отмучивания водой в химической лаборатории

Института географии РАН, (аналитик Е.А. Агафопова), массой 5 г, в которых атомно-эмиссионным количественным спектральным методом проанализировано содержание Fe, Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Ti, Zr в Бронницкой геолого-геохимической экспедиции Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. Рядом с размером фракции приведено ее обозначение, используемое в тексте, таблицах и на рисунках.

Рассчитаны средние арифметические содержания гранулометрических фракций, металлов в фракциях, гумуса и величины pH – в почвенной массе, значения коэффициента корреляции Спирмена для выявления тесноты связи между элементами и линейных изменений их концентраций вдоль днища оврага. Статистическая оценка распределения металлов для каждой фракции выполнена в общей выборке из 11 проб. Распределение элементов в гранулометрических фракциях почв балочной системы оценивали с помощью коэффициента латеральной дифференциации (L) – отношения среднего содержания элемента в данной выборке (склон, днище, конус выноса) к его содержанию в почвах трансэлювиальных ландшафтов, окружающих эрозионную форму, выборку для которых (для краткости) будем в тексте, таблицах и на рисунках называть «трансэлювиальные ландшафты». Распределение считалось однородным при $L = 0,9-1,1$.

Результаты и их обсуждение. Факторы распределения металлов в гумусовом горизонте почв балки. Дифференциация содержаний гранулометрических фракций, гумуса, величин pH , валовых и подвижных форм металлов в почвенной массе гумусовых горизонтов почв геоморфологических элементов балки, по данным 47 проб описана в [Samonova et al., 2014]. В данной работе анализируется распределение этих параметров в 11 пробах, где были выделены гранулометрические фракции (табл. 1).

Максимальна латеральная дифференциация фракции крупного и среднего песка: в склоновых почвах ее почти в 4,5 раза, а в днище – почти в 2 раза больше, чем в трансэлювиальных ландшафтах; аналогичное, но менее контрастное распределение мелкого песка. Пылеватые фракции распределены довольно равномерно. Содержание илстых частиц слабо увеличивается в днище балки (в среднем в 1,2 раза), уменьшаясь на конусе выноса из-за

Таблица 1

Среднее содержание гранулометрических фракций (%), гумуса, и значений pH в гумусовом горизонте почв балки Сенокосная: трансэлювиальные ландшафты (I) и склоны (II) правого борта, днище (III), конус выноса (IV)

Почвы элементарных ландшафтов балки	Гранулометрические фракции, мм						Гумус, %	pH
	1,0-0,25; $G1$	0,25-0,05; $G2$	0,05-0,01; $G3$	0,01-0,001; $G4+G5$	<0,001; $G6$	$\Sigma < 0,01$		
I. Дерново-среднеподзолистые почвы, (3)*	1,7	1,7	62,6	24,7	9,3	34,0	4,76	6,1
II. Дерновые почвы, (3)	7,7	6,8	52,2	22,6	10,7	33,3	2,50	6,2
III. Дерновые слабо развитые почвы, (4)	3,2	4,2	58,9	22,7	11,0	33,7	2,97	6,3
IV. Дерновые среднемощные, (1)	2,7	6,3	61,9	21,3	7,8	29,1	1,21	6,3

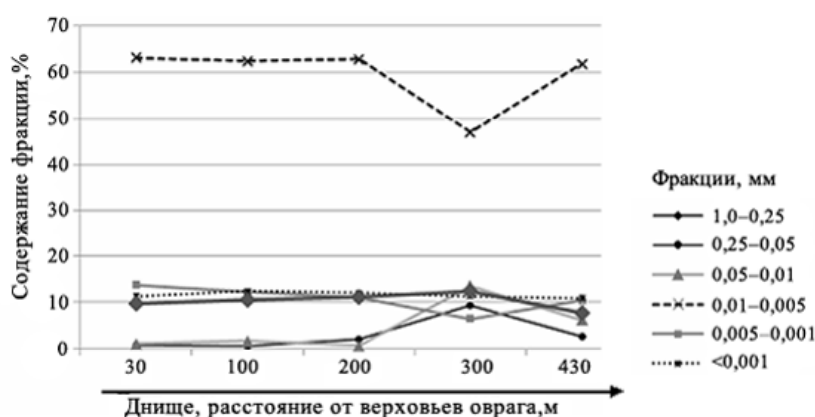


Рис. 2. Распределение гранулометрических фракций в гумусовом горизонте почв днища балки, от верховьев к конусу выноса

Fig. 2. The distribution of the grain-size fractions in humus horizons along the balka's bottom, from its headcuts to the fan

преобладания песчаных частиц в материале, приносимом в период весеннего половодья. Расчет коэффициента Спирмена показал наличие линейных пространственных трендов: аккумуляции среднего песка (слабо для мелкого песка), рассеяния крупной и средней пыли (слабо для мелкой пыли) от верховьев к конусу выноса балки (рис. 2).

Содержание гумуса уменьшается от 4,8% в дерново-среднеподзолистых почвах трансэлювиальных ландшафтов до 1,2% в дерновых среднемошных почвах конуса выноса балки, что совпадает с увеличением доли песчаных фракций в почвах. В днище от верховьев к низовьям содержание гумуса, как и крупнопылеватых частиц, уменьшается.

Дерново-среднеподзолистые почвы трансэлювиальных ландшафтов, окружающих балку, слабокислые, близкие к нейтральным (pH=6,0), с тенденцией слабого увеличения pH от 6,1 до 6,3 в ряду почв: трансэлювиальные ландшафты → склоны → днище → конус выноса из-за влияния гидрокарбонатно-кальциевых вод р. Протва. Корреляционная связь содержания гранулометрических фракций с величиной pH в почвах не установлена.

Латеральное распределение металлов в почвенной массе. Среднее содержание металлов в почвенной массе гумусовых горизонтов балки, в которых были отмыты гранулометрические фракции, приведено в табл. 2. По величине кларков концентрации (числовой индекс) в почвах трансэлювиальных ландшафтов металлы образуют ряд: $Pb_{1,9}$, $Mn_{1,5}$, $Ti_{1,4}$, $Zn_{1,2}$, $Cu_{1,1}$, $Co_{0,9}$, $Cr_{0,8}$, $Ni_{0,5}$, $Fe_{0,4}$, указывающий на повышенный фон Pb и Mn, пониженный – Ni и Fe. Кларк концентрации рассчитывался как отношение содержания элемента в данном объекте к кларку в литосфере. Для Fe, Mn, Ti, Cr, Ni, Zn, Pb использовались кларки Н.А. Григорьева (2009), Co, Cu – Z. Hu и S.Z. Gao (2008), Zr – А.П. Виноградова (1962).

Латеральное распределение металлов в почвенной массе слабо контрастно: L лежат в интервале 0,8 (Mn – на склонах, Cr и Pb – на конусе выноса) –

1,4 (Mn и Zr – на конусе выноса). В почвах склонов балки относительно трансэлювиальных ландшафтов содержание Fe, Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Cr, Ti не изменяется; $Zr_{1,2}$ – слабо увеличивается, а $Mn_{0,8}$ – уменьшается в 1,2 раза. В почвах днища и склонов содержание элементов практически одинаково. В почвах конуса выноса содержание Pb и $Cr_{0,8}$ минимально, а Mn и $Zr_{1,4}$ – максимально.

Металлы в гранулометрических фракциях почв. В общей выборке для гумусовых горизонтов почв балки (трансэлювиальные ландшафты, склоны, днище, конус выноса) концентрации металлов зависят от размерности частиц (рис. 3). Во фракции крупного и среднего песка минимально содержание Ti, Zr и Cr, в отдельных

пробах наблюдается также высокое содержание Mn, Co и Ni. В крупнопылевой фракции отмечено накопление Zr и минимальное содержание Fe, Mn, Co, Ni, Zn, Pb, Cu. Приуроченность максимального содержания Zr к этой фракции объясняется наличием в ней устойчивых акцессорных минералов (сфен, рутил, циркон), характерных для четвертичных отложений на территории исследования [Комплексный ..., 1992]. Минимальное содержание большой группы металлов, вероятно, объясняется ее предполагаемым эоловым генезисом [Муратов, 1953], хотя в пылеватых фракциях почв некоторых регионов из-за особенностей их минералогического состава отмечается повышенное содержание Co и Ni [Синкевич, Стрижова, 1966; Hardy, Cornu, 2006; Побединцева, 1975]. В средне- и мелкопылевой фракции накапливается Ti. В илистой фракции выявлено максимальное содержание Fe, Mn, Co, Ni, Cr, Pb, Zn, что соответствует данным [Титова с соавт., 1996; Huang et al, 2014; Hardy, Cornu, 2006].

Ряды кларков концентрации в гранулометрических фракциях, где подстрочная цифра – отношение среднего содержания элемента в гранулометрической фракции к кларку в верхней части земной коры, отражают степень фракционирования химических элементов. Здесь и далее в формулах жирным шрифтом даны элементы с $KK > 2$, курсивом – с $KK \leq 0,5$.

$G1 - Mn_{5,0}, Cu_{3,5}, Co, Pb_{1,9}, Fe_{1,6}, Zr_{1,0}, Zn_{0,9}, Ni_{0,8}, Ti, Cr_{0,5}$
 $G2 - Zr_{3,1}, Cu_{2,3}, Pb_{1,9}, Fe_{1,7}, Cr_{0,9}, Ni_{0,8}, Ti, Zn, Co_{0,7}, Mn_{0,6}$
 $G3 - Zr_{5,2}, Ti_{1,5}, Pb_{1,2}, Cu_{1,0}, Cr_{0,6}, Zn_{0,5}, Mn, Co_{0,3}, Fe_{0,2}, Ni_{0,1}$
 $G4+G5 - Zr_{3,3}, Pb_{2,2}, Ti, Cu_{1,9}, Zn_{1,2}, Cr_{0,6}, Mn, Co_{0,5}, Fe, Ni_{0,3}$
 $G6 - Cu_{4,1}, Mn, Pb_{3,5}, Zn_{2,8}, Co, Fe_{1,8}, Zr_{1,6}, Ni_{1,4}, Ti_{1,3}, Cr_{1,0}$

Во фракции крупного и среднего песка (G1) хорошо видна концентрация Mn и Cu, а также Co, Pb и Fe, носителями которых, очевидно, являются мелкие железо-марганцевые конкреции и пленки

Таблица 2

Среднее содержание металлов и коэффициенты латеральной дифференциации (L) в гумусовых горизонтах почв балки
Сенокосная: трансэлювиальные ландшафты (I) и склоны (II) правого борта, днище (III),
конус выноса (IV), мг/кг, Fe – %

Элемент	Чувствительность анализа, мг/кг	Элементарные ландшафты геоморфологических элементов балки				Кларк*	КК** в почвах I
		I $n=3$	II $n=3$	III $n=4$	IV $n=1$		
Cu	5	29,3/1***	31,0/1,1	28,3/1,0	32,0/1,1	27	1,1
Zn	30	86,7/1	83,3/1,0	77,5/0,9	90,0/1,0	75	1,2
Pb	4	33,0/1	31,7/1,0	29,8/0,9	26,0/0,8	17	1,9
Co	3	13,0/1	12,7/1,0	11,3/0,9	12,0/0,8	15	0,9
Ni	5	25,7/1	26,0/1,0	23,3/0,9	24,0/0,9	50	0,5
Cr	5	74,7/1	73,7/1,0	71,3/1,0	59,0/0,8	92	0,8
Mn	3	1153,3/1	966,7/0,8	1055/0,9	1600/1,4	770	1,5
Ti	30	5433,3/1	5566,7/1,0	5225/1,0	5300/1,0	3900	1,4
Zr	10	496,7/1	586,7/1,2	577,5/1,2	720/1,4	170	2,9
Fe	0,001	1,7/1	1,8/1,1	1,9/1,1	1,5/0,9	4,06	0,4

Примечание n – число проб.

*Кларки Fe, Mn, Ti, Cr, Ni, Zn, Pb по Н.А. Григорьеву (2009), Co, Cu – по Gao (2008), Zr – по А.П. Виноградову (1962), в верхней части земной коры.

**Отношение содержания элемента в почвах трансэлювиальных ландшафтов к его кларку.

***Перед косой чертой приведено абсолютное содержание элемента в данной почве, после черты – коэффициент латеральной дифференциации L : отношение содержания элемента в почве элементарного ландшафта геоморфологического элемента балки к его содержанию в почве трансэлювиального ландшафта окружающей территории. Точность данного вида анализа составляет ± 5 –10% для всех элементов.

[Kabata-Pendias, 2011]. В мелкопесчаной фракции (G_2) накапливается Zr, резко уменьшается содержание Mn и Co при слабо меняющемся содержании Cu, Pb и Fe, что отражает связь Cu и Pb с соединениями железа. В крупной пыли (G_3) концентрируются только элементы-литофилы – Ti и Zr, связанные с акцессорными минералами. Ni, Co, Zn рассеиваются из-за низкого содержания в этой фракции соединений Fe и Mn. Во фракции средней и мелкой пыли (G_4+G_5) начинает постепенно увеличиваться содержание тяжелых металлов – Pb, Cu, Zn, Ni. Илистая фракция (G_6) выступает сорбционным геохимическим барьером, на котором концентрируется большинство изученных металлов – Cu, Mn, Pb, Zn, Co, Fe и Ni.

Такое распределение металлов по гранулометрическим фракциям позволяет выделить крупную пыль (G_3) в качестве условно фоновой и «безбарьерной» фракции, в которой, очевидно, содержание минеральных фаз-носителей металлов минимально. Другие фракции из-за усиления барьерных, в основном, сорбционных свойств, являются концентраторами металлов (табл. 3). Отношение содержания металлов в остальных фракциях к G_3 характеризует степень контрастности их гранулометрического фракционирования и позволяет выделить парагенезисы элементов для отдельных фракций. В представленных рядах хорошо видны два фракционных «плеча» отношений Gn/G_3 :

$G1/G_3$ – Mn₁₅, Co₉, Fe, Ni_{6,5}, Cu_{3,8}, Zn_{2,1}, Pb_{1,5},
Cr_{0,9}, Ti_{0,3}, Zr_{0,2},
 $G2/G_3$ – Fe₇, Ni_{4,9}, Co, Cu, Mn₂, Zn, Pb, Cr_{1,2},
Zr, Ti_{0,5},
 $G4+G5/G_3$ – Ni_{2,7}, Zn, Cu_{2,5}, Co_{2,3}, Pb, Fe, Mn_{1,8},
Ti_{1,3}, Cr_{1,1}, Zr_{0,7},
 $G6/G_3$ – Mn_{13,1}, Fe, Ni_{8,5}, Co_{6,7}, Zn₆, Cu_{3,8}, Pb_{2,7},
Cr_{1,7}, Ti_{0,8}, Zr_{0,3}

Первое – это G_1 с группой элементов Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn и G_2 с аналогичной группой, но с более низкими коэффициентами концентрации. Второе – фракция G_6 , в которой, по сравнению с G_3 , активно накапливаются практически все изученные элементы, особенно Mn, Fe, Ni, Co, Zn, Cu и Pb, что отражает ее ярко выраженную «барьерность», связанную с высокими сорбционными свойствами илистых частиц.

Барьерность песчаной фракции G_1 , по-видимому, обусловлена сорбционными свойствами диоксида марганца, гидроксидов железа, встречающихся в крупных фракциях подзолистых почв в виде агрегированных масс, пленок и конкреций, а также сорбционными свойствами мономеров кремниевой кислоты, соосажающихся вместе с гидроксидами железа и повышающих сорбцию катионов некоторых тяжелых металлов [Янин, 2002; Kabata-Pendias, 2011].

Вариабельность содержания металлов (C_v) в фракциях уменьшается в ряду: песок→пыль→ил. Во

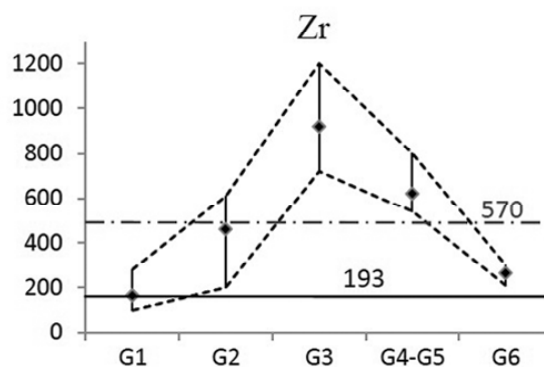
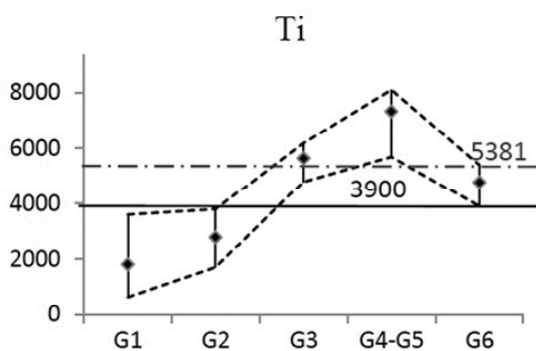
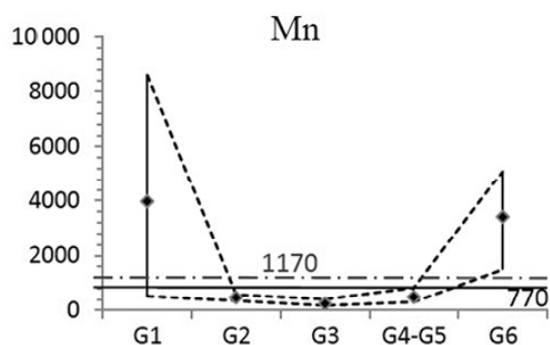
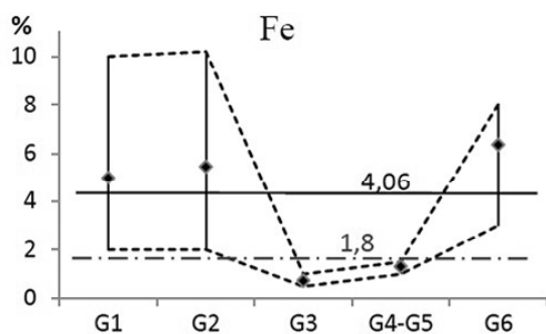
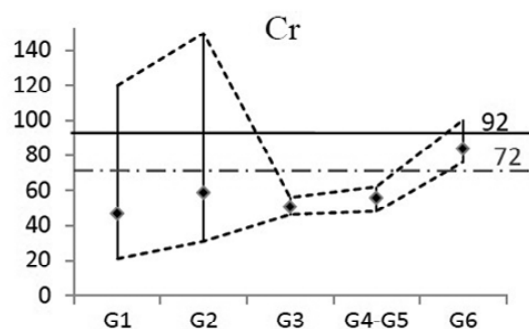
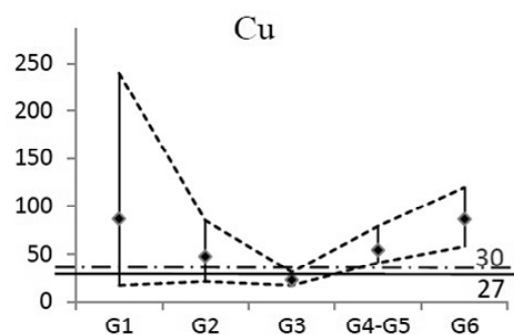
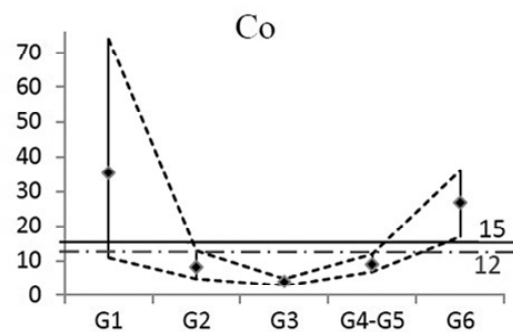
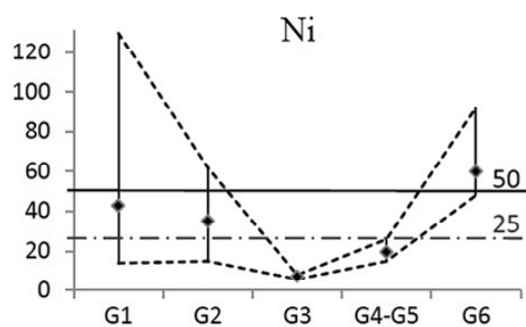
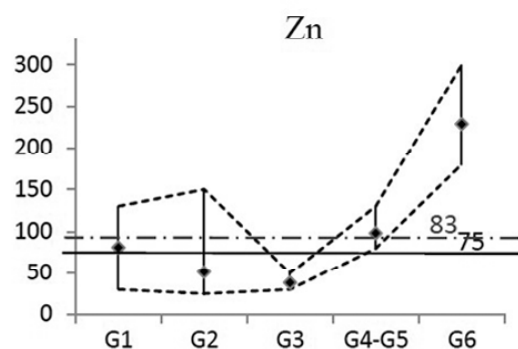
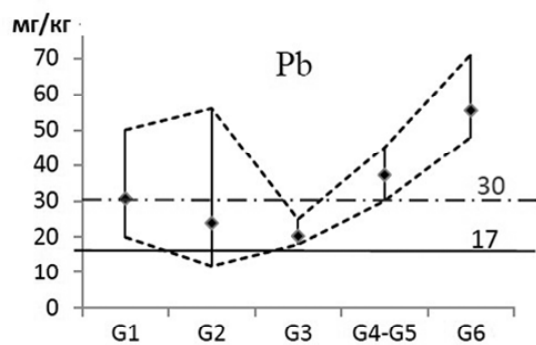


Таблица 3

Среднее содержание металлов в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов почв трансэлювиальных ландшафтов балки Сенокосная, правый борт (мг/кг, Fe вал – %)

Элемент	Гранулометрические фракции*				
	G1 1,7	G2 1,7	G3 62,6	G4+G5 24,7	G6 9,3
Cu	95,0	62,7	26,0	51,3	110,7
Zn	66,7	50,0	40,0	86,7	206,7
Pb	32,3	31,7	20,7	37,0	60,0
Co	28,7	10,0	4,0	7,7	27,7
Ni	40,0	39,7	7,3	16,0	69,7
Cr	45,0	80,0	50,7	52,3	89,3
Mn	3866,7	480,0	233,3	400,0	2733,3
Ti	2100	2700,0	5800,0	7433,3	5066,7
Zr	170,0	533,3	883,3	566,7	280,0
Fe, %	6,3	6,7	0,7	1,3	7,3

*Под индексом гранулометрической фракции приводится ее среднее содержание в почвах трансэлювиальных ландшафтов, %.

фракции крупного и среднего песка она максимальна для Cu, Co Ni, Fe, Mn, Ti, Zr; для Cu и Ni – превышает 75%, для Co, Fe, Mn – достигает 50% и лишь для Ti, Zr составляет ~40%. Во фракции мелкого песка значения *Cv* максимальны для Zn и Cr – более 60%, для Pb – около 50%. В пылеватых фракциях *Cv* для всех металлов значительно меньше и изменяется в интервале от 6% (Cr) до 23,5% (Zn). В илистой фракции *Cv* минимально для Ti, Zr, Pb – 9–12%; для остальных элементов вариabельность минимальна во фракции средней и мелкой пыли. Уменьшение вариabельности содержания элементов в тонких фракциях по сравнению с более крупными объясняется их относительно однородным минералогическим и химическим составом, что связано с преобладанием вторичных глинистых минералов.

Полученные данные о гранулометрическом фракционировании элементов – среднем содержании и вариabельности в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов почв – можно использовать в качестве фоновых при геохимической оценке антропогенного воздействия, в результате которого контрастность концентрации элементов в почвах, снежной и дорожной пыли увеличивается в десятки раз [Власов, Касимов, Кошелева, 2014].

Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв. Миграция элементов в ландшафтах определяется рядом почвенно-геохимических факторов: окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиями, содержанием органического вещества, минералогическим и гранулометрическим составом почв. Недостаточно исследовано гранулометрическое фракционирование металлов в почвенно-геохимических катенах и, тем более, в аренах – балках, речных долинах и др. Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях гумусового горизонта почв в системе: трансэлювиальные ландшафты → склоны → днище → конус выноса Сенокосной балки показано на рис. 4. Среднее содержание элементов в почвах трансэлювиальных ландшафтов при расчете коэффициентов латеральной дифференциации (*L*) принято за 1 и приведено в табл. 3.

Фракция крупного и среднего песка (G1). Для нее характерна наиболее контрастная латеральная дифференциация металлов с двумя зонами аккумуляции элементов: в днище, где накапливаются Ni_{1,6}, Zn, Cu, Cr, Co_{1,4} и на конусе выноса, где выше коэффициенты *L* Ti_{1,7}, Zr_{1,5}, а также и Pb_{1,3}, Zn и Co_{1,2}, по-видимому, из-за их сорбции оксидами Mn (*L*=1,2).

Рис. 3. Содержание элементов (мг/кг, Fe – %) в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов почв балки. Среднее арифметическое показано значком с заливкой, разброс содержаний – линией. Горизонтальной сплошной линией показано кларковое содержание элемента в верхней части континентальной земной коры. Пунктирной линией – среднее содержание элемента в почвенных пробах. По оси абсцисс – гранулометрические фракции, мм: G1 – 1–0,25; G2 – 0,25–0,05; G3 – 0,05–0,01; G4+G5 – 0,01–0,001; G6 – <0,001

Fig. 3. Metal concentrations (mg/kg, Fe – %) in the grain-size fractions separated from the humus horizons of balka soils. Arithmetic mean is indicated as solid diamond, minimum and maximum concentrations – as a vertical line. The horizontal solid line shows the clark content of an element in the upper part of the continental crust. The dashed line is the average content of an element in the bulk soil samples. X-line shows grain-size fractions, mm: G1 – 1–0,25; G2 – 0,25–0,05; G3 – 0,05–0,01; G4+G5 – 0,01–0,001; G6 – <0,001

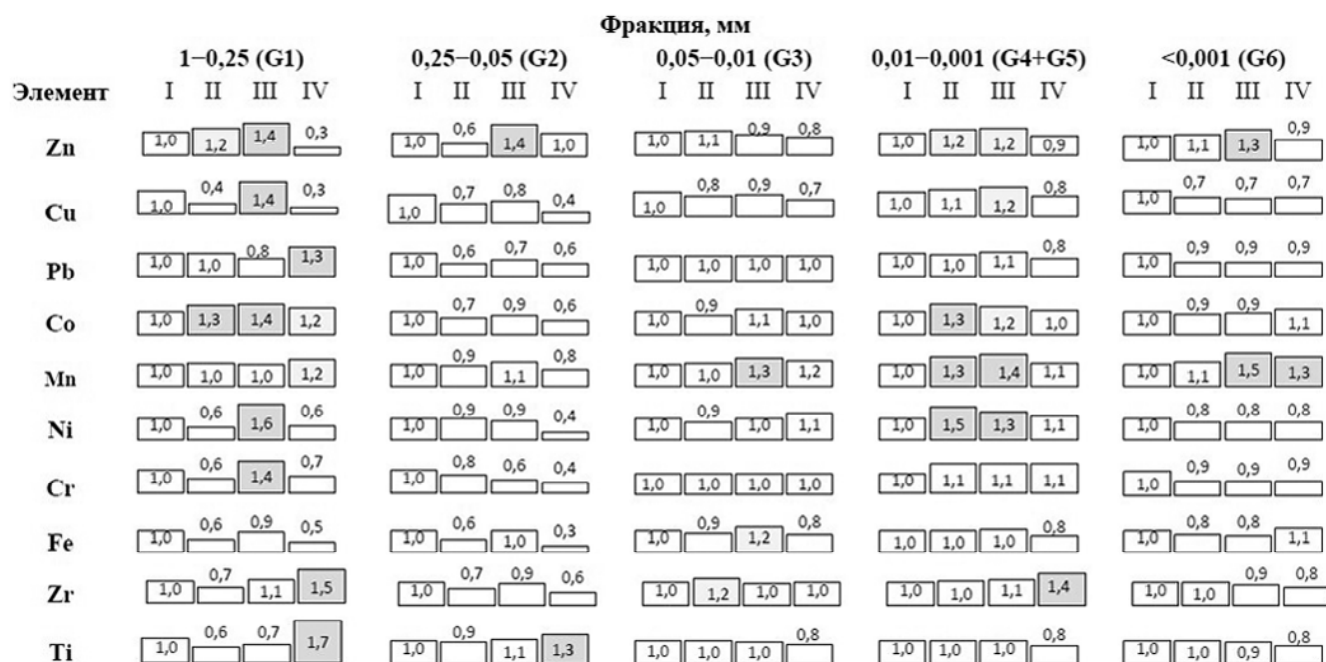


Рис. 4. Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях гумусового горизонта почв балки. L – коэффициенты латеральной дифференциации: I – трансэлювиальные ландшафты, II – склоны балки, III – днище балки, IV – конус выноса. Цифры – значения L

Fig. 4. Lateral distribution of metals in the grain-size fractions of the humus horizons of balka soils. L – lateral differentiation coefficients: I – trans-eluvial landscapes, II – the balka slopes, III – the balka bottom; IV – the detrital fan. The numbers show L values

Рассеиваются на склонах и конусе выноса $\text{Fe}_{0,5-0,6}$ и $\text{Co}_{0,3-0,4}$, то есть гидроксиды Fe не являются основной причиной дифференциации этих элементов. Ti и Zr накапливаются на конусе выноса, вероятно, в результате транспорта и выветривания почвенного материала, которые сопровождаются увеличением доли устойчивых акцессорных минералов за счет разрушения более легко выветривающихся [Шванов, 1987]. Нельзя также исключать, что изменение содержания металлов в этой фракции на конусе выноса связано не только с ее геохимической трансформацией, но и с генезисом – она входит в состав балочного аллювия, сформировавшегося за счет переотложения покровных суглинков, смытых с водосбора. Вдоль днища балки статистически значимо уменьшается содержание Ti и Zr, для остальных элементов линейные тренды не выявлены.

По сравнению с оврагом распределение Zn, Pb, Co, Mn, Ni, Cr во фракции G1 почв балки, существенно иное из-за ее различного генезиса в почвах внутренних частей оврага и балки; в овраге максимальное содержание этих элементов наблюдалось в почвах водосбора [Samonova et al., 2017].

Корреляционный анализ показал тесную положительную связь в следующих группах элементов: Cu–Ni–Cr–Fe; Pb–Mn–Co; Co–Zn–Mn; Zn–Cr, что, вероятно, обусловлено совместным их нахождением в минеральной и сорбированной оксидами и гидроксидами Fe и Mn форме [Kabata-Pendias, 2011]. Связь Mn и Co обусловлена сорбцией Co

минералами Mn, известно, что эти элементы – спутники в почвенных процессах [Зырин, Титова, 1979]. По Тайлору и Маккензи [цит. по Alloway, 1995], до 79% минеральных форм Co входит в состав или ассоциировано с оксидами Mn. Тесная положительная связь в парах Cu–Ni, Pb–Co, Ni–Cr в почвенной массе гумусовых горизонтов дерново-подзолистых почв на покровных и делювиальных суглинках описана в [Самонова, Кошелева, Касимов, 1998].

Фракция мелкого песка (G2). Относительно почв трансэлювиальных ландшафтов содержание металлов в этой фракции уменьшается, кроме $\text{Zn}_{1,4}$ в днище и $\text{Ti}_{1,3}$ на конусе выноса. Особенно низки L для $\text{Fe}_{0,3}$, Cu, Ni, $\text{Cr}_{0,4}$, Pb, Co, $\text{Zr}_{0,6}$ на конусе выноса, что, возможно, связано, как с геохимическим преобразованием этой фракции, так и сменой ее генезиса.

Для металлов в G2 почвы склонов транзитны. Достоверные линейные тренды в распределении металлов по днищу балки не выявлены. Отличие латеральной геохимической дифференциации фракции G2 от G1 заключается в более низком содержании большинства металлов в ее составе во внутренней части балки. Тесная положительная связь характерна для трех пар элементов: Cu–Ni; Cu–Fe; Ti–Zr. Общая черта песчаных фракций – корреляция Cu с Ni, отмечена ранее для почвенной массы гумусовых горизонтов почв лесной зоны [Самонова, Асеева, 2006].

Характер латеральной дифференциации металлов в составе данной фракции почв балки и оврага

одинаковый [Самонова, Касимов, Асеева, 2016], различие проявляется в более контрастном уменьшении их содержания на склонах оврага.

Фракция крупной пыли (G3). В этой фракции наименее контрастна дифференциация металлов: в подчиненных почвах значения L лежат в интервале 0,8–1,2, за исключением $Mn_{1,3}$, слабо концентрирующегося в днище, и $Cu_{0,7}$, активно выносящейся из почв конуса выноса. По днищу только содержание Cr достоверно увеличивается от верховьев к низовьям балки.

В почвах балки и оврага латеральное распределение металлов в составе фракции различно: во внутренней части оврага содержание большинства металлов увеличивается, контрастность дифференциации также больше в овраге [Самонова, Касимов, Асеева, 2016].

В G3 установлена тесная положительная связь между содержаниями Mn и Co и отрицательная – между Cu и Cr, что объясняется сходством поведения элементов в первой паре в почвенно-геохимических процессах [Alloway, 1995] и различиями – во второй. Cu активно участвует в биогеохимических процессах, а Cr – преимущественно в физико-химических и механических. Слабые связи между металлами во фракции крупной пыли отличают ее от других гранулометрических фракций, что косвенно подтверждает ее аллохтонное (золотое) происхождение.

Фракция средней и мелкой пыли (G4+G5). Латеральная дифференциация металлов в этой фракции по сравнению с крупной пылью более контрастна. В почвах склонов концентрируются $Ni_{1,5}$, Mn, $Co_{1,3}$, в днище – $Mn_{1,4}$, $Ni_{1,3}$, Zn, Cu, $Co_{1,2}$, то есть, содержание металлов во внутренней части балки больше, чем в почвах трансэлювиальных ландшафтов. В почвах конуса выноса рассеиваются Fe, Ti, Pb, $Cu_{0,8}$, слабо накапливается – $Zr_{1,4}$. Вдоль днища балки в составе фракции выявлены статистически достоверные тренды роста содержания Mn и Ti и уменьшения содержания Cu. В этой фракции статистически значимая положительная корреляция отмечается для Ni с Zn, Co с Cr.

В овраге установлена близкая по характеру и контрастности латеральная дифференциации содержания большинства металлов, что может свидетельствовать об общем ее генезисе в обеих системах.

Илистая фракция (G6). Относительно почв трансэлювиальных ландшафтов во внутренних частях балки концентрируется только Mn и Zn – в днище (с $L=1,5$ и $L=1,3$ соответственно) и на конусе выноса – Mn ($L=1,3$). Остальные элементы внутри балки распределены равномерно. Латеральная дифференциация содержания металлов в илистой фракции отличается низкой контрастностью, что, по-видимому, связано с ее более однородным минералогическим составом – преобладанием вторичных глинистых минералов с высокой сорбционной емкостью, обеспечивающей высокую концентрацию металлов в этой фракции (см. выше). Вдоль днища балки, от верховьев к низовьям, отрицательный ли-

нейный тренд прослеживается для Zr и Zn, а положительный – для Ni. В илистой фракции тесная положительная связь установлена для пар элементов: Fe-Co, Pb-Co, Pb-Ni, Pb-Cr, Ni-Cr. Тесная положительная связь Fe с Co в илистой фракции, Cr и Pb – в почвенной массе гумусовых горизонтов почв на покровных суглинках описана в [Самонова, Асеева, 2006]. Корреляция Ni с Cr связана, вероятно, с миграционными формами Fe, типоморфным элементом в почвах данных ландшафтов.

В данной фракции почв оврага описано аналогичное по характеру и коэффициентам латеральной дифференциации распределение всех металлов, кроме Zn и Mn. В отличие от днища балки, где эти элементы накапливаются, в днище оврага содержание Mn уменьшается, а Zn – не изменяется относительно трансэлювиальных ландшафтов.

Монолитность (суглинистые отложения) балочной почвенно-геохимической системы обусловила слабую контрастность латеральной дифференциации металлов, как в почвенной массе, так и в составляющих ее гранулометрических фракциях, за исключением песчаных на конусе выноса. Предположительно, это связано с тем, что песчаные фракции на конусе выноса входят в состав более древнего балочного аллювия, вскрытого вторичным овражным врезом, и имеют более низкое содержание металлов, чем в составе покровных суглинков водосбора.

Корреляционные связи между металлами в отдельных гранулометрических фракциях, как и в почвенной массе, вероятно, обусловлены их совместным нахождением в составе различных минералов или в подвижных фазах, например, в сорбированной форме.

Выводы:

– в гранулометрических фракциях почв балочной системы содержание металлов зависит от размерности частиц, определяющей их сорбционную емкость. Для илистой фракции характерно максимальное содержание Fe, Mn, Co, Ni, Cr, Pb, Zn. В средне- и мелкопылевой фракции накапливается только Ti. В крупнопылевой фракции содержание всех изученных металлов, кроме Zr, минимально. В некоторых пробах фракции крупного и среднего песка наблюдается максимально высокое содержание Fe, Mn, Co и Ni;

– латеральная дифференциация содержания металлов в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов почв балочной системы обусловлена их геохимической трансформацией в процессе механического перемещения от трансэлювиальных ландшафтов по склонам балки и вдоль днища. Контрастность распределения металлов снижается в ряду: крупный и средний песок – мелкий песок, средняя и мелкая пыль – илистая фракция – крупнопылевая фракция. Во фракции крупной пыли латеральное распределение металлов наиболее равномерное;

– крупная пыль (G3), характеризующаяся минимальным содержанием металлов и их равномер-

ным латеральным распределением в балочной системе, предлагается в качестве условно фоновой фракции для оценки накопления элементов в других фракциях.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия дорожной пыли (Восточный округ г. Москвы) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 3. С. 23–33.
- Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П., Ковач Р.Г. Латеральная миграция твердофазного вещества почв в пределах ландшафтно-геохимической арены (метод магнитного трассера) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1–12.
- Глазовская М.А., Касимов Н.С. Ландшафтно-геохимические основы мониторинга природной среды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1987. № 1. С. 11–16.
- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
- Евсеева Н.С., Квасникова З.Н. Водно-склоновые процессы на пахотных угодьях подтаежной зоны Западно-Сибирской равнины // Проблемы флювиальной геоморфологии. Ижевск, Ассоциация «Научная книга», 2006. С. 218–222.
- Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Батманова А.С., Алев В.В. Смыв почвы талыми снеговыми водами на склонах (по материалам стационарных наблюдений в Томской области) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 45–54.
- Еременко Е.А. Ложбинный мезорельеф центральных и южных районов Восточно-Европейской равнины: Автореф. дис. ... канд. геогр. н. М., 2009. 24 с.
- Зырин Н.Г., Титова А.А. Формы соединений кобальта в почвах // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 350–386.
- Комплексный анализ четвертичных отложений Сатинского учебного полигона / Под ред. Г.И. Рычагова, С.А. Антонова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 128 с.
- Муратов М.В. Об условиях образования суглинков в четвертичном периоде // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода, 1953, № 19.
- Побединцева И.Г. Почвы на древних корях 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 почвообразующих породах Центрального Черноземья // Вестн. ВГУ. Сер. Химия, биология, фармация. 2003. № 2. С. 164–171.
- 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. 2006. № 6. С. 67–74.
- Самонова О.А., Асеева Е.Н. Распределение металлов по гранулометрическим фракциям почв в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 32–39.
- Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н. Металлы в гранулометрических фракциях почв овражной системы (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 18–28.
- Самонова О.А., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Ассоциации микроэлементов в профиле дерново-подзолистых почв южной тайги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение, 1998. № 2. С. 14–19.
- Сысцев В.В. Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах на примере Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 4. С. 26–32.
- Титова Н.А., Травникова Л.С., Кахнович З.Н. и др. Содержание тяжелых металлов в гранулометрических и денсиметрических фракциях почв // Почвоведение. 1996. № 7. С. 888–898.
- Фузеина Ю.Н., Панин А.В. Морфология и возраст малых эрозионных форм в бассейне Средней Протвы // Междунар. вуз. координац. совещ. по проблеме эрозионных русловых и устьевых процессов. Псков, 13–15 окт. 1998 г. Псков. С. 161–163.
- 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. V. 161. № 1. P. 30–42.
- Alloway B.J. Heavy metals in soils. Blackie Acad. London, 1995. 368 p.
- 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. V. 133. № 3–4. P. 295–308.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chemical Geology. 2008. V. 253. Iss. 3–4. P. 205–221.
- 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. V. 264. P. 176–183.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants, 4th ed. CRC Press, Boca Raton, Boca Raton, London New York, 2011. 548 p.
- Panin A.V., Fuzeina Ju.N., Belyaev V.R., Long-term development of Holocene and Pleistocene gullies in the Protva River basin, Central Russia // Geomorphology. 2009. V. 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. V. 144. P. 247–259.
- Samonova O.A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S. Metals in 1–0,25 mm grain-size fraction in the soils of the mixed forest zone of the Russian plain // J. Geochem. Explor. 2017, V. 184, P. 381–393. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.07.020.
- Thorne L.T., Nickless G. The relation between heavy metals and particle size fractions within the Severn Estuary (UK) intertidal sediments // Science of the Total Environment. 1981. V. 19(3). P. 207–213.

Поступила в редакцию 05.03.2018
Принята к публикации 20.07.2018

O.A. Samonova¹, E.N. Aseyeva², N.S. Kasimov³,

**DISTRIBUTION OF METALS IN THE GRANULOMETRIC FRACTIONS
OF A BALKA SOIL-GEOCHEMICAL SYSTEM
(SOUTH-EASTERN PART OF THE SMOLENSK-MOSCOW UPLAND)**

Concentrations and 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 were studied in a balka system located in the Central Protva River basin. The levels of metal concentrations are determined by the particle size: Ti, Zr and Cr are at their lowest values in the coarse and medium sand; the coarse silt fraction is enriched in Zr, while Fe, Mn, Co, Ni, Zn, Pb, Cu show their minimal values in this fraction; the medium and fine silt shows the highest levels of Ti and the clay fraction the highest mean concentrations of Fe, Mn, Co, Ni, Cr, Pb, Zn. The variability in the concentrations of the majority of metals decreases from sand to silt and clay fractions. The lateral distribution of metals in the grain-size fractions is related to their geochemical transformation during the process of migration from the trans-eluvial landscapes of adjacent areas along the slope and bottom of the balka system, from the upper to lower reaches. In coarse and medium sand, the highest concentrations of metals, except Fe, are found in soils of the bottom or the detrital fan. In fine sand metals other than Zn and Ti are concentrated in soils of trans-eluvial landscapes. In medium and fine silt all metals, except Fe, Zr and Ti, accumulate in soils of the balka slope and bottom. In clay fraction Zn and Mn concentrate in soils of the balka bottom, while other elements in soils of trans-eluvial landscapes. The lateral distribution of the majority of metals is the most uniform in coarse silt fraction. The concentrations of some elements decrease down the balka bottom: Ti and Zr – in coarse and medium sand, Cu – in medium and fine silt, Zr and Zn – in clay fraction; the increase of concentrations was revealed for Cr in coarse silt, Mn and Ti in medium and fine silt and Ni in clay fraction.

Key words: metals, humus soil horizons, granulometric fractions, physical migration, lateral distribution.

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Geographical Society and the Russian Foundation for Basic Research (grant № 17-05-41036).

REFERENCES

- Acosta J.A., Martinez-Martinez S., Faz A., Arocena J. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials // *Geoderma*. 2011. V. 161. № 1. P. 30–42.
- Alloway B.J. Heavy metals in soils. Blackie Acad. London, 1995. 368 p.
- Dobrovolskij V.V. Geografiya mikroelementov. Globalnoe rasseyanie [Geography of trace elements. Global dispersion]. Moscow: Mysl', 1983. 272 p. (in Russian).
- Eremenko E.A. Lozhbinnyj mezorelef centralnyh i yuzhnyh rajonov Vostochno-Evropejskoj ravniny [Hollow mesorelief of the central and southern regions of the East European Plain] Synopsis of the PhD theses. Moscow, 2009. 24 p. (in Russian).
- Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N. Vodno-sklonovye processy na pahotnyh ugodyah podtaezhnoj zony Zapadno-Sibirskoj ravniny [Water-slope processes on arable lands of the subtaiga zone of the West Siberian Plain] // *Problemy flyuvialnoj geomorfologii*. Izhevsk: Associaciya «Nauchnaya kniga». 2006. P. 218–222 (in Russian).
- Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Batmanova A.S., Aleev V.V. Smyv pochvy talymi snegovymi vodami na sklonah (po materialam stacionarnykh nablyudenij v Tomskoj oblasti) [Soil washoff with snowmelt water on the slopes (based on the materials of stationary observations in the Tomsk region)] // *Geomorfologiya*. 2016. № 1. P. 45–54 (in Russian).
- Förstner U. Chemical forms of metal accumulation in recent sediments // *Ore genesis*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 191–199.
- Fuzeina Yu.N., Panin A.V. Morfologiya i vozrast malych erozionnyh form v bassejne Srednej Protvy [Morphology and age of small erosion forms in the Middle Protva River basin] // *Mezhdunar. vuz. koordinac. soveshh. po probleme erozionnyh ruslovnyh i ustevykh processov*. Pskov, 13–15 october 1998. P. 161–163 (in Russian).
- Gennadiyev A.N., Koshovskij T.S., Zhidkin A.P., Kovach R.G. Lateralnaya migraciya tverdogaznogo veshhestva pochv v predelakh landshaftno-geokhimicheskoj areny (metod magnitnogo trassera) [Lateral migration of solid phase soil material within the landscape-geochemical arena (the method of magnetic tracer)] // *Pochvovedenie*. 2013. № 10. P. 1–12 (in Russian).
- Glazovskaya M.A., Kasimov N.S. Landshaftno-geokhimicheskie osnovy monitoringa prirodnoj sredy [Landscape-geochemical bases of environmental monitoring] // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 1987. № 1. P. 11–16 (in Russian).
- Golosov V.N. Eroзионно-akkumulyativnye processy v rechnykh bassejnakh osvoennykh ravnin [The erosional and accumulative processes in river basins of cultivated plains]. Moscow: GEOS, 2006. 296 p. (in Russian).
- Grigorev N.A. Raspredelenie himicheskikh elementov v verhnjej chasti kontinentalnoj kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 382 p. (in Russian).
- Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation // *Geoderma*. 2006. V. 133. № 3–4. P. 295–308.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: oasamonova@mail.ru

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

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Academician of RAS, D.Sc. in Geography; *e-mail*: nskasimov@mail.ru

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

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. V. 264. P. 176–183.

Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants, 4th ed. CRC Press, Boca Raton, Boca Raton, London–New York, 2011. 548 p.

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).

Muratov M.V. Ob usloviyah obrazovaniya suglinkov v chetvertichnom periode [On the conditions of loam formation in the Quaternary period] // *Byul. Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 1953. № 19 (in Russian).

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

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 rasseyannye elementy (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) v pochvoobrazuyushhiih porodah Centralnogo Chernozemya [Rare and trace elements (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) in parent materials of the Central Chernozemic Belt region], *Vestnik VGU, serija Himija, biologija, farmacija*. 2003. № 2. P. 164–171 (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. V. 144. P. 247–259.

Samonova O.A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S. Metals in 1–0,25 mm grain-size fraction in the soils of the mixed forest zone of the Russian plain // *J. Geochem. Explor.* 2017, V. 184, P. 381–393. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.07.020.

Samonova O.A., Aseyeva E.N. Geohimicheskaya transformaciya pokrovnyh i morenyh suglinkov bassejna Srednej Protvy v processe pochvoobrazovaniya [Geochemical transformation of mantle and moraine loams in the process of soil formation in the Central Protva River basin] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2006. № 6. P. 67–74 (in Russian).

Samonova O.A., Aseyeva E.N. Raspredelenie metallov po granulometricheskim frakcijam pochv v yugo-vostochnoj chasti Smolensko-Moskovskoj vozvyshennosti [The distribution of metals in grain-size fractions of soils in the southeastern part of the Smolensk-Moscow Upland] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2008. № 3. P. 32–39 (in Russian).

Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseyeva E.N. Metally v granulometricheskix frakcijah pochv ovrazhnoj sistemy (Yugo-Vostochnaya chast Smolensko-Moskovskoj vozvyshennosti) [Metals in grain size fractions of a gully system (the south-eastern part of Smolensk–Moscow Upland)] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2016. № 3. P. 18–28 (in Russian).

Samonova O.A., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Associacii mikroelementov v profile derno-podzolistykh pochv yuzhnoj tajgi [Association of microelements in the profile of sod-podzolic soils of southern taiga] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*. 1998. № 2. P. 14–19 (in Russian).

Sysuev V.V. Georadarnye issledovaniya polimasshtabnyh struktur v landshaftah na primere Smolensko-Moskovskoj vozvyshennosti [Georadar research of multiscale structures in landscapes (case study of Smolensk-Moscow Upland)] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2014. № 4. P. 26–32.

Thorne L.T., Nickless G. The relation between heavy metals and particle size fractions within the Severn Estuary (UK) intertidal sediments // *Science of the Total Environment*. 1981. V. 19(3). P. 207–213.

Titova N.A., Travnikova L.S., Kahnovich Z.N. *et al.* Soderzhanie tyazhelyh metallov v granulometricheskix i densimetricheskix frakcijah pochv [The content of heavy metals in soil grain size fractions] // *Pochvovedenie*. 1996. № 7. P. 888–898.

Received 05.03.2018

Accepted 20.07.2018