—— ХИМИЯ ПОЧВ —

УДК 550.42:631.4(470.312)

МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ МАЛОГО ВОДОСБОРА ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ (СРЕДНЕРУССКАЯ ВОЗВЫШЕННОСТЬ)*

© 2015 г. О. А. Самонова, А. Н. Геннадиев, Т. С. Кошовский, А. П. Жидкин

Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы e-mail: oasamonova@mail.ru, tkzv@ya.ru Поступила в редакцию 21.07.2014 г.

Изучено пространственное распределение содержания Mn, Cu, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Mo, Ti, Zr, Fe, гранулометрических фракций и гумуса в поверхностном горизонте почв малого водосбора в бассейне р. Локна (Тульская обл.). Зависимость между этими показателями охарактеризована статистическими методами. Выявлено слабое изменение гранулометрического состава гумусовых горизонтов почв по геоморфологическим элементам данного водосбора. В почвах выпуклых склонов водосбора, а также в днище балки относительно автономных позиций наблюдается увеличение содержания большинства изученных металлов. Выявлены положительные корреляционные связи количества Со, Mn, Zr, Mo, в меньшей степени Zn, Pb с песчаными и крупнопылеватой фракциями, для Ni, Cr, Ti, Fe корреляционные связи с гранулометрическими фракциями не установлены.

Ключевые слова: гранулометрические фракции, гумус, распределение, почвы малых водосборов, автокорреляция.

DOI: 10.7868/S0032180X15060106

ВВЕДЕНИЕ

Анализ почвенно-геохимической структуры территорий является одной из важных составных частей комплексных физико-географических и экологических исследований различного уровня. Основным методом анализа служит катенарный, включающий изучение морфологического строения представительных почвенно-геохимических катен, особенностей распределения в них химических элементов и соединений с помощью коэффициентов радиальной и латеральной дифференциации.

Дифференциация валовых содержаний металлов и подвижных форм их соединений в различных типах почв и корреляционная связь с физико-химическими свойствами, почвообразовательными процессами изучаются на протяжении многих десятилетий. Результаты этих исследований подробно описаны [5, 8–11, 13, 18, 19–21].

Распределение химических элементов (в данном случае металлов) в системах более сложного уровня организации, чем катены, например, бассейновых каскадных ландшафтно-геохимических системах, функционирующих в различных природных обстановках, слабо отражено в литературе. Актуальность таких исследований имеет практическое значение: депрессии рельефа, к которым относятся балки, часто служат для сброса загрязняющих веществ, дальнейшее поведение которых определяет эколого-геохимическое состояние территории.

Малые водосборы (малые ландшафтно-геохимические арены и т. д.) можно рассматривать как элемент каскадной системы более высокого порядка – речного бассейна. В связи с этим их геохимические параметры — важная составная часть характеристики геохимической структуры речного бассейна. Малые водосборы как целостные миграционные системы с геохимических позиций изучены слабо, имеются лишь единичные работы [13, 15]. В работах [3, 4] проанализирована латеральная миграция твердофазного вещества почв на основе площадного распределения сферических магнитных частиц, как трассеров массопереноса, а в [16] приведена оценка распределения валовых содержаний металлов, а также подвижных форм их соединений в балочных системах. В этих исследованиях [3, 16] использован катенарный метод анализа в отличие от работ [13, 15], где применяли методику, заключающуюся в отборе почвенных проб по катенам, а статистическая обработка результатов химических анализов выполнена с учетом их принадлежности к геоморфологическим элементам водосбора.

^{*} Химико-аналитические и полевые исследования выполнены при финансовой поддержке гранта НШ-1689.2014.5 и проекта РФФИ №13-05-00098.

Цель статьи — анализ пространственного распределения почвенно-геохимических параметров: содержания гранулометрических фракций, гумуса, валовых форм Ti, Zr, Mn, Co, Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Mo в поверхностном горизонте почв малого водосбора, выявление зависимостей между этими показателями статистическими методами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Малый водосбор первого порядка (малая эрозионная форма, балка) расположен в Плавском рне Тульской обл. и имеет длину около 1100 м; направление главной эрозионной формы восточное (рис. 1). Соответственно, экспозиция склонов, опирающихся на балку, является южной, восточной, северной и переходными между ними вариантами; склоны западной экспозиции отсутствуют, так как в этой части водосбора находится устье – место впадения в более крупную форму – основную балку. Форма балки вытянутая несимметричная, каплевидная: у истока балки ширина водосбора максимальна и достигает 800-900 м, при приближении к устью ширина уменьшается до 300 м. Длина водосбора с запада на восток составляет 1.6 км; площадь бассейна балки — 0.96 км². Территория бассейна балки полностью распахана, за исключением самой балки и прилегающих к ней крутых склонов. Бровка водосбора на склоне имеет четкие, пространственно локализованные границы, они преимущественно совпадают с границей пашня-луг.

Преобладающими почвами на территории микроарены являются агрочерноземы глинисто-иллювиальные оподзоленные (Chernic Luvic Phaeozems); меньшие площади занимают агрочерноземы глинисто-иллювиальные типичные (Luvic Chernozems Anthric), черноземы глинисто-иллювиальные типичные (Luvic Chernozems) на нераспахиваемых участках, текстурно-дифференцированные почвы: серые (Luvisols), темно-серые (Greyic-Luvic Phaeozems) и агротемно-серые (Greyic Luvic Phaeozems Anthric), агроземы глинисто-иллювиальные (Luvic Phaeozems Anthric) и агроземы темные аккумулятивно-карбонатные (Phaeozems Anthric) и стратоземы темногумусовые на погребенной почве (Mollic Phaeozems Colluvic) [7, 22]. Подробное описание морфологических профилей изученных почв приведено ранее [3], а на рис. 1 представлена почвенная карта исследованной территории.

Для изучения параметров механической миграции почвенного материала в пределах малого водосбора пробы отбирали из пахотного горизонта (0–25 см) по четырем катенам, заложенным по максимальному падению высот от нескольких водораздельных позиций до днища балки. По катенам отобрали 38 проб, по днищу – 5 проб, на водораздельной поверхности – 10 проб. Таким образом, опробованы агрочерноземы глинистоиллювиальные оподзоленные (26 проб) и агрочерноземы глинисто-иллювиальные типичные (12 проб), темно-серые (2 пробы), агроземы глинисто-иллювиальные (8 проб), стратоземы темногумусовые (5 проб).

В 53 пробах из поверхностных горизонтов почв выполнили гранулометрический анализ пирофосфатным методом в химической лаборатории Института географии РАН (Москва). Содержание Mn, Cu, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Mo, Ti, Zr, Fe определяли спектральным атомно-эмиссионным методом просыпки в трехфазной дуге на приборе ДФС-458 в Бронницкой геолого-геохимической экспедиции ФГУП "Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов". Содержание гумуса (по методу Тюрина со спектрофотометрическим окончанием по Орлову-Гриндель) определяли в химической лаборатории географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Выборки для статистической обработки формировали в соответствии с принадлежностью к геоморфологическим элементам малого водосбора: автономным субгоризонтальным, трансэлювиальным с различным углом наклона, трансаккумулятивным (днище).

Для содержаний гранулометрических фракций, валовых содержаний металлов, гумуса рассчитывали основные статистические показатели: среднее арифметическое значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Проверку соответствия полученной выборки нормальному закону распределения проводили с использованием критериев Колмогорова-Смирнова и Уилко-Шапиро [12]. В случае принятия гипотезы о несущественности различий с нормальным законом распределения для сравнения выборок применяли дисперсионный анализ (ANOVA), в противном случае использовали непараметрические критерии (Манна-Уитни и Краскал-тесты). В исследуемых выборках нормальным законом распределения с уровнем значимости 0.05 аппроксимируется содержание Mn (*P* = 0.44 для критерия Шапиро-Уилка), Pb (*P* = 0.41), Ni (*P* = 0.19), Cr (*P* = 0.15), Со (P = 0.06). Критерий Колмогорова—Смирнова является значимым при проверке на соответствие нормальному закону распределения содержания Zr, Ti, Mn, Cr, Ni, Co, Pb (*P* > 0.2). Для элементов Mo, Zn, Fe распределения в изученных образцах не подчинялись этим законам.

Связь химического и гранулометрического состава в почвах балки оценивали с помощью коэффициента линейной корреляции Пирсона, а наличие или отсутствие пространственных линейных трендов в изменении химических и гранулометрических показателей по длине донных частей балки с использованием коэффициента корреляции Спирмена. Связи считались значимыми при дове-



Рис. 1. Карта-схема участка исследования. Единицы геоморфологического деления: А – распаханные территории: *I* – водораздельные автономные субгоризонтальные позиции (0°–1°); *2* – верхняя часть склонов (1°–2°); *3* – средняя часть склонов (2°–3°); *4* – нижняя часть склонов (3°–6°); 5 – нижняя часть склонов (6°–12°); Б – залуженные и залежные склоны балки: *6* – залежь, пологие и покатые участки склонов (2°–3°); 7 – залежь, крутые участки склонов (6°–12°); *8* – луг, крутые участки склонов (5°–12°); В – днище балки: *9* – залежная часть; *10* – залуженная часть, крутизна (1°–3°). Точки отбора проб: а – по катенам; b – по днищу, с – на площадке по спирали. Почвенный покров: I –текстурно-дифференцированные: 1 – серые типичные; 2 – темно-серые типичные и постагрогенные; 3 – агротемно-серые; II – черноземы глинисто-иллювиированные: 4 – оподзоленные постагрогенные среднемощные; 5 – типичные мощные и сверхмощные; 8 – гумусово-стратифицированные сверхмощные; IV – агроземы темные глинисто-иллювиированные: 9 – оподзоленные мало- и среднемощные; 10 – типичные мало- и среднемощные; 11 – постагрогенные средне мелкие; V – агроземы темные аккумулятивно-карбонатные: 12 – мицелярные среднем мелкие; VI – стратифицированные: 13 – стратоземы темногумусовые постагрогенные; 14 – стратоземы темногумусовые. Сплошные горизонтали проведены через 2 м.

рительной вероятности P = 0.95 (четкие пространственные тренды, значимая корреляция показателей, вероятность принятия статистических гипотез). Кластерный анализ для объединения групп элементов, обладающих сходным поведением в почвах данных ландшафтов, проводили с использованием метрики: 1 – *r*, где *r* – коэффициент корреляции Пирсона; правило объединения – метод полной связи (Complete Linkage).

Оценку латеральной дифференциации содержаний металлов в гранулометрических фракциях почв элементарных ландшафтов малого водосбо-

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 6 2015

САМОНОВА и др.

	Автономные, <1°, <i>n</i> = 20		Трансэлювиальные, части склона					Трансаккуму-		Общая		
Параметр			верхняя, $1^{\circ}-2^{\circ}$, n = 12		средняя, $2^{\circ}-3^{\circ}$, n=8		нижняя, 3°—12°, <i>n</i> = 4		лятивные, дни- ще, 1°–2°, <i>n</i> = 9		выборка, <i>n</i> = 53	
	т	V	т	V	т	V	т	V	т	V	т	V
Гранулометрическая фракция (мм), %												
1-0.25	0.06	38.4	0.04	36.2	0.07	81.8	0.06	44.1	0.11	176.0	0.07	249.8
0.25-0.05	0.14	56.1	0.20	84.7	0.11	98.4	0.07	45.8	0.12	193.2	0.13	231.0
0.05-0.01	45.0	2.2	44.1	3.2	44.6	2.4	44.5	5.2	45.6	10.3	44.7	6.4
0.01-0.005	11.9	9.0	12.6	8.3	11.8	9.0	11.0	15.1	12.3	9.1	12.0	9.4
0.005-0.001	16.4	11.7	15.5	5.8	16.0	10.4	13.0	7.3	14.2	14.7	15.0	13.6
< 0.001	26.6	8.3	27.6	3.1	27.4	8.7	31.4	2.2	27.7	15.7	28.1	10.1
Гумус, %	6.00	12.4	6.15	9.0	6.28	9.4	4.54	27.7	6.51	7.3	5.90	13.2
Металл, мг/кг												
Cu	36	10.4	36	7	32	5.2	33	1.7	37	9.1	35	9.7
Zn	51	25.6	66	16.9	59	10.9	60	16.7	61	11.2	58	21
Pb	29	12.4	33	8.4	31	8.7	30	6.7	31	7.3	31	10.8
Co	14	16.6	16	8.3	17	10.2	17	5.9	16	13.1	15	14.4
Мо	2	19.3	2	24.8	2	31.8	2	0	2	20.4	2	22
Ni	33	16.7	35	10.2	33	7.8	39	9.1	36	16.3	34	14
Cr	80	15.4	86	14.7	96	6.7	86	2.4	89	19.2	86	15.1
Mn	550	15.4	586	10.6	583	7.3	543	14.1	556	13.8	564	12.8
Ti	6262	16.3	6300	17.4	7500	10.6	5633	10.7	6171	17.7	6413	16.9
Zr	534	18.7	543	11.5	551	9.4	573	8.6	531	8.7	541	13.9
Fe, %	3.6	12.3	4.2	14.2	3.6	12.2	4	0	3.8	7.1	3.8	13.3

Таблица 1. Среднее содержание (*m*) гранулометрических фракций, гумуса и металлов в гумусовом горизонте почв геоморфологических элементов малого водосбора (*V* – коэффициент вариации, *n* – число проб)

ра выполняли с использованием варианта коэффициента латеральной дифференциации (*L*), равного отношению среднего содержания элемента в данной выборке (трансэлювиальные, днище) к его содержанию в почвах автономных (субгоризонтальных) ландшафтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав. Гумусовые и агрогумусовые горизонты почв водосбора имеют тяжелосуглинистый крупнопылеватый гранулометрический состав (табл. 1). Распределение гранулометрических фракций по геоморфологическим элементам малого водосбора характеризуется слабой контрастностью. На склонах относительно автономных позиций уменьшается содержание тонкой пыли и возрастает количество мелкопесчаной и илистой фракций, а в днище балки наблюдается слабое накопление фракции крупного и среднего песка, крупнопылеватой фракции и рассеяния — тонкопылеватой. Содержание фракции ила максимально на более крутых, задернованных, нижних частях склонов балки. Подобные тренды могут быть связаны с выносом тонких фракций в форме взвеси на участках с интенсивными поверхностно-водными потоками и аккумуляцией на задернованных склонах.

Вдоль днища, от верховьев к низовьям прослеживаются значительные колебания содержания гранулометрических фракций в почвенной массе поверхностного горизонта: увеличивается количество песчаной фракции ближе к устью балки; слабо уменьшается количество тонкой пыли (рис. 2). Отмечен рост содержания илистой фракции при расширении днища балки по мере уменьшения ее уклона.

Гумус. Распределение гумуса в пахотном горизонте почв малого водосбора равномерное. Со-



Рис. 2. Распределение гранулометрических фракций в почвах днища балки от верховья к устью: *1* – песок; *2* – крупная пыль; *3* – средняя пыль; *4* – мелкая пыль; *5* – ил.

держание гумуса на водораздельной автономной и слабонаклонной трансэлювиальной позициях близко к среднему по водосбору. Наибольшие величины характерны для почв днища балки. В почвах крутых склонов содержание гумуса значительно уменьшается, здесь же наблюдается увеличение вариабельности этого показателя.

Металлы. Среднее содержание металлов в поверхностном горизонте почв малого водосбора рассчитано для выборок, сгруппированных в соответствии с их приуроченностью к отдельным геоморфологическим элементам малого водосбора, и сформирована общая выборка. Различия между полученными значениями и результатами других исследователей [1, 2, 5, 6, 11] дифференцированы по элементам. Для всех металлов, кроме Ті и Zr, они почти полностью совпадают с каким-либо содержанием из представленных литературных источников, что подтверждает природную вариабельность концентраций металлов в почвах одного типа с близким гранулометрическим составом. Использование различных методов анализа содержаний металлов в цитируемых работах также влияет на абсолютные величины. Концентрация Ті в изученных почвах на 30-50% больше, чем в аналогичных [11], и на 50-70% - выше кларка литосферы [2]; содержание Zr почти в 2 раза, а Pb в 3 раза превышает кларк в почвах [1].

Для определения значимости различий содержания металлов в почвах элементарных ландшафтов микроарены использовали однофакторный

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 6 2015

дисперсионный анализ (ANOVA). Значимая зависимость концентрации элементов в гумусовых горизонтах почв от положения в различных элементарных ландшафтах выявлена для Cu, Zn, Pb, Co и Fe, в меньшей степени — для Cr. Содержание Mo, Ni, Mn, Ti и Zr не обнаруживает значимой зависимости от положения почв в геохимических позициях микроарены. По разностям почв статистически значимых различий по содержанию элементов в гумусовых горизонтах не выявлено.

Содержание металлов в системе автономные ландшафты-пологие склоны-крутые склонынижняя часть склонов-днище дифференцированы слабо, однако основные тренды можно выделить. Для всех изученных металлов, кроме Си и Мо, характерно увеличение содержания в почвах пологих склонов (относительно автономных позиций), по интенсивности накопления элементы образуют следующий ряд (в скобках приведена доля увеличения, %): Zn (29.4) > Fe (16.7) > Co (14.3) > Pb (13.7) > Mn, Ni, Cr (6-7) > Zr (1.6) > Ti(0.6). Для Zn, Fe, Co, Pb эти цифры превышают коэффициент вариации в почвах пологих склонов и, следовательно, могут считаться значимыми. На крутых склонах продолжается тенденция роста содержания для Со, Сг, Ті, Zr; количество Cu, Zn, Pb, Ni, Mn, Fe уменьшается относительно пологих склонов. Сравнение содержания металлов в автономных почвах и в днище показывает его рост во втором случае для всех металлов, кроме Мо, Ті и Zr. Соответствующий ряд выглядит



Рис. 3. Распределение содержания металлов в почвах днища балки от верховья к устью.

так: Zn (19.6) > Co (14.3) > Cr (11.3) > Ni (9.0) > > Pb (6.8) > Fe (5.5) > Cu (2.7) > Mn (1.0). Таким образом, тенденция накопления металлов на пологом склоне проявляется более четко, чем в днище. Это можно объяснить уменьшением скорости механической миграции на выпуклой части (пологой) склона, и слабым ростом количества илистых и мелкопесчаных частиц, что в комплексе приводит к увеличению содержания большинства изученных металлов. В днище водосбора, где происходит не только накопление почвенного материала, приносимого со склонов, но и его перемещение от верховьев к низовьям, аккумулятивный эффект для металлов проявляется слабее, чем на пологих склонах.

Вдоль днища, от верховья к устью, наблюдается рост содержания Zr и Ti (рис. 3), что коррелирует с характером распределения песчаной фракции, которая содержит минералы (циркон, ильменит), устойчивые к выветриванию [17]. Выявлено также рассеяние Mn и Ni, в меньшей степени Cr, на поведение которых, вероятно, влияет распределение фракции тонкой пыли (рис. 2).

Слабая контрастность латеральной дифференциации металлов в почвах по геоморфологическим элементам водосбора обусловлена однородностью окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий в его пределах. Нейтральная и слабощелочная реакция почвенного раствора в гумусовых горизонтах почв определяет преобладание нерастворимых форм металлов. Максимальная вариабельность содержания металлов выявлена в почвах автономных ландшафтов (пологие склоны междуречья), а минимальная — на крутых склонах, у подножья. Вероятно, это связано с меньшей вариабельностью содержания тонкопылеватой и илистой фракций в почвенном материале у подножья склона.

Детальность опробования почв в катене 4, отобранных с интервалом 25 м, позволила оценить природную пространственную изменчивость содержания металлов в данной каскадной ландшафтно-геохимической системе. Высокочастотное опробование позволяет выявить характер переходов между элементарными ландшафтами (плавные или скачкообразные), определить зависимость содержания от пространственного положения (рис. 4).

Изменчивость содержания металлов по катене оценивали с использованием автокорреляционных функций [12]. Сдвиг пространственного ряда проводился от автономной позиции. Полученные корфелограммы указывают на высокие значения коэффициента автокорреляции на протяжении до 15-го лага для элементов Со, Zn, Pb и Cr (рис. 5A, 5Б), изменение коэффициента происходит плавно. Это свидетельствуют о существенной и высокой роли геоморфологического фактора – положения в катене – на содержание указанных элементов; их распределение не может быть описано только случайным варьированием (природной вариабельностью или аналитической погрешностью). Значимый коэффициент корреля-



Рис. 4. Распределение содержания металлов в пахотном горизонте почв вдоль катены 4 (от водораздела к днищу).

ции между содержанием элемента и крутизной склона характерен только для Со, содержание остальных элементов четко не связано с этим показателем. Содержание металлов в почвах сопряженных элементарных ландшафтов изменяется постепенно. Для Ni (рис. 5B), Ti, Cu, Mo и Zr пространственный ряд не обладает статистически значимыми коэффициентами автокорреляции, что свидетельствует об отсутствии зависимости между их содержаниями и положением в катене.

Группы металлов. Корреляционный анализ позволил выделить группу элементов (Со, Mn, Zr, Mo), имеющую значимую положительную корреляцию с песчаными и крупнопылеватой фракциями (табл. 2); во фракции мелкого песка к ним присоединяется Pb, а во фракции круп-

Таблица 2.	Корреляционные	связи металлон	в с гранулс	метрическими	фракциями	в поверхностном	горизонте
почв малог	о водосбора						

Гранулометрическая фракция, мм	Элементы и коэффициенты корреляции с гранулометрической фракцией
1.0-0.25 (крупный и средний песок)	$Co_{0.8} > Mn_{0.7} > Zr, Mo_{0.4}^*$
0.25-0.05 (мелкий песок)	$Co_{0.8}$ >Mn _{0.7} >Zr, Mo _{0.4} >Pb _{0.3}
0.05-0.01 (крупная пыль)	$Mn_{0.5}$ > Co, $Zr_{0.4}$ > Zn, $Mo_{0.3}$
0.01-0.005 (средняя пыль)	Cu _{0.3}
0.005-0.001 (мелкая пыль)	Co _{-0.4}
<0.001 (илистая)	$Mn_{-0.5} > Zr, Mo_{-0.4} > Cu, Zn, Co_{-0.3}$

* Показаны коэффициенты корреляции, значимые при уровне *P* = 0.95. Знак минус перед цифрой обозначает отрицательную связь.

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 6 2015



Рис. 5. Автокорреляционные функции для содержания
металлов по катене 4: А – Со, Б – Zn, В – Ni. По оси
абсцисс – величина коэффициента автокорреляции;
<i>P</i> – уровень значимости критерия Льюнга–Бокса.

ной пыли — Zn. Объединение в общую группу таких различных по геохимическим свойствам элементов, как Co, Mn (геохимические аналоги) и Zr, находящегося в основном в минеральной форме, с Mo, вероятно, свидетельствует о решающей роли механической миграции в перераспределении содержаний этих элементов в данной системе.

Менее тесная, но статистически значимая при уровне P = 0.95, положительная связь прослеживается между содержанием средней пыли и Си. Все эти элементы имеют значимую отрицательную корреляцию с илистой фракцией, что также было выявлено [13] в поверхностном горизонте почв малого водосбора (балки) в средней части бассейна р. Протва. Корреляционные связи содержания Ni, Cr, Ti, Fe с различными гранулометрическими фракциями не установлены.

Расчет парных коэффициентов корреляции показал тесную положительную связь содержания Zn, Mn, Co с положением в рельефе, и только Co – с крутизной склона.

Результаты кластерного анализа позволили оценить влияние геоморфологического фактора на формирование групп металлов в почвах (табл. 3). В автономных почвах формируется лишь одна группа, объединяющая их с крутыми склонами – Мп, Ті. Связь этих элементов выявлена и в дерново-подзолистых почвах [14]. Пологие, крутые склоны и днище имеют также одну общую группу – Ті, Сг. В "общей выборке" и в днище отмечаются две общие группы: Мо, Zr и Ti, Cr. Полученные результаты позволяют предположить, что "общая выборка" наиболее представительна для оценки связей между металлами в почвах, так как отражает результат взаимодействия миграционных процессов на данном участке.

выводы

1. Гранулометрический состав гумусовых горизонтов почв по геоморфологическим элементам малого водосбора в бассейне р. Локна (Тульской обл.) изменяется слабо. На склонах относительно автономных позиций уменьшается содержание тонкой пыли, слабо увеличивается количество мелкопесчаной и илистой фракций; в днище наблюдается слабоконтрастное накопление фракций крупного и среднего песка, крупнопылеватой фракции и рассеяние — тонкопылеватой. Максимальная концентрация илистых частиц приурочена к задернованным склонам.

2. Вдоль днища, от верховья к устью, наблюдается увеличение опесчаненности почвенного ма-

МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ МАЛОГО ВОДОСБОРА ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ

Геоморфологические элементы водосбора	Группы металлов			
Водораздельная территория, <i>n</i> = 20	Co, Ni, Fe _{0.69–0.85} ; Zn, Cu _{0.61} ; Mn, Ti , Zr _{0.51–0.64}			
Пологие склоны, <i>n</i> = 15	Co, Ni, Zr _{0.62} ; Ti, Cr _{0.57}			
Крутые склоны, $n = 9$	Mn, Ti, Cr _{0.73} ; Fe, Cu _{0.73}			
Днище, <i>n</i> = 9	Fe, Pb _{0.93} ; Mn, Ni _{0.92} ; Mo, Zr _{0.78} ; Ti, Cr _{0.82}			
Общая выборка, <i>n</i> = 53	Mo, Zr, Mn, Co _{0.34–0.65} ; Ti, Cr _{0.49} ; Fe, Ni, Pb _{0.28–0.46} ; Pb, Zn _{0.49}			

Таблица 3.	Группы мет	галлов в почва:	х геоморфологи	ических элементов	малого водосбора
------------	------------	-----------------	----------------	-------------------	------------------

Примечание. Нижний индекс – коэффициент корреляции между элементами, характеризующий тесноту связи; *n* – число проб. Жирным шрифтом выделены группы металлов, повторяющиеся в почвах различных геоморфологических элементов.

териала. Отчетливые тренды распределения для других фракций не выявлены.

3. В соответствии с результатами однофакторного дисперсионного анализа, содержание Cu, Zn, Pb, Co, Fe, в меньшей степени – Cr, в гумусовых горизонтах почв имеет значимую связь с положением почвы на геоморфологическом элементе водосбора; для Mo, Ni, Mn, Ti и Zr – такая связь статистически не значима.

4. В почвах верхних частей пологих склонов выявлено большее содержание Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Ti, Zr, Fe по сравнению с автономными почвами. В почвах днища отмечено накопление Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Fe, но более слабое, чем на вышеуказанных частях склонов, что, вероятно, связано с интенсивной миграцией вещества от верховья к устью днища.

5. Вдоль днища, от верховья к устью, наблюдается увеличение содержания Zr и Ti, что совпадает с трендом распределения песчаных фракций; а также рассеяния Mn, Ni, и слабее — Cr, поведение которых связано с распределением тонкой пыли.

6. По данным корреляционного анализа (общая выборка) распределение Со, Мп, Zr, Мо и, в меньшей степени, Zn, Pb связано с песчаными и крупнопылеватой фракциями, более активно участвующими в механической миграции, чем тонкие фракции. Корреляционные связи Ni, Cr, Ti, Fe с гранулометрическими фракциями не установлены.

7. Слабая латеральная дифференциация почв по содержанию гранулометрических фракций, гумуса, металлов в данном водосборе обусловлена малыми углами наклона формирующих ее геоморфологических элементов и, как следствие, умеренной интенсивностью механической миграции. Физико-химическая миграция металлов также проявляется слабо, так как осуществляется в однородных окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условиях, параметры которых определяют преобладание их нерастворимых форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М., 1957. 237 с.
- 2. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- 3. 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. 1155–1166. DOI: 10.7868/S0032180X13100043.
- Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Л., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г. Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 861–869.
- 5. Дмитраков Л.М., Пинский Д.Л. Микроэлементный состав природных и техногенных потоков в ландшафтах центральной лесостепи // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1501–1508.
- 6. Золотарева Б.Н. Тяжелые металлы в почвах Верхнеокского бассейна // Почвоведение. 2003. № 2. С. 173–182.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- 8. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.
- 9. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.
- 10. Мирошниченко Н.Н., Тертышная А.В. Распределение микроэлементов в почвах оподзоленного ряда

683

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 6 2015

трансэлювиальных ландшафтов левобережной лесостепи Украины // Грунтознавство. 2011. Т. 12. № 1–2. С. 5–11.

- 11. Протасова Н.А., Беляев А.Б. Макро- и микроэлементы в почвах Центрально-Черноземной зоны и почвенно-геохимическое районирование территории // Почвоведение. 2000. № 2. С. 204–211.
- 12. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 408 с.
- 13. 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. 80–87.
- 14. 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.
- Самонова О.А. Касимов Н.С., Асеева Е.Н. Подвижные формы металлов в почвах эрозионных форм в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2011. № 6. С. 67–75.

- Семенков И.Н., Асеева Е.Н., Терская Е.В. Геохимическая структура лесостепных катен балочного водосбора в бассейне р. Упа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2013. № 6. С. 68–75.
- Fitzpatrick R.W., Chittleborough D.J. Titanium and zirconium minerals // Soil Mineralogy with Environmental Applications / Eds.: J.B. Dixon, D.G. Schulze. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI., 2002. P. 667–690.
- 18. *Kabata-Pendias A*. Trace elements in soils and plants. Florida: CRC Press, Inc., Boca Raton, 2001. 413 p.
- 19. *Marshall P., Fairbridge R.W.* Encyclopedia of geochemistry. Kluwer Academic Publishers, 1999. 1821 p.
- 20. Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G., Kryshhenko V.S., Mandzhieva S.S. Forms of heavy metal compounds in soils of the steppe zone // Eurasian Soil Science. 2008. T. 41. № 7. C. 708–716.
- 21. *Sarkar D., Datta R., Hannigan R.* Concepts and applications in environmental geochemistry. Elsevier, 2007. 778 p.
- 22. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome, FAO of the United Nations, 2014. 181 p.