

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОЧВЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

Л.П. Степанова, Е.В. Яковлева, А.В. Писарева

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Исследована 13-летняя (с 2003 по 2016 гг.) динамика загрязнения почвы на содержание тяжёлых металлов в районе деревни Большое Думчино Мценского района на территории, прилегающей к отвалу шлаков ОАО «Мценский литейный завод». Показано, что на территории размещения шлаковых отходов формируется техногеохимическая аномалия, в которой содержащиеся тяжёлые металлы имеют техногенную и генетическую (природно-геохимическую) природу. Для выявления действия техногенного фактора на загрязнение почв тяжёлыми металлами определяли уточнённый коэффициент обогащённости тяжёлых металлов (УКО) в светло-серых лесных почвах на разной удалённости от шлакового отвала, позволяющий подсчитать долю техногенности металла в процентах от его валового содержания. Доказано техногенное происхождение тяжёлых металлов как загрязнителей и роль гумусовых горизонтов почвы в закреплении этих металлов в профиле почвы. Анализ результатов, характеризующих степень обогащённости генетических горизонтов светло-серых лесных почв тяжёлыми металлами, за период 2003–2016 годы убедительно доказывает влияние максимального скопления шлаковых отходов в отвале на интенсивность накопления и закрепление исследуемых металлов, как в верхнем гумусовом слое, так и их распределение в профиле почвы. Установленные закономерности в изменении степени обогащённости и техногенности тяжёлых металлов в профиле светло-серой лесной почвы обусловлены не только воздействием шлакового отвала как источника загрязнения, но и особенностями использования почв исследуемых территорий. Показано, что токсическая нагрузка за анализируемый период не только не уменьшилась, а даже увеличилась.

Ключевые слова: технофильность, тяжёлые металлы, коэффициент обогащённости, шлаковый отвал

Spatio-Temporal Dynamics of Soil Geochemical Anomalies in the Zone of Impact of Slag Residuals

L.P. Stepanova, E.V. Yakovleva, A.V. Pisareva

Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 302019 Oryol, Russia,
Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 105082 Moscow

The 13-year-old (from 2003 to 2016) dynamics of soil contamination for the content of heavy metals in the area of the village of Bolshoye Dumchino of the Mtsensk District in the territory adjacent to the slag dump of Mtsensk Foundry was studied. It is shown that on the territory of the placement of slag residuals a techno geochemical anomaly is formed, in which the contained heavy metals are of technogenic and genetic (natural geochemical) nature. To identify the effect of anthropogenic factor on soil pollution with heavy metals, was determined the refined enrichment factor of heavy metals (EFHM) in light gray forest soils at different distances from the slag dump, allowing to calculate the proportion of technogeneity of metals as a percentage of its total content. The technogenic origin of heavy metals as pollutants and the role of humus soil horizons in fixing these metals in the soil profile have been proven. Analysis of the results characterizing the degree of enrichment of the genetic horizons of light gray forest soils with heavy metals for the period 2003–2016 convincingly proves the effect of maximum accumulation of slag residuals in the dump on the accumulation intensity and fixation of the studied metals, both in the upper humus layer and their distribution in the profile soil. The established patterns in changing the degree of enrichment and technogeneity of heavy metals in the profile of light-gray forest soil are caused not only by the impact of the slag dump as a source of pollution, but also by the peculiarities of using the soils of the studied territories. It is shown that the toxic load for the analyzed period not only did not decrease, but even increased.

Keywords: technophilicity, heavy metals, enrichment factor, slag dump

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-44-48

Содержание и химические аспекты поведения металлов являются важными характеристиками плодородия почв и степени их деградационных изменений, эффективности выполнения ими определенных экологических функций. При этом большое значение для выполнения почвами определённых экологиче-

ских функций имеет не только степень подвижности или закрепления тяжёлых металлов (ТМ) в них, но и протекающие там процессы и режимы. Для наиболее эффективного выполнения почвами конкретных экологических функций необходимо выполнение определённых характеристик поведения ТМ в почвах: закрепле-

ние, перераспределение и высвобождение с учетом фактора структурных взаимосвязей металлов с различными свойствами почв.

Изучению поведения ТМ в почвах посвящено много работ [1–6], подробно изучены техногенные источники ТМ, проанализировано валовое содержание основных металлов. Однако валовое

количество не определяет степень опасности загрязнения почвы. Токсическое действие поллютантов зависит от степени окисления элементов с переменной валентностью, характера закрепления гумусовыми веществами, глинистыми минералами и фиксации железомарганцевыми новообразованиями.

В настоящее время актуальным является изучение характера поступления металлов в почвы земель сельскохозяйственного назначения, их биологической доступности в составе удобрительных форм, используемых как источник питания растений (осадок сточных вод, шлаки, минералы), исследование почв сельскохозяйственных земель и контроль содержания в них тяжелых металлов как возможного фактора производства и поступления загрязненной продукции, отравляющей животных и человека, и нормирование содержания в почвах тяжелых металлов в зависимости от использования земель.

Цель исследований — анализ многолетней динамики концентрации ТМ (Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, Cd) и степени их техногенности в генетических горизонтах светло-серых лесных почв в районе воздействия шлакового отвала.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования явились светло-серые лесные почвы (*Albic Luvisols*) с различным уровнем антропогенного воздействия шлакового отвала в п. Думчино Мценского района Орловской области на различном удалении от отвала.

Содержание валовых и подвижных форм ТМ в почве определяли атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30178-96.

Вычисление уточненного коэффициента обогащенности (УКО) ТМ, когда их содержание нормируется на содержание алюминия как консервативного элемента, находящегося в составе алюмосиликатов, определяли по формуле

$$\text{УКО} = (\text{Me}_A/\text{Al}_A)/(\text{Me}_C/\text{Al}_C),$$

где Me_A и Me_C — валовое содержание ТМ в горизонте А и С; Al_A , Al_C — валовое содержание алюминия в горизонте А и С.

Долю техногенности T_g металлов определяли в процентах от его

Таблица 1. УКО ТМ в профиле светло-серой лесной почвы на разном расстоянии от шлакового отвала

Table 1. REF HM in the profile of light gray forest soil at different distances from the slag heap

Мощность, см	УКО ТМ					
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd
20 м						
0–20	16,5/13,3	3,85/5,0	2,5/1,8	28,9/1,6	6,2/1,9	9,31/2,0
20–30	2,5/3,7	1,37/1,6	1,89/1,1	17,56/1,2	1,59/0,9	2,19/2,0
30–40	1,7/1,5	0,87/0,8	0,97/0,7	10,33/0,8	0,94/0,6	0,97/1,0
150 м						
0–20	9,64/3,5	4,07/1,6	1,75/0,9	2,39/1,8	5,13/1,3	3,42/5,0
20–30	2,5/0,6	0,96/0,6	0,65/0,6	1,63/1,3	2,44/0,8	1,84/1,0
300 м						
0–20	8,29/5,4	12,06/1,7	1,63/1,0	4,4/2,8	4,7/1,6	10,0/10,0
20–30	2,15/1,1	7,19/1,0	0,8/1,0	2,6/1,8	3,2/0,9	3,0/10,0
30–40	1,31/0,8	1,6/0,7	0,34/0,7	1,2/0,9	1,7/0,9	1,0/1,3
450 м						
0–20	6,8/2,8	15,0/1,3	1,8/1,3	3,1/1,9	1,15/1,1	10,0/3,3
20–30	2,4/0,8	7,1/0,8	1,2/0,9	1,6/1,4	1,15/0,9	3,0/1,7
30–40	1,3/0,7	3,9/0,7	0,8/0,7	1,1/0,8	0,95/0,7	2,0/0,8

Примечание. В числителе – данные 2003 г., в знаменателе – 2016 г.

валового содержания по формуле $T_g = 100(\text{УКО}-1)/\text{УКО}$.

Степень закрепления (буферность) элементов отражает миграционную способность поллютантов. Водяницким Ю.Н. и др. [1] предлагается оценивать буферность гумусового горизонта B_f в процентах как долю закрепляемого элемента от его содержания в профиле почвы:

$$B_f = 100(C_A h_A) / \sum C_i h_i,$$

где C_A и C_i — содержание элемента в гумусовом (А) и i -том горизонте; h_A и h_i — мощность этих горизонтов.

Результаты исследования

В зоне действия крупных шлаковых отвалов содержащиеся в почве ТМ имеют природное и техногенное происхождение. В связи с этим при экологической оценке загрязнения важно определить содержание ТМ техногенного происхождения. Для выявления действия техногенного фактора на загрязнение почв ТМ определяли УКО ТМ в светло-серых лесных почвах на разном расстоянии от шлакового отвала, позволяющий подсчитать долю T_g металла в процентах от его валового содержания. Результаты, представленные в табл. 1, 2, отражают долю техногенного металла в профиле светло-серой лесной почвы на разном удалении от шлакового отвала и степень ее изменения за период с 2003 по 2016 гг. Доля T_g оказалась значимой для всех

исследуемых металлов в слое почвы 0–20 см.

Коэффициент обогащенности генетических горизонтов светло-серой лесной почвы изменяется в зависимости от расстояния от источника загрязнения, характера ТМ и свойств генетического горизонта почвы. Так, самая большая обогащенность установлена для валового содержания меди в верхнем 0–20 см слое почвы в непосредственной близости к источнику загрязнения и достигала 13,3 единицы, с увеличением удаленности от шлакового отвала и глубины в профиле почвы коэффициент обогащенности меди снижается в 4 раза и достигает величины 2,8 единиц в фоновой почве. По всем исследуемым металлам установлена общая закономерность уменьшения степени обогащенности ТМ с увеличением расстояния от источника загрязнения и глубины почвенных горизонтов. По величине коэффициента обогащенности светло-серой лесной почвы в слое 0–20 см изучаемые тяжелые металлы образуют следующий ряд: $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr}$ в непосредственной близости к шлаковому отвалу.

При расстоянии от шлакового отвала 150 м и 300 м состав ТМ в слое 0–20 см почвы образует следующий ряд по величине коэффициента обогащенности: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni}$.

Чередование металлов по степени обогащенности ими гумусо-

Таблица 2. Tg ТМ в профиле светло-серой лесной почвы на разном удалении от шлакового отвала

Table 2. Tg HM in the profile of light gray forest soil at different distances from the slag heap

Мощность, см	Tg ТМ, %					
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd
20 м						
0–20	92,5/93,9	80,0/74,0	44,4/60,0	37,5/96,5	47,5/83,9	50,0/89,2
20–30	73,0/59,5	37,5/27,0	9,1/47,1	16,7/94,3	–/37,1	50,0/54,5
30–40	33,3/41,2	–/–	–/–	–/90,3	–/–	–/–
150 м						
0–20	71,4/89,6	37,5/75,6	–/41,2	44,4/58,3	23,1/80,5	80,0/70,8
20–30	–/60,0	–/–	–/–	23,08/38,7	–/59,0	–/45,6
300 м						
0–20	81,5/87,9	41,2/91,7	–/38,6	64,3/77,3	37,5/78,7	90,0/90,0
20–30	–/54,5	–/86,1	–/–	44,4/61,5	–/68,8	90,0/66,7
30–40	–/23,1	–/37,5	–/–	–/16,7	–/41,2	23,1/–
450 м						
0–20	64,3/85,3	23,1/93,3	23,1/44,4	47,4/67,7	9,1/16,7	69,7/90,0
20–30	–/58,3	–/85,9	–/16,7	28,6/37,5	–/16,7	41,2/66,7
30–40	–/23,1	–/74,4	–/–	–/9,1	–/–	–/–

Примечание. В числителе – данные 2003 г., в знаменателе – 2016 г.

вого горизонта для фоновой почвы можно записать такой ряд: Cd > Cu > Cr > Zn = Ni > Pb.

Исследования доли техногенности ТМ в профиле светло-серой почвы показали, что в 2003 г. техногенность меди превышала техногенность любого из изученных металлов и достигала 92,5 % в непосредственной близости к шлаковому отвалу, с увеличением удаленности от отвала доля техногенной меди снижается до 71,4–81,5 %.

Для фоновой почвы доля техногенности меди составляет 64,3 %. С удалением от отвала ниже стала Tg ТМ для почвы на расстоянии 300 м от отвала в слое 0–20 см от 37,5–41,2 % (Pb, Zn) до 64,3–81,5 % (Cr, Cu). Число техногенных элементов сократилось, а их ряд стал иным, чем в непосредственной близости к отвалу: Cu > Zn > Cd > Pb > Ni > Cr, а при удалении на 300 м ряд техногенных металлов насчитывает пять металлов в следующей последовательности: Cu > Cr > Zn > Pb > Cd. В почвах на расстоянии 150 м от отвала доля техногенных металлов сократилась до 5 элементов, а их ряд стал иным (Cd > Cu > Cr > Zn > Pb), чем в почвах в непосредственной близости и наиболее удаленной от шлакового отвала. В профиле светло-серой лесной почвы на глубине 20–30 и 30–40 см установлена высокая миграционная способность для всех исследуемых металлов, кроме хрома и кадмия, которые закрепляются в

почве для техногенного хрома на 16,7–44,4 % и кадмия 41,2–90 %. Для фоновой почвы доля техногенности на уровне 64,3–69,7 % установлена для меди и кадмия, для цинка, никеля и свинца техногенность низкая и недостоверная.

В целом Tg металлов в светло-серых лесных почвах под воздействием шлаковых отвалов образует следующий ряд: Cu > Zn > Cd > Pb = Ni > Cr.

Анализ результатов, характеризующих степень обогащенности генетических горизонтов светло-серых лесных почв тяжёлыми металлами, за период 2003–2016 гг. убедительно доказывает влияние максимального скопления шлаковых отходов в отвале на интенсивность накопления и закрепление исследуемых металлов как в верхнем гумусовом слое, так и их распределение в профиле почвы.

Так, наибольшая величина УКО верхнего слоя почвы установлена для хрома (28,9 ед.), меди (16,5 ед.), кадмия (9,31 ед.), свинца (6,2 ед.) и цинка (3,85 ед.) в непосредственной близости пробных площадок к шлаковому отвалу.

В профиле почвы величина УКО ТМ уменьшается с глубиной почвенных слоев, например для хрома до 17,56 ед. на глубине 20–30 см и до 10,33 ед. на глубине 30–40 см. При этом для таких металлов, как медь, цинк, никель, свинец, кадмий установлена самая высокая степень закрепления в верхнем 0–20 см слое почвы.

С увеличением удаленности от источника загрязнения степень закрепления ТМ в верхнем гумусовом слое и профиле почвы снижается по сравнению с величиной УКО ТМ светло-серой лесной почвы в непосредственной близости к шлаковому отвалу.

Подсчет техногенности ТМ показал следующие результаты. Высокая техногенность установлена для меди, хрома (93,9–96,5 %), а также для свинца и кадмия (83,9–89,2 %), техногенность цинка и никеля колебалась в пределах 74,0–60,0 % соответственно в верхнем 0–20 см почвы в непосредственной близости к отвалу. В слое почвы 20–30 см величина техногенности исследуемых металлов снижалась для меди до 59,5 %, для кадмия до 54,5 %, никеля — 47,1 %, свинца — 37,1 %, для цинка техногенность металла резко снижалась до 27 %. При этом техногенность хрома оставалась высокой по всему профилю почвы и достигала 94,3 % (слой 20–30 см) и 90,3 % для слоя почвы 30–40 см. На глубине 30–40 см почвы техногенные металлы представлены только хромом и медью (41,2 %). В почве вблизи шлакового отвала техногенность исследуемых металлов образует ряд Cr = Cu > Cd = Pb > Zn > Ni. С удалением от источника загрязнения на 150 м ряд техногенности ТМ несколько изменяется, сохраняя следующую последовательность: Cu > Pb = Zn > Cd > Cr > Ni при высокой техногенности меди — 89,6 %, свинца — 80,5 %, цинка — 75,6 %, кадмия — 70,8 %, средний уровень техногенности установлен для хрома 58,3 % и для никеля — 41,2 %. При этом техногенность металлов в слое 20–30 см резко снижается до среднего уровня для меди — 60 %, свинца — 59 %, кадмия — 45,6 %, хрома — 38,7 %, техногенность цинка и никеля на этой глубине почвы низкая и недостоверная.

С увеличением удаленности от источника загрязнения на 300 м изменяется техногенность исследуемых металлов и остается высокой для цинка — 91,7 %; кадмия — 90,0 %; меди — 87,9 %, а также для хрома (77,3 %) и свинца (78,7 %). С глубиной расположения исследуемых генетических горизонтов техногенность меди, хрома, никеля, кадмия резко снижалась, а техногенность цинка была

низкой — 37,5 %, для свинца техногенность на глубине 30–40 см снижалась до 41,2 %.

Для почвы, удаленной от источника загрязнения на 300 м, техногенность металлов образует следующий ряд: $Zn = Cd = Cu > Pb = Cr > Ni$.

За период 2003–2016 гг. в светло-серых лесных почвах на разном расстоянии от шлакового отвала резко возросла техногенность таких ТМ, как медь, кадмий, свинец, цинк, хром. Наиболее высокая техногенность металлов в почвах в непосредственной близости к шлаковому отвалу установлена для меди, свинца и кадмия. В почвах, наиболее удаленных от шлакового отвала, за период с 2003 по 2016 гг. установлено увеличение степени техногенности для таких металлов, как цинк, кадмий и медь при резком снижении техногенности такого металла, как хром.

Исследования авторов показали, что на территории размещения шлаковых отходов формируется техногеохимическая аномалия, в которой содержащиеся ТМ имеют техногенную и генетическую (природно-геохимическую) природу. При этом значительная часть поллютантов закрепляются в гумусовом горизонте. Степень закрепления или буферность элементов ТМ различная, что отражает их миграционную способность. Оценку буферности гумусового горизонта проводили как долю закрепляемого элемента от его содержания в почвенном профиле (табл. 3)

Данные, представленные в табл. 3, доказывают не только техногенное происхождение ТМ как загрязнителей, но и роль гумусовых горизонтов почвы в закреплении этих металлов в профиле почвы. Независимо от удаленности источника загрязнения все исследуемые поллютанты накапливаются в верхних гумусовых горизонтах.

Так, степень закрепления меди в гумусовом горизонте светло-серой лесной почвы колебалась в пределах 64,6–79,8 % в 2003 г., при этом максимальное закрепление металла было отмечено в условиях незначительного удаления от шлакового отвала. Через 13 лет степень закрепления меди в гумусовом слое возрастала до 83,6 % в непосредственной близости от источника загрязнения и с увеличе-

Таблица 3. Степень закрепления (буферность) ТМ Вф на разном расстоянии от шлакового отвала в 2003 и 2016 гг.

Table 3. The degree of consolidation (buffering) of HM Bf at different distances from the slag heap in 2003 and 2016

Расстояние, м	Степень закрепления, %					
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd
2003 г.						
20	77,9	70,7	51,6	47,3	55,4	51,5
150	79,8	63,4	50,2	58,4	57,5	79,2
300	75,7	58,2	44,2	51,6	54,8	54,3
450	64,8	45,6	44,0	49,5	41,8	56,0
2016 г.						
20	83,6	66,0	51,6	55,7	74,2	86,8
150	81,8	75,9	54,0	59,0	70,8	65,8
300	75,2	67,6	56,1	60,2	56,2	58,7
450	70,1	61,8	50,2	57,7	36,8	60,0

нием расстояния от него снижалась до 81,8 % при удалении на 150 м и до 75,2 % при удалении на 300 м.

При наибольшем расстоянии от шлакового отвала степень закрепления меди снижалась до 70,1 %. Для меди наиболее четко проявляется фактор времени накопления и закрепления меди в гумусовом слое светло-серой лесной почвы. С увеличением временного периода в 13 лет количество валовой меди в гумусовом горизонте возрастает.

Степень закрепления цинка была наибольшей в 2003 г. в условиях максимальной приближенности к источнику загрязнения и составила 70,7 %. На расстоянии 150 м от шлакового отвала степень закрепления цинка в светло-серой лесной почве снижалась до 63,4 %, а на расстоянии 300 м — до 58,2 %. Наименьшая степень буферности — 45,6 % — зафиксирована на расстоянии 450 м. В условиях 2016 г. степень закрепления цинка гумусовыми слоями почвы несколько изменялась при сохранении уже установленной тенденции ее снижения с увеличением удаленности источника загрязнения. Так, степень закрепления цинка была наибольшей в гумусовом слое при удалении от отвала на 150 м — 75,9 %, наименьшая степень — 61,8 % — установлена в условиях наибольшего удаления от шлакового отвала.

В условиях 2003 г. наименьшая степень закрепления металла в гумусовом слое установлена для Cr (47,3 %) и Ni и Cd (51,5–51,6 %) в условиях наибольшей приближенности к шлаковому отвалу. С увеличением удаленности от источника загрязнения степень закреп-

ления металлов снижается и становится минимальной: для свинца — 49,5 %, для кадмия — 56 %. Максимальная степень закрепления этих металлов показана при удалении от шлакового отвала на 150 м.

В условиях 2016 г. степень закрепления таких металлов, как кадмий, свинец, хром, в непосредственной близости к отвалу резко возрастает до 86,8 % для кадмия, 74,2 % для свинца и 55,7 % для хрома. При этом с увеличением удаленности источника загрязнения степень закрепления исследуемых металлов снижается, но остается высокой в сравнении со степенью закрепления указанных металлов гумусовым слоем светло-серой лесной почвы в условиях 2003 г.

Заключение

Установленные закономерности изменения степени обогащенности и техногенности ТМ в профиле светло-серой лесной почвы обусловлены не только воздействием шлакового отвала как источника загрязнения, но и особенностями использования почв исследуемых территорий.

Следует отметить изменения в характере использования почв исследуемых территорий за период с 2003 по 2016 год. Если в условиях 2003–2007 гг. территория почв, прилегающих к шлаковому отвалу, использовалась как пастбище под естественной лугово-травянистой растительностью, то с 2008 г. по настоящее время исследуемые территории светло-серых лесных почв распаханы и используются для возделывания сельскохозяйственных культур,

что обуславливает необходимость внесения минеральных удобрений и ядохимикатов, которые содержат и являются источниками значительных количеств ТМ.

Полученные результаты отражают степень неблагоприятной экологической ситуации в зоне вредного воздействия шлакового отвала п. Думчино Мценского района Орловской области на поч-

венный покров земель сельскохозяйственного назначения и необходимость разработки мероприятий по предотвращению распространения ТМ в окружающей среде.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. Учеб. пособие. М., Изд-во МГУ, 2012. 306 с.
2. Водяницкий Ю.Н., Плеханова И.О., Прокопович Е.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв выбросами предприятий цветной металлургии. Почвоведение. 2011. № 2. С. 240–249.
3. Воробейчик Е.Л., Кайгородова С.Ю. Многолетняя динамика содержания ТМ в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов. Почвоведение. 2017. № 8. С. 1009–1024.
4. Маслеников П.В., Скрыпник Л.Н. Аккумуляция металлов в почвах г. Калининграда. Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 1792.
5. Писарева А.В., Белоухов С.Л., Савич В.И., Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Гукалов В.В., Шайхиев И.Г. Миграция ТМ от очага загрязнения в зависимости от взаимосвязей в ландшафте. Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 6. С. 160–163.
6. Раскатов В.А., Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Писарева А.В. Почвенного покрова городских ландшафтов различного функционального использования (на примере г. Москвы). Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2016. № 5. С. 5–18.
7. Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Писарева А.В. Экологическая оценка степени фитотоксичности почв антропогенно-трансформированных территорий. Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2017. № 2. С. 10–15.
8. Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Писарева А.В. Экологическая характеристика антропогенно-трансформированных почв, загрязненных тяжелыми металлами. Агрохимия. 2016. № 12. С. 60–67.
9. Шафигуллина Г.Т., Серавкин И.Б., Удачин В.Н. Геохимическая активность отвальной массы Учалинского месторождения. Развитие и охрана недр. 2008. № 2. С. 50–55.
10. Baron S., Carignan J., Ploquin A. Dispersion of heavy metals (metalloids) in soils from 800-year-old pollution (Mont-Lozere, France). Environ. Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 5319–5326.
11. Meadows M., Watmough S.A. An assessment of longterm risks of metals in Sudbury: A critical loads approach. Water, Air, Soil Pollut. 2012. V. 223. № 7. P.4343–4354.
12. Niskavaara H., Reimann C., Chekushin V., Kashulina G. Seasonal variability of total and easily leachable element contents in topsoils (0–5 cm) from eight catchments in the European Arctic (Finland, Norway and Russia). Environ. Pollut. 1997. V. 96. № 2. P. 261–274. doi 10.1016/s0269-7491(97)00031-6.
13. Nyholm N.E.I., Rühling E. Effects of decreased atmospheric heavy metal deposition in South Sweden on terrestrial birds and small mammals in natural populations. Water, Air, Soil Pollut. Focus. 2001. V. 1. № 3. P. 439–448.
14. Schram L.J., Wagner C., Mc Mullin R.T., Anand M. Lichen communities along a pollution gradient 40 years after decommissioning of a Cu–Ni smelter. Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. V. 22. № 12. P. 9323–9331. doi 10.1007/s11356-015-4088-4.
15. Tyler G. Leaching rates of heavy metal ions in forest soil. Water, Air, Soil Pollut. 1978. V. 9. № 2. P. 137–148.
16. Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area. Environ. Rev. 1996. V. 4. № 3. P. 185–224.

References

1. Vodyanitskii Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T. Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami. Ucheb. posobie. M., Izd-vo MGU, 2012. 306 s.
2. Vodyanitskii Yu.N., Plekhanova I.O., Prokopovich E.V., Savichev A.T. Zagryaznenie pochv vybrosami predpriyati tsvetnoi metallurgii. Pochvovedenie. 2011. № 2. S. 240–249.
3. Vorobeichik E.L., Kaigorodova S.Yu. Mnogoletnyaya dinamika soderzhaniya TM v verkhnikh gorizontakh pochv v raione vozddeistviya medeplavil'nogo zavoda v period sokrashcheniya ob'emov ego vybrosov. Pochvovedenie. 2017. № 8. S. 1009–1024.
4. Maslennikov P.V., Skrypnik L.N. Akkumulyatsiya metallov v pochvakh g. Kaliningrada. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. № 1-1. S. 1792.
5. Pisareva A.V., Belopukhov S.L., Savich V.I., Stepanova L.P., Yakovleva E.V., Gukalov V.V., Shaikhiev I.G. Migratsiya TM ot ochaga zagryazneniya v zavisimosti ot vzaimosvyazei v landshafte. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2017. T. 20. № 6. S. 160–163.
6. Raskatov V.A., Stepanova L.P., Yakovleva E.V., Pisareva A.V. Pochvennogo pokrova gorodskikh landshaftov razlichnogo funktsional'nogo ispol'zovaniya (na primere g. Moskvy). Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2016. № 5. S. 5–18.
7. Stepanova L.P., Yakovleva E.V., Pisareva A.V. Ekologicheskaya otsenka stepeni fitotoksichnosti pochv antropogenno-transformirovannykh territorii. Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 2. S. 10–15.
8. Stepanova L.P., Yakovleva E.V., Pisareva A.V. Ekologicheskaya kharakteristika antropogenno-transformirovannykh pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami. Agrokhimiya. 2016. № 12. S. 60–67.
9. Shafigullina G.T., Seravkin I.B., Udachin V.N. Geokhimicheskaya aktivnost' otval'noi massy Uchalinskogo mestorozhdeniya. Razvitie i okhrana neдр. 2008. № 2. S. 50–55.
10. Baron S., Carignan J., Ploquin A. Dispersion of heavy metals (metalloids) in soils from 800-year-old pollution (Mont-Lozere, France). Environ. Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 5319–5326.
11. Meadows M., Watmough S.A. An assessment of longterm risks of metals in Sudbury: A critical loads approach. Water, Air, Soil Pollut. 2012. V. 223. № 7. P.4343–4354.
12. Niskavaara H., Reimann C., Chekushin V., Kashulina G. Seasonal variability of total and easily leachable element contents in topsoils (0–5 cm) from eight catchments in the European Arctic (Finland, Norway and Russia). Environ. Pollut. 1997. V. 96. № 2. P. 261–274. doi 10.1016/s0269-7491(97)00031-6.
13. Nyholm N.E.I., Rühling E. Effects of decreased atmospheric heavy metal deposition in South Sweden on terrestrial birds and small mammals in natural populations. Water, Air, Soil Pollut. Focus. 2001. V. 1. № 3. P. 439–448.
14. Schram L.J., Wagner C., Mc Mullin R.T., Anand M. Lichen communities along a pollution gradient 40 years after decommissioning of a Cu–Ni smelter. Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. V. 22. № 12. P. 9323–9331. doi 10.1007/s11356-015-4088-4.
15. Tyler G. Leaching rates of heavy metal ions in forest soil. Water, Air, Soil Pollut. 1978. V. 9. № 2. P. 137–148.
16. Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area. Environ. Rev. 1996. V. 4. № 3. P. 185–224.

Л.П. Степанова – д-р с.-х. наук, профессор, Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 302019 Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина 69 • Е.В. Яковлева – канд. с.-х. наук, доцент, e-mail: Elenavalerevna79@yandex.ru • А.В. Писарева – ст. преподаватель, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), 105082 Россия, г. Москва, ул. Рубцовская набережная 2/18
 L.P. Stepanova – Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 302019 Russia, Oryol, General Rodin Str. 69 • E.V. Yakovleva – Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, e-mail: Elenavalerevna79@yandex.ru • A.V. Pisareva – Senior Lector, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 105082 Russia, Moscow, Rubtsovskaya Embankment 2/18