

УДК 631.4

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

Оригинальная статья

Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах защитных лесных насаждений сухостепной зоны Волгоградской области

А.В. Федотова[✉], Е.П. Тимофеев[✉]

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Россия, 400062, г. Волгоград, Университетский пр., 97,
e-mail: timofeev-e@vfanc.ru

Статья поступила: 17.03.2025, доработана: 16.05.2025, принята к публикации: 19.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Дефлированные почвы характеризуются поверхностным золовым наносом и могут иметь погребенный профиль. В погребенных гумусовых горизонтах по сравнению с фоновыми почвами прослеживается повышенное содержание поллютантов. Лесные насаждения являются эффективным средством защиты от дефляции, распространенной в районах недостаточного увлажнения. **Целью работы** явилась оценка валового содержания тяжёлых металлов (Pb, Cu, Hg, Zn и As) в почвах лесозащитных насаждений в условиях сухостепной зоны Волгоградской области, а также установление влияния защитных лесополос на накопление и распределение тяжелых металлов в профиле дефлированных почв. **Методы.** Установлена структура почвенного покрова, состоящая из каштановой светлогумусовой почвы с погребенным профилем темно-каштановой почвы и псаммоземов. Дана количественная оценка среднего содержания элементов в почвенном профиле и по слоям 0-10 см, 10-20 см, 20-30 см, 30-40 см, 40-50 см, 50-60 см, 60-70 см. Изучено распределение металлов и мышьяка по почвенному профилю с учетом морфологических особенностей почв. Проведена статистическая обработка результатов. **Результаты исследования.** Установлено влияние гранулометрического состава на степень аккумуляции металлов и мышьяка в почве. Более высокое содержание тонкодисперсных фракций в зональной почве обуславливает большее содержание в ней металлов и мышьяка. Средние выборочные значения элементов (мг/кг) располагались в порядке убывания: для псаммоземов характерен ряд накопления в виде: As<Hg<Pb<Zn<Cu, для почв зонального ряда: As<Hg<Zn<Pb <Cu. Результат исследований указывает, что почвы агролесомелиоративных ландшафтов имеют под лесными насаждениями значительный экологический риск. Поэтому крайне важно разработать новые концепции функционирования агролесомелиоративных систем, адаптированных к условиям сухостепной зоны, с учетом региональных фоновых содержаний тяжелых металлов и мышьяка.

Ключевые слова: почва, сухостепная зона, гранулометрический состав, тяжёлые металлы, мышьяк.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № FNFE-2025-0012 «Теоретические основы и методология оценки баланса парниковых газов на пресноводных водоемах в засушливых условиях юга России».

Для цитирования: Федотова А.В., Тимофеев Е.П. Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах защитных лесных насаждений сухостепной зоны Волгоградской области. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 244-254. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

Original paper

Total content of heavy metals and arsenic in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of Volgograd region

A.V. Fedotova^{ORCID}, E.P. Timofeev^{ORCID}

Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskiy Pr., Volgograd 400062, Russian Federation, e-mail: timofeev-e@vfanc.ru

Received: 17.03.2025, revised: 16.05.2025, accepted: 19.05.2025

Abstract: Relevance. Deflated soils are characterized by surface aeolian deposits and may have a buried profile. Buried humus horizons exhibit higher levels of pollutants compared to background soils. Forest plantations are an effective means of protection against deflation, which is widespread in areas with insufficient moisture. **The aim** of the study was to assess the total content of heavy metals (Pb, Cu, Hg, Zn, and As) in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of the Volgograd region, as well as to determine the influence of shelterbelts on the accumulation and distribution of heavy metals in the profile of deflated soils. **Methods.** The soil cover structure was identified, consisting of light-humus chestnut soil with a buried profile of dark-chestnut soil and psammozems. A quantitative assessment of the average content of elements in the soil profile was carried out for the following layers: 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm, 40–50 cm, 50–60 cm, and 60–70 cm. The distribution of metals and arsenic in the soil profile was studied, taking into account the morphological features of the soils. Statistical processing of the results was performed. **Results.** The influence of granulometric composition on the degree of accumulation of metals and arsenic in the soil was established. A higher content of fine-dispersed fractions in the zonal soil leads to a greater accumulation of metals and arsenic. The average sample values of the elements (mg/kg) were arranged in descending order as follows: for psammozems, the accumulation series was As < Hg < Pb < Zn < Cu, while for zonal soils, it was As < Hg < Zn < Pb < Cu. The results indicate that soils in agroforestry landscapes under forest plantations pose a significant ecological risk. Therefore, it is crucial to develop new concepts for the functioning of agroforestry systems adapted to the conditions of the dry-steppe zone, taking into account regional background levels of heavy metals and arsenic.

Keywords: soil, dry steppe zone, granulometric composition, heavy metals, arsenic.

Acknowledgement: The work was carried out within the framework of the state assignment No. FNFE-2025-0012 “Theoretical bases and methodology of greenhouse gas balance assessment on freshwater reservoirs in arid conditions of southern Russia”.

For citation: Fedotova A.V., Timofeev E.P. Total content of heavy metals and arsenic in soils of protective forest plantations in the dry-steppe zone of Volgograd region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 244–254. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.61.001

Введение

Оценка содержания тяжелых металлов (ТМ) в почве имеет важное значение для определения степени экологического риска и разработки стратегий защиты окружающей среды и здоровья человека [Islam et al., 2024; Wang et al., 2023]. При малой концентрации металлы необходимы живым организмам, поскольку они играют жизненно важную роль в обеспечении физиологических функций, но при высоких концентрациях ТМ становятся токсичными [Gebeyehu, Bayissa, 2020].

По степени опасности воздействия ТМ можно дифференцировать как 1 класс опасности (As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn), 2 класс опасности (Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr) и 3 класс опасности (Ba, V, W, Mn, Sr) [Водяницкий, 2012].

Основным хранилищем ТМ является почва, которая играет основную роль их круговорота в окружающей среде [Cao et al., 2010; Куликова и др., 2022]. Концентрация ТМ в почве зависит от геологических особенностей конкретной территории и имеет значительные диапазоны варьирования [Friedland, 2024].

В засушливых регионах, в качестве мер по борьбе с опустыниванием и деградацией почв в первую очередь от эрозионных процессов, активно применяется фитомелиорация [Ikromov, Kadamov, 2021; Gafurova, Juliev, 2021]. В XIX-XX веках в сухостепной зоне в качестве защиты от наступления песков высаживали лесные массивы, препятствующие дефляционному переносу почвенных частиц [Török et al., 2025]. Лесные массивы, как и лесополосы, имеют положительный противозерозионный ресурс, способствуют формированию локального приземного климатического режима тепла и влажности воздуха, снижают турбулентные потоки парниковых газов, долю углекислого газа в приземном слое воздуха [Толкач, 2022]. Кроме того, лесная растительность способствует стабильности углерода органического вещества почвы, что увеличивает устойчивость экосистем [Tikhonova et al., 2023].

Подобные территории часто используются населением как места для отдыха. Для их благоустройства крайне важна степень загрязнения почв под лесными почвозащитными насаждениями. Рядом исследований [Медведев, Деревягин, 2017; Пугаев, Чегодаева, 2017; Крамерева и др., 2021] показана важная особенность лесных насаждений, проявляющаяся в их способности предотвращать загрязнение почв тяжелыми металлами за счет их профильного перераспределения. Кроме того, в силу перечисленных особенностей, искусственные лесопосадки способствуют частичной рекультивации почв [Горбунова, Куликова, 2022]. Однако отложения ТМ в зоне аэрации могут выступать как источник вторичного загрязнения или геохимического барьера. Для принятия решения о возможности использования территорий в качестве парковых зон необходима оценка экологического состояния почв.

В сухостепной зоне каштановых почв широко применяются восстановительные мероприятия в виде лесомелиорации, где искусственные лесопосадки занимают значительные площади [Попов, 2022]. Возраст некоторых рукотворных лесных массивов превышает 100 лет. Наиболее распространены противодефляционные насаждения, призванные предотвратить наступление песков на населенные пункты. Интенсивная дефляция, в свое время, привела к перекрытию почв зонального ряда песчаным слоем, что способствовало новому эволюционному этапу почвообразования. Своевременная лесомелиорация позволила остановить процесс дальнейшей деградации экосистем, сформировав новые биогеоценозы.

Вызывает интерес современное состояние почв в разрезе содержания тяжелых металлов и мышьяка, особенностей их распределения по профилю с погребенным слоем зональной каштановой почвы под лесозащитными насаждениями сухостепной зоны.

Цель исследований состояла в оценке содержания тяжелых металлов и мышьяка, а также влияния защитных лесополос на накопление и распределение тяжелых металлов в профиле дефлированных почв, северо-запада Приволжской возвышенности.

Материалы и методы исследований

Объектами исследования являлись почвы сухостепной зоны юга Приволжской возвышенности в пределах территории эколого-климатической станции «Камышин» ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоградская область.

Климат умеренно-континентальный. Сухостепная зона Камышинского района характеризуется активным ветровым режимом, средний показатель 6-7 м/с достигая в отдельные периоды 25-27 м/с. Средние температуры зимнего сезона держатся в интервале от $-5,1^{\circ}\text{C}$ до $-7,2^{\circ}\text{C}$. В летний период максимальные температуры воздуха могут превышать $+40^{\circ}\text{C}$.

Промышленность г. Камышина является многопрофильной, но наибольшая доля промышленной продукции приходится на предприятия машиностроительной отрасли. Территория исследования расположена в 5 км от промышленного центра г. Камышина, представляет собой сухой сосновый бор на дефляционных песчаных отложениях юга Приволжской возвышенности (искусственные почвозащитные посадки) с древесными породами сосны крымской, дуба черешчатого, клена остролистного, ясеня ланцетного, тополя бальзамического, вяза обыкновенного, ореха грецкого. Возраст насаждений варьирует от 60 до 80 лет.

Почвенный покров характеризуется значительной комплексностью и наличием почв с двучленным профилем в виде задернованного прогумусированного эолового наноса и погребенной темно-каштановой почвы.

Для достижения поставленной цели на территории защитного лесного массива были выбраны пять пробных опытных площадок площадью 50 м^2 . На каждой пробной площадке закладывали три почвенных разреза (один полнопрофильный разрез до глубины 150 см и две почвенные прокопки глубиной 70 см). Всего было изучено 15 разрезов (рис. 1).

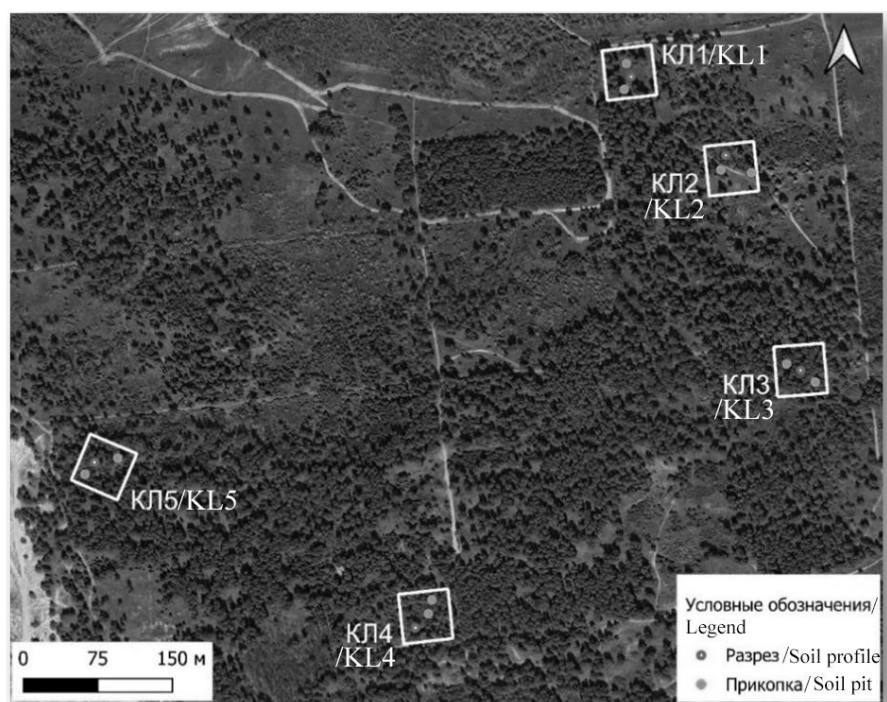


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей и мест закладки разрезов /

Fig. 1. Layout of the test areas and cross-section locations

Для каждого почвенного разреза проводили изучение морфологического строения профиля. По особенностям морфологического строения и видовой принадлежности [IUSS Working Group WRB ..., 2022] в целом почвы исследуемой территории представлены двумя группами: 1 группа – зональные каштановые светлогумусовые карбонатные почвы (Greyzemic Kastanozems и Haplic Kastanozems) на погребенной темно-каштановой постагрогенной почве (пробные площади КЛ 1, 2, 3); 2 группа – псаммоземы гумусовые (Eutric Lamellic Arenosols и Eutric Regosols) эолово-аккумулятивных подтипов, представляющие собой молодую почву на эоловых отложениях (пробные площади КЛ 4, 5).

Для определения содержания тяжелых металлов (ТМ) и мышьяка в почве отбирали почвенные пробы по генетическим горизонтам и для уточнения – слоям 0-10 см, 10-20 см, 20-30 см, 30-40 см, 40-50 см, 50-60 см, 60-70 см.

Наиболее простым и доступным методом первичной оценки содержания ТМ и мышьяка в почвах является рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), позволяющий проводить оперативный контроль загрязнения почвы.

Оценку содержания металлов и мышьяка в исследуемых почвах выполняли с использованием Спектрометра рентгенофлуоресцентного ЭКРОС XRF-9710. Гранулометрический состав определяли на дифракционном лазерном анализаторе размера частиц «Ласка-ТД». При названии почв по гранулометрическому составу использовали классификацию Качинского [Полевые и лабораторные методы ..., 2001]. Статистическую обработку данных проводили в среде программирования R.

Результаты и их обсуждение

Основными поллютантами в исследованных почвах являются: свинец (Pb), цинк (Zn), мышьяк (As), ртуть (Hg), медь (Cu).

По представленности в почвах для псаммоземов характерен следующий ряд накопления: $As < Hg < Pb < Zn < Cu$, для почв зонального ряда: $As < Hg < Zn < Pb < Cu$. Разница в содержании цинка и свинца в исследованных почвах связана с особенностями взаимодействия их с почвой и содержанием органического вещества. Свинец, по сравнению с цинком, в большинстве присутствует в почве в прочносвязанном состоянии с образованием комплексов с органическим веществом, глинистыми минералами и соединениями оксидов железа и марганца. Подвижность свинца в почве снижается в присутствии органического вещества, за счет чего накопление происходит в слоях с наибольшим содержанием органического вещества. Цинк, напротив, не образует прочных соединений и имеет высокую подвижность по почвенному профилю. Наибольшее представительство отмечено для меди, наименьшее – для мышьяка. Средние величины содержания металлов и мышьяка представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Среднее валовое содержание металлов в почвах (слой 0-70 см) / Average gross metal content in soils (layer 0-70 cm)

Me, мг/кг, Me mg/kg	1 группа / 1 group	2 группа / 2 group
Pb	8,66 ± 0,34	7,43 ± 0,18
Zn	20,83 ± 5,39	3,03 ± 1,02
As	2,17 ± 0,84	0,07 ± 0,07
Hg	8,60 ± 1,83	0,45 ± 0,45
Cu	22,14 ± 0,75	18,62 ± 0,68

Для почв зонального ряда (группа 1) с погребенным профилем темно-каштановой почвы средние выборочные величины содержания тяжелых металлов выше, чем в псаммоземах. Содержание свинца выше на 14%, цинка – на 85%, мышьяка – на 97%, ртути – на 85% и меди – на 16%.

Почвенные свойства влияют на распределение металлов и мышьяка по профилю. Это, в первую очередь, связано с гранулометрическим составом и особенно с содержанием тонкодисперсных частиц.

В таблице 2 представлен гранулометрический состав каштановой почвы (КЛ 1-1) и псаммозема (КЛ 4-2). В профиле псаммозема преобладают песчаные частицы 1,00 – 0,05 мм, доля которых достигает 90% в поверхностном слое. Преобладание песчаной фракции обеспечивает высокую водопроницаемость почвенного профиля. Доля крупной пыли (0,05-0,01 мм) в поверхностном слое 0-20 см составляет 0,6% и с глубины 20 см увеличивается до 8,5%. На фоне достаточно однородного гранулометрического состава выделяется иллювиальный слой 20-30 см, в котором присутствуют тонкодисперсные фракции и доля песка здесь значительно меньше. Морфологическое изучение почвы показало, что с глубины 40 см начинается плотный песчаный слой, представленный неагрегированной массой, являющейся по сути материнской породой.

В профиле каштановой почвы распределение фракций значительно отличается. В поверхностном слое песчаные фракции 1,00 – 0,05 мм составляют 63%, на долю крупной пыли приходится 32%. Такое распределение фракций связано с дефляционными процессами. Содержание илстых частиц мало и незначительно возрастает с глубиной от 1 до 5%, доля мелкого песка уменьшается и значительно возрастает фракция средней и мелкой пыли. Наиболее резкий переход по гранулометрическому составу отмечен с глубины 30 см и приурочен к началу погребенного профиля. По всей видимости, на этой глубине происходит аккумуляция тонкодисперсных частиц из менее плотных вышележащих слоев за счет механического «просеивания» дефляционных наносов.

Таблица 2 / Table 2

Гранулометрический состав в почвах (слой 0-70 см) /
Granulometric composition in soils (layer 0-70 cm)

Пробная площадь / Trial area	Слой, см / Layer, cm	Гранулометрический состав, % / Granulometric composition, %					
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
КЛ 1-1 / KL 1-1	0-10	15,54	47,90	27,26	4,77	3,84	0,69
	10-20	14,13	17,04	17,41	28,76	20,56	2,09
	20-30	17,18	34,16	10,34	20,84	15,68	1,81
	30-40	13,48	17,37	6,52	25,43	31,46	5,74
	40-50	13,48	17,37	6,52	25,43	31,46	5,74
	50-60	15,97	8,21	10,71	27,98	32,9	4,22
	60-70	15,97	8,21	10,71	27,98	32,9	4,22
КЛ 4-2 / KL 4-2	0-10	15,73	83,65	0,62	-	-	-
	10-20	15,73	83,65	0,62	-	-	-
	20-30	8,42	33,20	11,91	25,49	18,64	2,36
	30-40	11,25	80,20	8,55	-	-	-
	40-50	11,25	80,20	8,55	-	-	-
	50-60	11,25	80,20	8,55	-	-	-
	60-70	11,25	80,20	8,55	-	-	-

Примечание: КЛ 1-1 – каштановая почва, КЛ 4-2 – псаммозем. /

Note: KL 1-1 – chestnut soil, KL 4-2 – psammozem.

В почвах зонального ряда (КЛ 1-1) преобладает физическая глина (до 75%). В поверхностном слое зафиксировано наибольшее содержание песчаных частиц (около 60%), что говорит о наличии дефляционных наносов.

Варьирование содержания металлов и мышьяка по почвенному профилю (по средним выборочным) представлено на рисунке 2.

Цинк является микроэлементом, необходимым для роста и развития растений. Дефицит цинка в почвах приводит к снижению продуктивности растений. В больших концентрациях может быть токсичен для живых организмов. ПДК для валового содержания составляет 23 мг/кг. Исследованные почвы зонального ряда характеризуются средним содержанием цинка на уровне 20,83 мг/кг. В отдельном разрезе содержание цинка достигает до 208 мг/кг, что почти в 10 раз превышает ПДК (на графике представлены как выбросы). Цинк был обнаружен лишь в 43 % исследованных образцов зональной почвы. Для псаммоземов обеспеченность цинком значительно ниже, среднее содержание составляет 3,03 мг/кг. Цинк был обнаружен в 20 % образцов почв. Содержание варьирует от 7 до 20 мг/кг. Содержание цинка возрастает с глубиной для всех исследованных почв.

Свинец является одним из приоритетных поллютантов 1-го класса опасности, но в небольших количествах в почве необходим растениям. ПДК для валового содержания в почве составляет 32 мг/кг. Содержание свинца в каштановых почвах варьирует от полного его отсутствия до 16 мг/кг. С глубиной размах значений увеличивается. Среднее содержание составляет 8,66 мг/кг. Свинец обнаружен в 98% почвенных образцов. Среднее содержание свинца в псаммоземах ниже и составляет 7,43 мг/кг при варьировании от 5,7 до 9,6 мг/кг. Присутствие свинца зафиксировано во всех почвенных образцах. Превышения ПДК не зафиксировано.

Ртуть представляет собой один из самых токсичных металлов, который при комплексе факторов окружающей среды может находиться в жидком и парообразном состоянии, что обуславливает его высокую миграционную способность. ПДК содержания в почве – 2,1 мг/кг. В каштановых почвах ртуть присутствовала в 27% проб и повсеместно зафиксировано превышение ПДК. Содержание варьирует от 2,1 до 47,0 мг/кг, при среднем значении – 8,6 мг/кг. Наибольшее содержание отмечено в слое 50-70 см. При исследовании псаммоземов ртуть обнаружена лишь в одной пробе на глубине 20-30 см и содержание составило 19,0 мг/кг, что также превышает ПДК.

Медь является важным микроэлементом для растений, но в высоких концентрациях становится токсичной. ПДК валового содержания меди в почве составляет 55 мг/кг. Среднее содержание меди в каштановых почвах – 22,14 мг/кг, значения варьируют от 14 до 37 мг/кг. Для псаммоземов размах значений от 11 до 28 мг/кг при среднем значении 18,62 мг/кг. Медь обнаружена во всех почвенных пробах. Превышение ПДК не зафиксировано. С глубиной увеличивается разброс значений.

Мышьяк является загрязняющим веществом первого класса опасности. ПДК в почве соответствует 2 мг/кг. Исследования показали, что в каштановой почве мышьяк обнаружен в 46 % проб и содержание его варьирует от 2,2 до 6 мг/кг при среднем значении 2,17 мг/кг. В псаммоземах мышьяк обнаружен в одной пробе на глубине 20-30 см и его содержание составляет 2,9 мг/кг. Во всех пробах содержание мышьяка в почве превышает ПДК и закономерно увеличивается с глубиной.

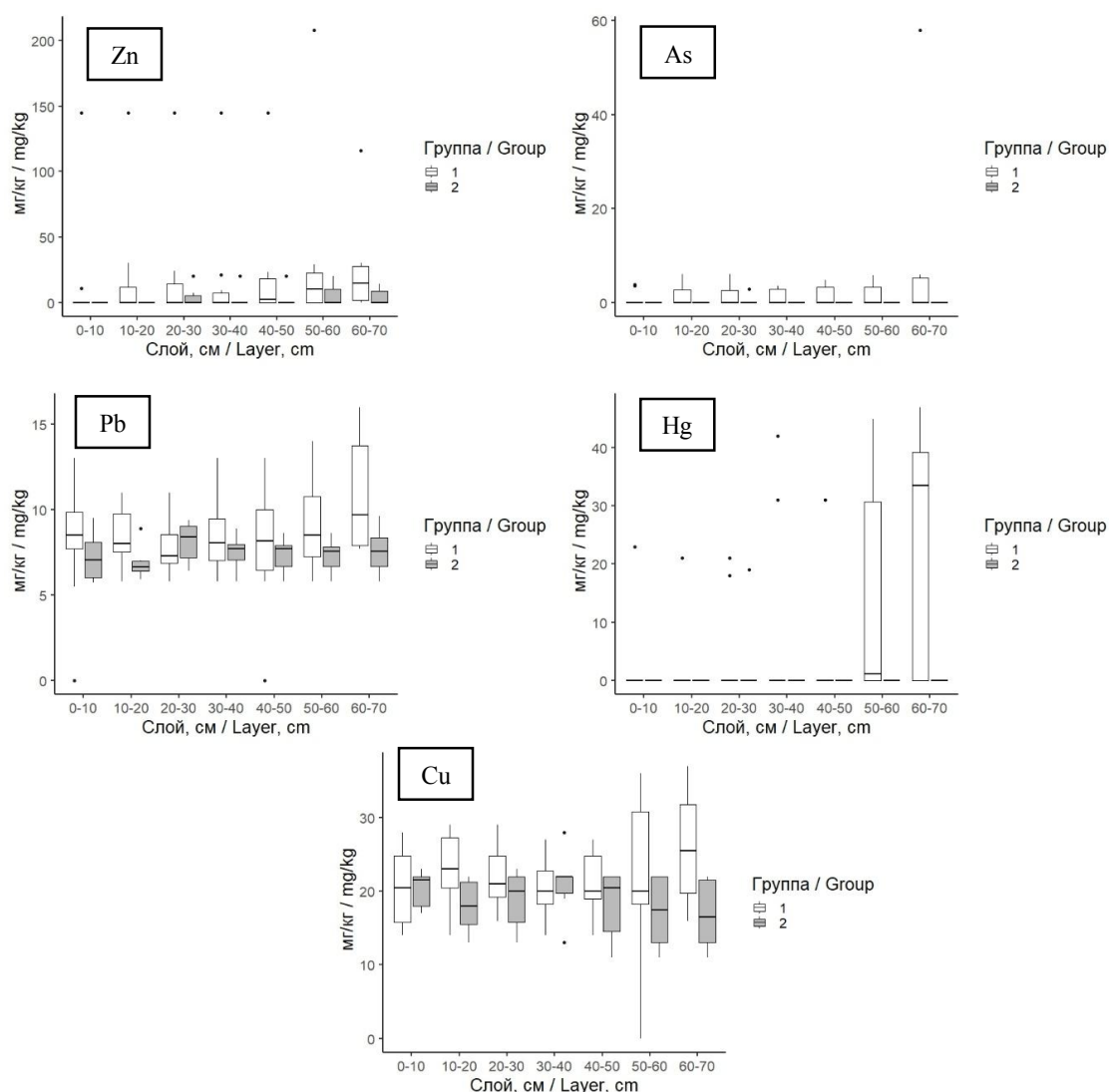


Рис. 2. Диаграммы размаха содержания ТМ и мышьяка в почвенном профиле /

Fig. 2. Diagrams of the range of TM and arsenic content in the soil profile

Анализ полученных результатов показал, что распределение металлов и мышьяка в двух изученных почвенных группах различно. В зависимости от процессов почвообразования происходят изменения в содержании и перераспределении изученных элементов по профилю почвы и дифференциации их с глубиной.

Более высокая доля тонкодисперсных фракций обуславливает большую сорбционную емкость каштановой почвы по сравнению с псаммоземами. Видимое увеличение содержания металлов (Cu, Pb, Hg, Zn) с глубины 50 см, очевидно, связано с многолетней аккумуляцией этих металлов в нижней части профиля погребенной почвы. Наличие исследованных элементов в поверхностном слое почвы позволяет утверждать, что процесс загрязнения продолжается. В каштановых почвах на объекте исследования повсеместно распространены свинец и медь в количествах, не превышающих ПДК. Ареалы почв с содержанием цинка значительно меньше. По отношению к мышьяку это утверждение также справедливо. Для почв Волгоградской области фоновое содержание мышьяка составляет 6,3 мг/кг [Доклад ..., 2024], что превышает фоновые значения, установленные Роскомземом и ПДК.

В псаммоземах вся исследованная территория характеризуется наличием меди в количествах, не превышающих ПДК. Остальные элементы представлены локально.

Выводы

Результаты проведенного исследования содержания Pb, Cu, Hg, Zn и As в сухо-степной зоне Волгоградской области под почвозащитными лесными насаждениями в двух группах почв: зональные каштановые с погребенным профилем темно-каштановой почвы и псаммоземы показали, что в пространственной локализации на объекте исследования наблюдается однородная степень рассеивания Pb и Cu, и сильно неоднородная степень распределения Hg, Zn и As. Отмечено увеличение содержания металлов и мышьяка с глубиной.

Наибольшее содержание металлов и мышьяка под лесными посадками отмечено для каштановых почв в погребенном гумусовом горизонте, что связано с более высоким содержанием тонкодисперсных фракций и повышенным содержанием органического вещества в гумусовом горизонте погребенной темно-каштановой почвы.

В гранулометрическом составе псаммоземов преобладают песчаные фракции, доля которых достигает 90% в поверхностном слое, и содержание изучаемых элементов значительно меньше или отсутствует за счет меньшей адсорбционной способности грубых фракций.

Для почв зонального ряда содержание ТМ и мышьяка превышает аналогичные величины для псаммоземов на 14% для свинца, на 85% для цинка и ртути, на 97% для мышьяка, на 16% для меди, превышая ПДК.

Таким образом, погребенные почвы (гумусовые горизонты) аккумулируют тяжелые металлы и мышьяк, что возможно является косвенным экологическим ущербом, который имеет отложенный эффект.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах. // Почвоведение. – 2012. – № 3. – С. 368–375.
2. Горбунова Н.С., Куликова Е.В. Миграционные циклы тяжелых металлов в лесных ландшафтах Каменной степи. // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения». Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 386–391.
3. Доклад о состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2023 году. // Комитет природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Волгоградской области. / Ред. коллегия: Е.П. Православнова, А.В. Лемешкин, Н.В. Петрова, М.А. Мытарев, А.В. Луконина, Е.В. Гугуева, А.Ю. Побежимова, И.Ю. Калюжная, Е.В. Малаева, Н.А. Супрун. – Иркутск: Медиамир, 2024. – 300 с.
4. Крамарева Т.Н., Горбунова Н.С., Куликова Е. В. Миграционные особенности тяжелых металлов в лесных ландшафтах. // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. №. 4(44). – С. 68–78. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6.
5. Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Сафонова А.А. Влияние лесных ландшафтов на миграцию тяжёлых металлов. // Модели и технологии природообустройства: региональный аспект. – 2022. – № 2(15). – С. 10 – 20.
6. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
7. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство. / Под редакцией Е.В. Шеина. – М.: МГУ, 2001. – 200 с.

8. Попов А.С. Лесомелиорация ландшафтов: учебно-методическое пособие. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2022. – 87 с.
9. Пугаев С.В., Чегодаева Н.Д. Влияние полезащитных лесополос на содержание тяжелых металлов в почве лесополосы и прилегающего поля. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 4(59). – С. 39–43.
10. Толкач О.В. Мониторинг распределения по профилю почв сосновых насаждений г. Первоуральска (Свердловская область) ионов меди, свинца и цинка в зоне техногенного воздействия. // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2022. – Т. 32. №. 3. – С. 303–311. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-3-303-311.
11. Cao H., Chen J., Zhang J., Zhang H., Qiao L., Men Y. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. // Journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 22. No. 11. – pp. 1792–1799. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60321-1.
12. Friedland A.J. The movement of metals through soils and ecosystems. // Heavy Metal Tolerance in Plants. – CRC Press, 2024. – pp. 7–20.
13. Gafurova L., Juliev M. Soil degradation problems and foreseen solutions in Uzbekistan. // Regenerative Agriculture: What's Missing? What Do We Still Need to Know? – Cham: Springer International Publishing, 2021. – pp. 59–67.
14. Gebeyehu H.R., Bayissa L.D. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. // PloS One. – 2020. – Vol. 15. No. 1. Art. No. e0227883.
15. Ikromov I.I., Kadamov A. Agroforestry against wind erosion damage: A Case study in Tajikistan. // Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – pp. 693–705.
16. Islam M.S., Hossain Md.K., Phoungthong Kh., Ismail Z. et al. Heavy metals in soil of three agroforestry systems: a preliminary study for source identification and ecological risk. // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2024. – Vol. 104. Issue 20. – pp. 9077–9093.
17. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria. – 2022. – 236 p.
18. Tikhonova E.N., Gorbunova N., Safonova A., Treschevskaya E., Ye J., Yuan H., Ma Ch. Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems. // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Vol. 13. No. 1(49). – pp. 257–267. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17.
19. Török P., Bede-Fazekas Á., Erdős L. European steppes and forest-steppes. // Terrestrial Biomes. – Academic Press, 2025. – pp. 173–185. DOI: 10.1016/B978-0-443-36569-0.00012-4.
20. Wang F., Wang F., Yang H., Yu J., Ni R. Ecological risk assessment based on soil adsorption capacity for heavy metals in Taihu basin, China. // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 316. Art. No. 120608. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120608.

References

1. Vodyanitsky Yu.N. Standards for the content of heavy metals and metalloids in soils. Soil Science. 2012. No. 3. pp. 368–375. (In Russ.)
2. Gorbunova N. S., Kulikova E. V. Migration cycles of heavy metals in forest landscapes of Kamennaya Steppe. In: Materials of XVII All-Russian Sc. and Prac. Conf. Ecology of native land: problems and ways of their solution. Kirov. Vyatka State University. 2022. pp. 386–391. (In Russ.)
3. Report on the state of the environment of Volgograd region in 2023. Irkutsk. Mediamir. 2024. 300 p. (In Russ.)
4. Kramareva T.N., Gorbunova N.S., Kulikova E.V. Migration features of heavy metals in forest landscapes. Forestry Engineering Journal. 2021. Vol. 11. No. 4(44). pp. 68–78. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6. (In Russ.)

5. Kulikova E.V., Gorbunova N.S., Safonova A.A. Influence of forest landscapes on heavy metal migration. *Models and Technologies of Environmental Engineering: Regional Aspect*. 2022. No. 2(15). pp. 10–20. (In Russ.)
6. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. Heavy metals in ecosystems. *Saratov. Rakurs*. 2017. 178 p. (In Russ.)
7. Field and laboratory methods for studying physical properties and regimes of soils: Methodological guide. Ed. E.V. Shein. Moscow. Moscow State University. 2001. 200 p. (In Russ.)
8. Popov A.S. Forest reclamation of landscapes: study guide. Yekaterinburg. Ural State Forest Engineering University. 2022. 87 p. (In Russ.)
9. Pugaev S.V., Chegodaeva N.D. Influence of shelterbelts on the content of heavy metals in the soil of shelterbelt and adjacent field. *Agricultural Science of Euro-North-East*. 2017. No. 4(59). pp. 39–43. (In Russ.)
10. Tolkach O.V. Monitoring of copper, lead and zinc ions distribution in soil profile of pine plantations in Pervouralsk (Sverdlovsk region) under technogenic impact. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences Series*. 2022. Vol. 32. No. 3. pp. 303–311. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-3-303-311. (In Russ.)
11. Cao H., Chen J., Zhang J., Zhang H., Qiao L., Men Y. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. *Journal of Environmental Sciences*. 2010. Vol. 22. No. 11. pp. 1792–1799. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60321-1.
12. Friedland A.J. The movement of metals through soils and ecosystems. *Heavy Metal Tolerance in Plants*. CRC Press. 2024. pp. 7–20.
13. Gafurova L., Juliev M. Soil degradation problems and foreseen solutions in Uzbekistan. *Regenerative Agriculture: What's Missing? What Do We Still Need to Know?* Cham. Springer. 2021. pp. 59–67.
14. Gebeyehu H.R., Bayissa L.D. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. *PloS One*. 2020. Vol. 15. No. 1. Art. No. e0227883. DOI: 10.1371/journal.pone.0227883.
15. Ikromov I.I., Kadamov A. Agroforestry against wind erosion damage: A case study in Tajikistan. *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*. Cham. Springer. 2021. pp. 693–705.
16. Islam M.S., Hossain Md.K., Phoungthong Kh., Ismail Z. et al. Heavy metals in soil of three agroforestry systems: a preliminary study for source identification and ecological risk. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 104. No. 20. pp. 9077–9093.
17. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna. International Union of Soil Sciences. 2022. 236 p.
18. Tikhonova E.N., Gorbunova N., Safonova A., Treschevskaya E., Ye J., Yuan H., Ma Ch. Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems. *Forestry Engineering Journal*. 2023. Vol. 13. No. 1(49). pp. 257–267. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17.
19. Török P., Bede-Fazekas Á., Erdős L. European steppes and forest-steppes. *Terrestrial Biomes*. Academic Press. 2025. pp. 173–185. DOI: 10.1016/B978-0-443-36569-0.00012-4.
20. Wang F., Wang F., Yang H., Yu J., Ni R. Ecological risk assessment based on soil adsorption capacity for heavy metals in Taihu basin, China. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 316. Art. No. 120608. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120608.