

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.6.02:504.064:504.054

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-2-205-224

Особенности поступления тяжелых металлов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта

Андрей Валерьевич Ильинский¹, Константин Николаевич Евсенкин²,
Артем Андреевич Павлов³

^{1, 2, 3}Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова,
Москва, Российская Федерация

¹ilinskiy-19@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6843-9170>

²kn.evsenkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0194-8552>

³kupoz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5932-1624>

Аннотация. **Цель:** изучение особенностей поступления поллютантов в агроэкосистему мелиорированных земель пойменного агроландшафта в зависимости от уровня седиментной нагрузки. **Материалы и методы.** Исследования выполнены на пахотных пойменных мелиорированных землях, расположенных вблизи г. Рязани. Сбор седиментов выполнялся посредством седиментационных ловушек. Отбор почвенных образцов осуществлялся методом конверта. Лабораторный анализ отобранных проб на содержание кислоторастворимых форм меди, цинка, свинца, кадмия, никеля, хрома, ртути и марганца в седиментах и почве определялся методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии, содержание мышьяка – фотометрическим методом. **Результаты и обсуждение.** Определен уровень седиментной нагрузки на территорию участка (11,9–15,8 т/га), при котором происходит поступление поллютантов в агроландшафт в диапазоне значений: медь 15,1–20,7 мг/кг; цинк 9,2–97,4; свинец 15,5–21,5; кадмий 6,56–22,8; никель 26,2–34,0; хром 30,2–70,3; ртуть 0,029–0,042; мышьяк 5,71–9,11; марганец 571–668 мг/кг. Степень загрязнения седиментов тяжелыми металлами и мышьяком соответствует высокоопасной категории (Zс – 74,04). На основании полученных экспериментальных данных определен эмпирический ряд поступления в агроландшафт с седиментами изучаемых химических элементов (Mn > Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > Cd > As > Hg), построены зависимости содержания поллютантов в паводковых седиментах от уровня седиментной нагрузки. **Выводы.** Исследования свидетельствуют о высоком техногенном воздействии на почву выпадающих седиментов и о необходимости организации агроэкологического мониторинга на предмет содержания рассматриваемых поллютантов в паводковых отложениях и подстилающей почве с целью возможного прогнозирования и перспективы использования комплексных агромелиоративных приемов, направленных на снижение негативных последствий загрязнения почв пойменных земель и повышение экологической устойчивости агроландшафта в пойме р. Ока.

Ключевые слова: паводковые седименты, пойменный агроландшафт, седиментная нагрузка, техногенное загрязнение, тяжелые металлы, экологическая безопасность

Для цитирования: Ильинский А. В., Евсенкин К. Н., Павлов А. А. Особенности поступления тяжелых металлов с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 2. С. 205–224. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-205-224>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Features of heavy metal input with flood sediments on the reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape

Andrey V. Ilyinsky¹, Konstantin N. Evsenkin², Artyom A. Pavlov³

^{1, 2, 3}All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation
named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

¹ilinskiy-19@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6843-9170>

²kn.evsenkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0194-8552>

³kupo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5932-1624>

Abstract. Purpose: to study the features of pollutant input into the agro-ecosystem of reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape depending on the level of sediment load. **Materials and methods.** The studies were carried out on arable floodplain reclaimed lands located near the town Ryazan. Sediments were collected using sediment traps. Soil samples were taken using the envelope method. Laboratory analysis of the samples for the content of acid-soluble forms of copper, zinc, lead, cadmium, nickel, chromium, mercury and manganese in sediments and soil was determined by atomic emission and atomic absorption spectrometry, and the arsenic content was determined by the photometric method. **Results and discussion.** The level of sediment load on the territory of the site (11.9–15.8 t/ha) was determined, at which pollutants enter the agricultural landscape in the following range of values: copper 15.1–20.7 mg/kg; zinc 9.2–97.4; lead 15.5–21.5; cadmium 6.56–22.8; nickel 26.2–34.0; chromium 30.2–70.3; mercury 0.029–0.042; arsenic 5.71–9.11; manganese 571–668 mg/kg. The degree of sediment pollution with heavy metals and arsenic corresponds to the highly hazardous category ($Z_c = 74.04$). Based on the obtained experimental data, an empirical series of the input of the studied chemical elements into the agrolandscape with sediments was determined ($Mn > Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > Cd > As > Hg$), and dependencies of the pollutant content in flood sediments on the level of sediment load were constructed. **Conclusions.** The studies indicate a high technogenic impact of precipitated sediments on soil and the need to organize agroecological monitoring for the pollutant content in flood sediments and underlying soil for the purpose of possible forecasting and prospects for using complex agro-reclamation techniques aimed at reducing the negative consequences of soil pollution in floodplain lands and increasing the environmental sustainability of the Oka River floodplain agrolandscape.

Keywords: flood sediments, floodplain agricultural landscape, sediment load, technogenic pollution, heavy metals, environmental safety

For citation: Ilyinsky A. V., Evsenkin K. N., Pavlov A. A. Features of heavy metal input with flood sediments on the reclaimed lands of the floodplain agricultural landscape. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(2):205–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-205-224>.

Введение. Ключевым аспектом экологической оценки мелиорированных земель пойменного агроландшафта является контроль за загрязнением почвы поступающими из антропогенных источников поллютантами, в т. ч. и тяжелых металлов [1, 2]. Значительный вклад в накоплении тяжелых

металлов на пахотных землях, расположенных в затапливаемой части речной долины р. Ока, вносят паводковые седименты, аккумулирующиеся на поверхности почвы во время затопления территории полыми водами [3–5]. Паводковые седименты в своем составе содержат тяжелые металлы, что обуславливает постепенное загрязнение ими почвы. Тяжелые металлы в процессе транслокации накапливаются в растительных тканях сельскохозяйственных культур, а впоследствии по пищевым цепям проникают в организм животных и человека, нанося ущерб здоровью [6–12].

Распределение паводковых седиментов зависит от множества факторов, таких, как интенсивность половодья, содержание взвешенных веществ в воде, рельеф местности и шероховатость почвенного покрова [13–15]. В связи с этим важным составляющим экологического мониторинга сельскохозяйственных угодий являются исследования, направленные на определение седиментной нагрузки, оценку химического состава и анализ структуры поступления тяжелых металлов с паводковыми седиментами в пойменные агроландшафты.

Результаты этих исследований обосновывают необходимость проведения агромелиоративных мероприятий, позволяющих получать экологически безопасную сельскохозяйственную продукцию в условиях техногенного воздействия на агроландшафт [16].

Цель исследований заключалась в изучении особенностей поступления поллютантов в агроэкосистему мелиорированных земель пойменного агроландшафта в зависимости от уровня седиментной нагрузки.

Основными задачами являлись: определение уровня седиментной нагрузки на аллювиальную почву на опытном поле; оценка степени загрязнения седиментов тяжелыми металлами и мышьяком; изучение структуры поступления в агроландшафт с седиментами химических элементов; определение зависимостей содержания поллютантов в паводковых седиментах от уровня седиментной нагрузки.

Материалы и методы. В статье приведены результаты исследований особенностей поступления тяжелых металлов и мышьяка с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта за 2022–2024 гг. Экспериментальные наблюдения проведены на стационарном участке пахотных мелиорированных пойменных земель (площадью 200 тыс. м²), расположенном в двух километрах на север от г. Рязани и являющимся типичным для поймы р. Ока. Почвенный покров участка наблюдений представлен аллювиальной луговой среднесуглинистой почвой со следующими агрохимическими характеристиками: $pH_{(KCl)}$ – 6,4 ед., органическое вещество – 3,25 %, общий азот – 0,18 %, подвижный фосфор – 123 мг/кг, обменный калий – 76,3 мг/кг.

По данным ряда авторов [13, 17], центральная пойма р. Ока подвержена сильному техногенному воздействию. Основными источниками загрязнения экосистемы являются промышленные и коммунальные сбросы в р. Ока, выбросы в атмосферу от энергетического сектора, транспорта, промышленности и сельского хозяйства. По сведениям надзорных органов, в Рязанской области отмечается высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха и поверхностной воды в р. Ока по большому перечню веществ¹. Приоритетными поллютантами являются цинк, свинец, кадмий, никель, хром, ртуть, мышьяк, медь, марганец [5, 13, 17].

В основу проведения натурных исследований по изучению особенностей поступления тяжелых металлов и мышьяка с паводковыми седиментами на мелиорированные земли пойменного агроландшафта положена авторская методика «Способ контроля поступления тяжелых металлов и

¹Доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Рязанской области в 2021 году / Ком. природ. ресурсов по Рязан. обл. Рязань, 2021. 163 с.

мышьяка в составе седиментной нагрузки на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта»².

Для изучения седиментной нагрузки на исследуемой территории использовались седиментационные ловушки, состоящие из ворсистых пластиковых матов, расположенных на расстоянии 0,45 км друг от друга. Со сходом паводковых вод ловушки снимались с экспериментального участка, транспортировались в лабораторию, высушивались, затем седименты извлекались посредством встряхивания и чистки матов, определялась масса седиментов и проводились их химико-аналитические исследования. Отбор почвенных образцов из пахотного слоя почвы осуществлялся методом конверта.

Лабораторный анализ отобранных проб паводковых седиментов и аллювиальной почвы на определение содержания тяжелых металлов и мышьяка выполнен в соответствии с общепринятыми методиками определения химических показателей. Содержание кислоторастворимых форм меди, цинка, свинца, кадмия, никеля, хрома, ртути и марганца в седиментах и почве определено с использованием «Методики выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии» (2008 г.). Содержание мышьяка – с использованием «Методических указаний по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом» (1993 г.).

Результаты и обсуждение. Период проведения исследований характеризовался неоднородным по срокам и величине паводком, уровень которого в разные годы достигал пиковых отметок 510–598 см относительно нулевой отметки гидрологического поста в г. Рязани, при этом территория

²Пат. 2815978 Российская Федерация, МПК G01N 33/24 (2006.01); A01G 20/20 (2018.01). Способ контроля поступления тяжелых металлов и мышьяка в составе седиментной нагрузки на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта / Ильинский А. В., Евсенкин К. Н., Павлов А. А., Голубенко М. И.; патентообладатель ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова». № 2023119944; заявл. 28.07.23; опубл. 25.03.24, Бюл. № 9. 11 с.

исследований подвергалась полному затоплению на период 1–1,5 мес. На рисунке 1 представлена сравнительная оценка седиментной нагрузки на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта р. Ока в 2022–2024 гг.

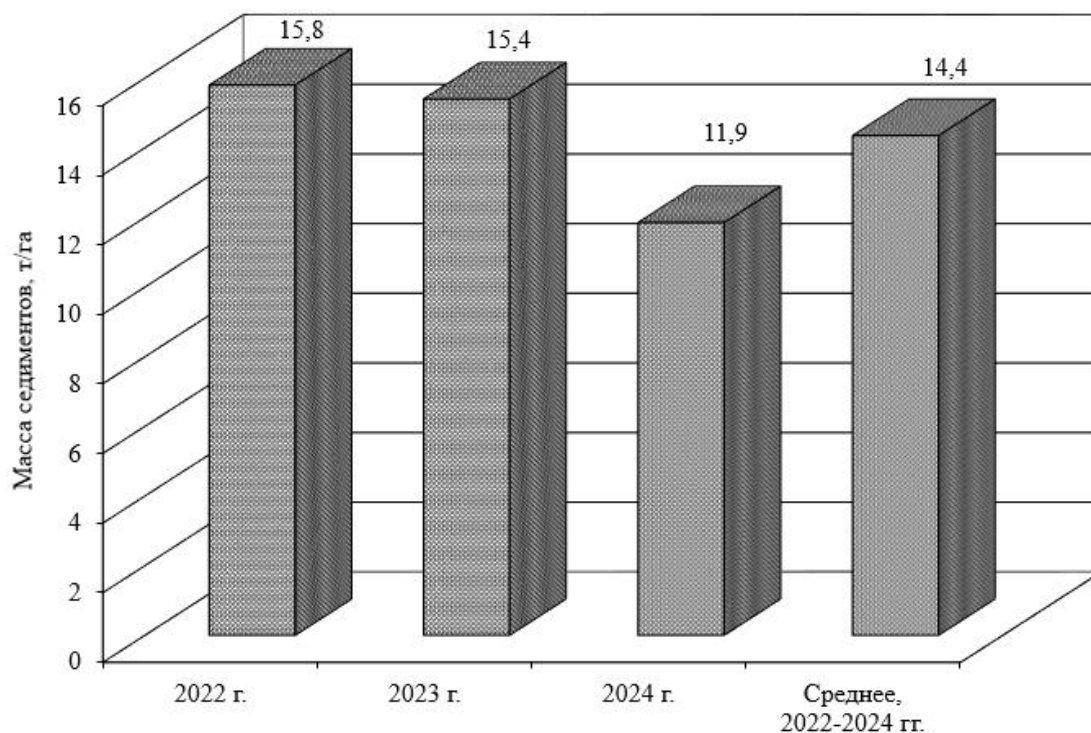


Рисунок 1 – Седиментная нагрузка на пахотные мелиорированные земли пойменного агроландшафта р. Ока

Figure 1 – Sedimentary load on arable reclaimed lands of the Oka River floodplain agricultural landscape

Уровень седиментной нагрузки на исследуемую территорию варьировал от 11,9 до 15,8 т/га, что во многом связано с режимом уровня воды в периоды весеннего затопления паводковыми водами.

В период проведения наблюдений наиболее высокий уровень седиментной нагрузки на земли пойменного агроландшафта р. Ока наблюдался весной 2022 г., превышение среднееголетнего значения составило 9,7 %. В 2023 г. уровень седиментной нагрузки был немного ниже, чем в 2022 г., при этом превышение среднееголетнего значения составило 6,7 %, а в 2024 г. уровень седиментной нагрузки был ниже среднееголетнего значения на 17,4 %. Сравнение среднееголетнего уровня седиментной нагрузки с дан-

ными [5, 13], полученными в 1999 г. на данном створе при схожем паводке, показало, что его значение было превышено на 1,5 т/га.

В таблице 1 представлены обобщенные результаты изучения содержания тяжелых металлов и мышьяка в седиментах и подстилающей аллювиальной почве.

Таблица 1 – Содержание валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в седиментах и подстилающей аллювиальной почве, среднее за 2022–2024 гг.

В мг/кг

Table 1 – The content of gross forms of heavy metals and arsenic in sediments and underlying alluvial soil, average for 2022–2024

In mg/kg

Элемент	Содержание*		Региональный фон [17]	Ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) / Предельно допустимая концентрация (ПДК)** (СанПиН 1.2.3685-21) ³
	Седименты	Почва		
Медь	<u>15,1–20,7</u> 18,0 ± 1,8	<u>14,9–22,7</u> 18,9 ± 1,7	27	132
Цинк	<u>93,2–97,4</u> 95,2 ± 5,5	<u>68,1–81,2</u> 76,5 ± 3,1	35	220
Свинец	<u>15,5–21,5</u> 18,1 ± 1,8	<u>15,8–19,5</u> 17,3 ± 1,5	12	130
Кадмий	<u>6,56–22,80</u> 12,2 ± 0,88	<u>0,19–0,34</u> 0,30 ± 0,05	0,18	2,0
Никель	<u>26,2–34,0</u> 30,0 ± 1,9	<u>30,2–30,6</u> 30,4 ± 2,3	20	80
Хром	<u>30,2–70,3</u> 45,2 ± 2,4	<u>17,8–34,2</u> 28,4 ± 1,4	61	–
Ртуть	<u>0,029–0,042</u> 0,036 ± 0,004	<u>0,030–0,129</u> 0,080 ± 0,007	0,01	2,1**
Мышьяк	<u>5,71–9,11</u> 6,90 ± 0,72	<u>3,20–4,67</u> 3,90 ± 0,42	5,0	10
Марганец	<u>571–668</u> 620 ± 42	<u>534–554</u> 544 ± 38	400	1500

Примечание – * – в числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение. Измерение в четырех повторностях (среднее ± доверительный интервал, при α = 0,95). ** – ПДК.

³Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]: Постановление от 28 янв. 2021 г. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

Исследования показали, что в паводковом седименте отмечается превышение гигиенического норматива по кадмию в 6,1 раза, по остальным поллютантам превышение составило: As – 0,69 ОДК; Zn – 0,43 ОДК; Mn – 0,41 ОДК; Ni – 0,38 ОДК; Cu – 0,14 ОДК; Pb – 0,14 ОДК; Hg – 0,02 ПДК. Превышение регионального фона отмечается по кадмию в 67,78 раза, по ртути – в 3,6 раза, по цинку – в 2,72 раза, по марганцу – в 1,55 раза, по свинцу – в 1,51 раза, по никелю – в 1,5 раза, по мышьяку – в 1,38 раза. Только по меди превышения фоновых значений не выявлено: значение коэффициента концентрации составило 0,67. При этом оценка химического загрязнения паводковых седиментов относится к высокоопасной категории (Z_c соответствует 74,04).

В подстилающей аллювиальной почве превышений гигиенических нормативов содержания тяжелых металлов и мышьяка не выявлено. Превышение фоновых значений наблюдалось по ртути в 8 раз, по цинку – в 2,19 раза, по кадмию – в 1,67 раза, по никелю – в 1,52 раза, по свинцу – в 1,44 раза, по марганцу – в 1,36 раза по остальным элементам значение коэффициентов концентрации составило: по мышьяку – 0,78, по меди 0,7, по хрому – 0,47. При этом оценка химического загрязнения аллювиальной почвы относится к допустимой категории (Z_c соответствует 11,2).

Наибольшее превышение содержания тяжелых металлов и мышьяка в седиментах в сравнении с подстилающей почвой характерно для кадмия – в 40,67 раза, мышьяка – в 1,77 раза, хрома – в 1,59 раза, цинка – в 1,24 раза, марганца – в 1,14 раза, свинца – в 1,05 раза. По меди, ртути и никелю превышения зафиксировано не было.

Большой диапазон значений содержания тяжелых металлов в почв, особенно цинка, кадмия, хрома (таблица 1), по нашему мнению, связан с тем, что исследуемый агроландшафт подвержен очень высокой антропогенной нагрузке ввиду расположения вблизи крупного города с развитой промышленностью, сельским хозяйством, автодорожной сетью. Офици-

альная статистика на территории региона подтверждает выбросы десятков тысяч тонн поллютантов в атмосферный воздух и поверхностные воды. В значительной степени ускоряет диффузное загрязнение приходящее половодье, при котором происходит бурное и неконтролируемое поступление тяжелых металлов из русла в пойму и наоборот. Перенос тяжелых металлов может происходить с огромных площадей и на большие расстояния. В период половодья бурные потоки поднимают взвеси со дна (донные отложения, как известно, содержат основную массу тяжелых металлов в русле), полая вода также перемещает частицы с поверхности исследуемого агроландшафта на другие участки поймы или в русло. Таким образом, в период паводка происходит интенсивный обмен, в частности, тяжелыми металлами между поймой и руслом.

Результаты оценки поступления валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в агроландшафт представлены на рисунках 2, 3.

По меди в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2024 г.: превышение составило 14,2 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2022 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 14,55 %. По цинку в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2022 г.: превышение составило 1,5 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2023 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 2,93 %. По свинцу в сравнении со среднемноголетним значением: наибольшее поступление отмечалось в 2024 г.: превышение составило 18 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2023 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 14,9 %.

По кадмию в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2024 г.: превышение составило 85,7 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2022 г., значение ниже среднемноголетнего показателя на 45,2 %.

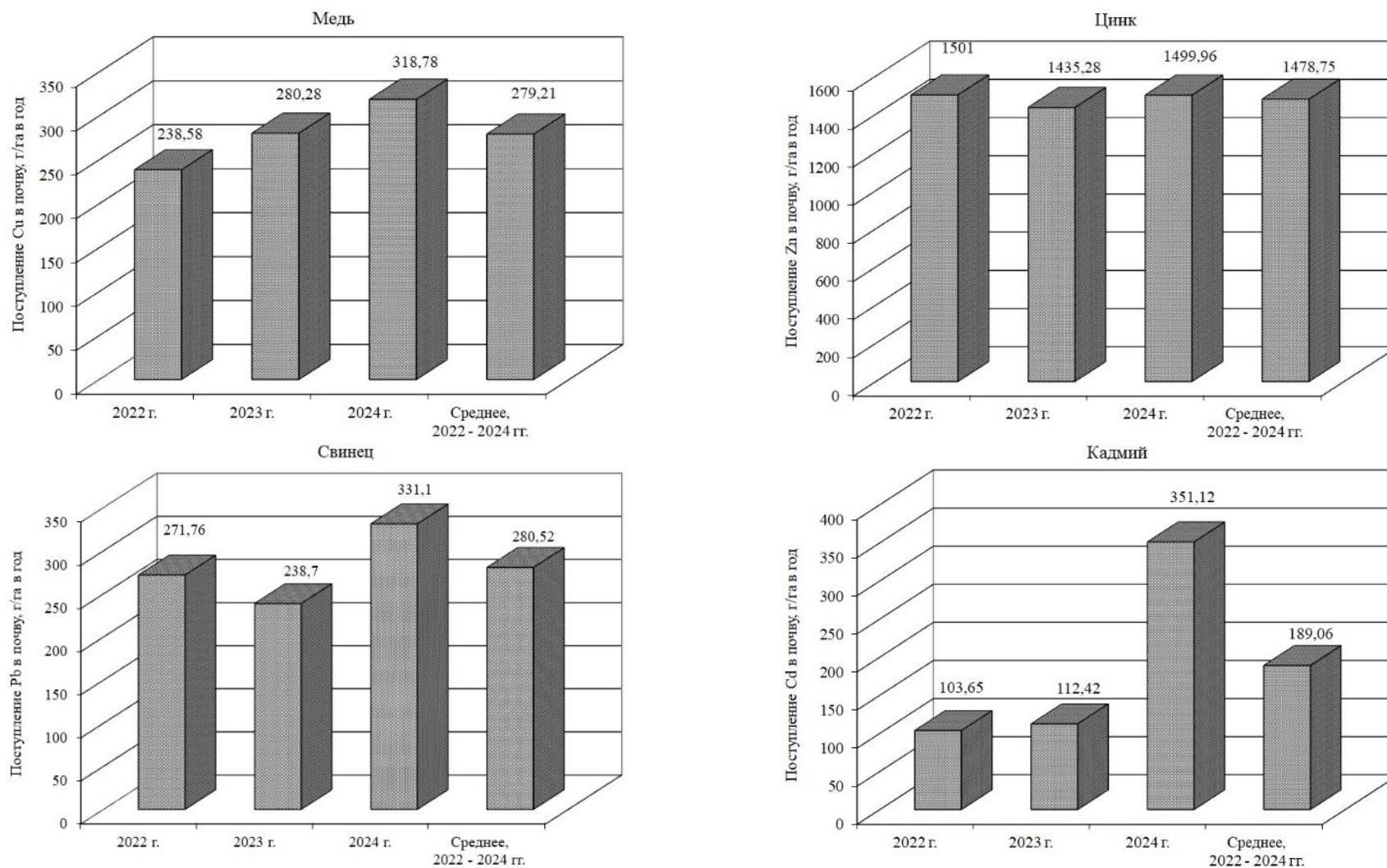


Рисунок 2 – Графическое представление поступления валовых форм меди, цинка, свинца, кадмия
Figure 2 – Graphical representation of the input of gross forms of copper, zinc, lead, cadmium

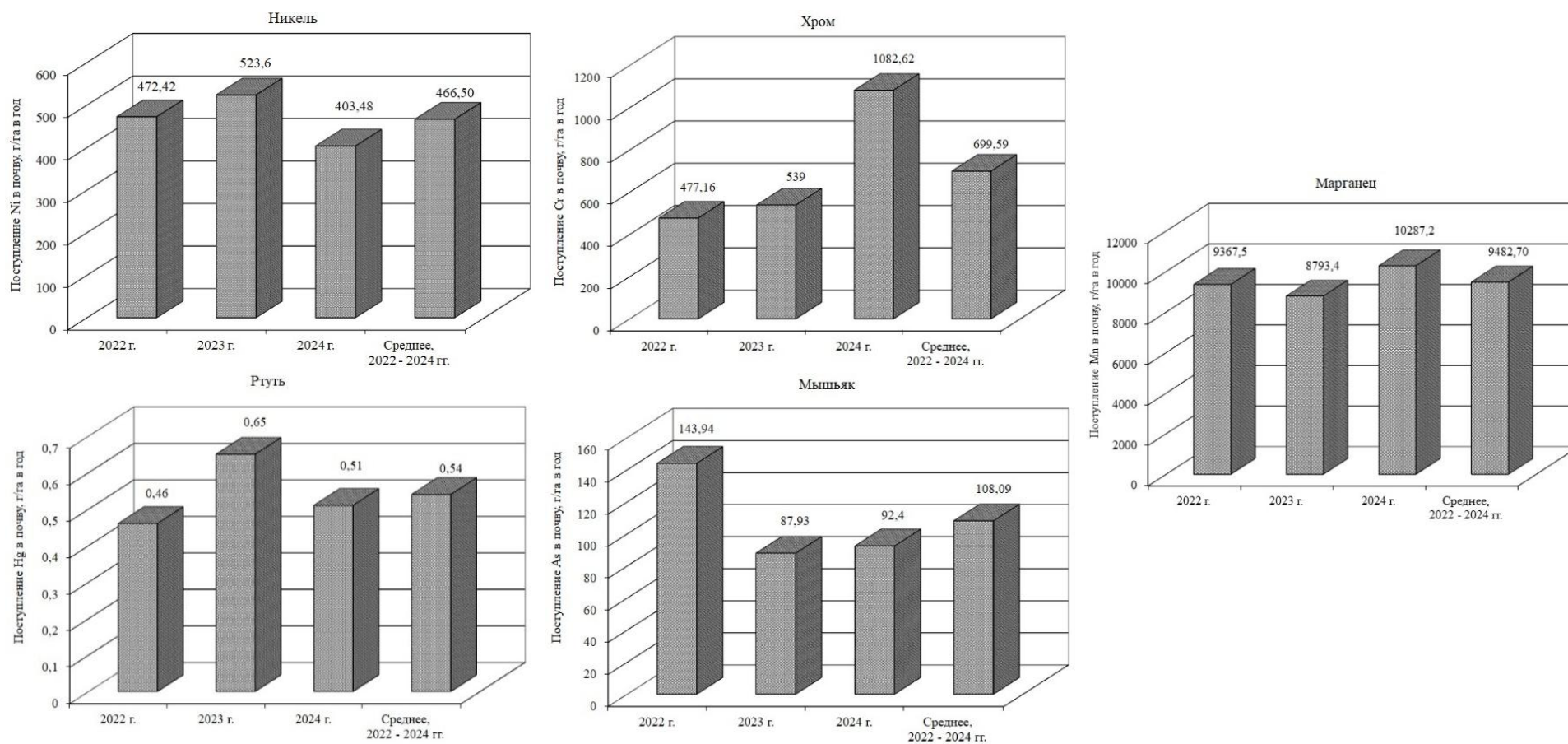


Рисунок 3 – Графическое представление поступления валовых форм никеля, хрома, ртути, мышьяка, марганца
Figure 3 – Graphical representation of the input of gross forms of nickel, chromium, mercury, arsenic, manganese

По никелю в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2023 г.: превышение составило 12,2 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2024 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 13,5 %. По хрому в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2024 г.: превышение составило 54,7 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2022 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 31,8 %. По ртути в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2023 г.: превышение составило 20,4 %: Наименьшее поступление зафиксировано в 2022 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 14,8 %. По мышьяку в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2022 г.: превышение составило 33,2 %. Наименьшее поступление зафиксировано в 2023 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 18,6 %. По марганцу в сравнении со среднемноголетним значением наибольшее поступление отмечалось в 2024 г.: превышение составило 8,5 %: наименьшее поступление зафиксировано в 2023 г.: значение ниже среднемноголетнего показателя на 7,3 %.

Всплески содержания тяжелых металлов в седиментах зависят от многих факторов, таких, как интенсивность и характер прохождения паводка, количество загрязняющих веществ в пойме и русле и их доступность к переносу, ландшафтные условия поймы, количество выпавших на рельеф седиментов. В 2024 г. отмечалась более низкая седиментная нагрузка, чем другие годы, и, по нашему мнению, в составе общей массы седиментов на долю инертных частиц (песка) приходилось меньше, что существенно повлияло на повышение концентрации тяжелых металлов в паводковых седиментах. Данное мнение находит подтверждение в исследовани-

ях П. И. Пыленка [5]. Он отмечал, что увеличение седиментной нагрузки приводит к снижению органического вещества до 50 %, а при уменьшении седиментной нагрузки, наоборот, происходит увеличение содержания органического вещества. По мнению ряда других авторов [13, 17], увеличение содержания органического вещества в седиментах приводит к возрастанию их буферной способности, а, следовательно, к возможности более интенсивного накопления тяжелых металлов, в частности кадмия, в седиментах.

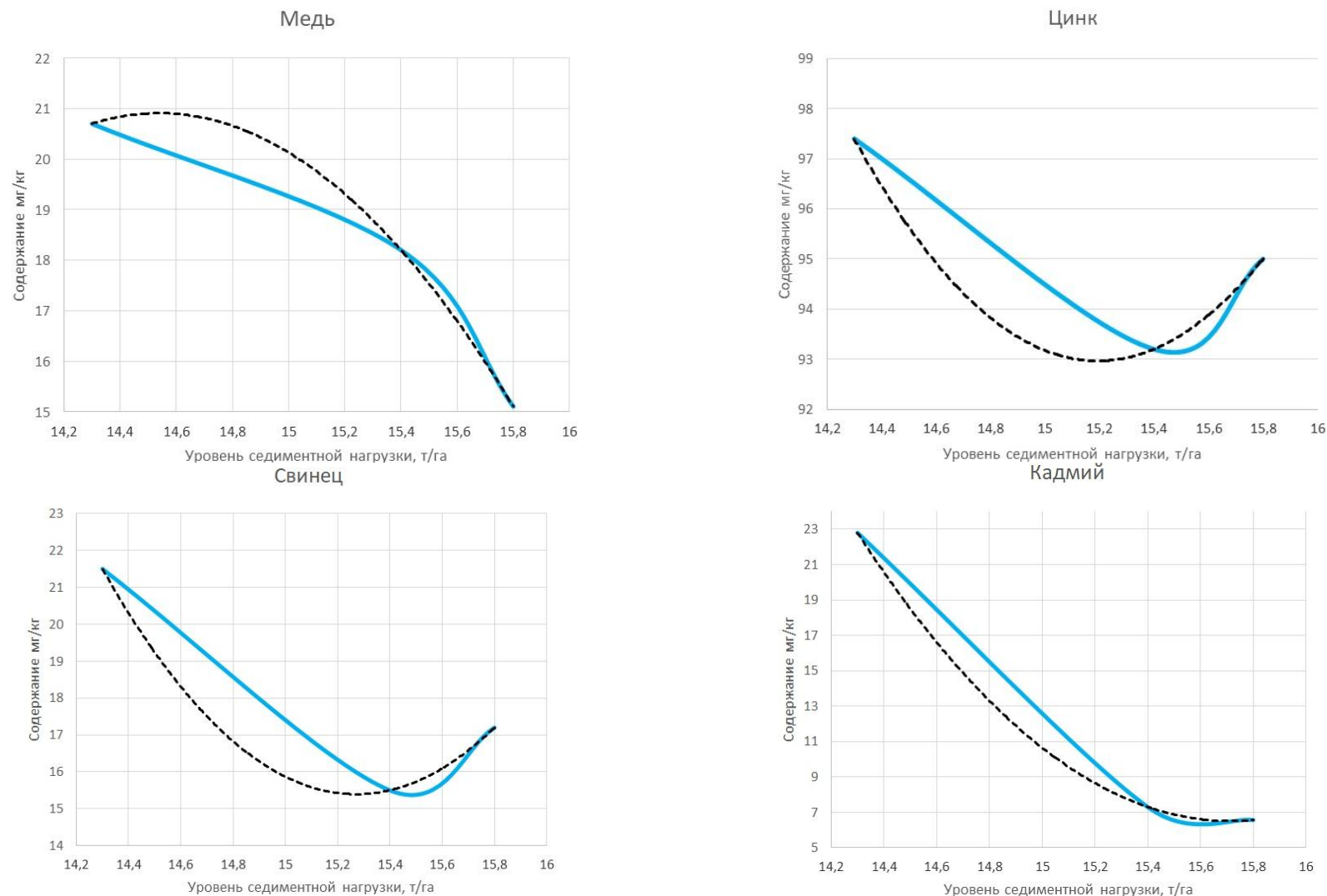
На основании проведенных многолетних исследований были получены зависимости содержания поллютантов в седиментах от уровня седиментной нагрузки (рисунки 4, 5, таблица 2).

Представленные эмпирические зависимости содержания в седименте тяжелых металлов и мышьяка от уровня седиментной нагрузки описываются уравнениями регрессии, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Эмпирические зависимости содержания в седиментах валовых форм меди, цинка, свинца, кадмия в зависимости от уровня седиментной нагрузки

Table 2 – Empirical dependences of the content of gross forms of copper, zinc, lead, and cadmium in sediments depending on the sedimentation load level

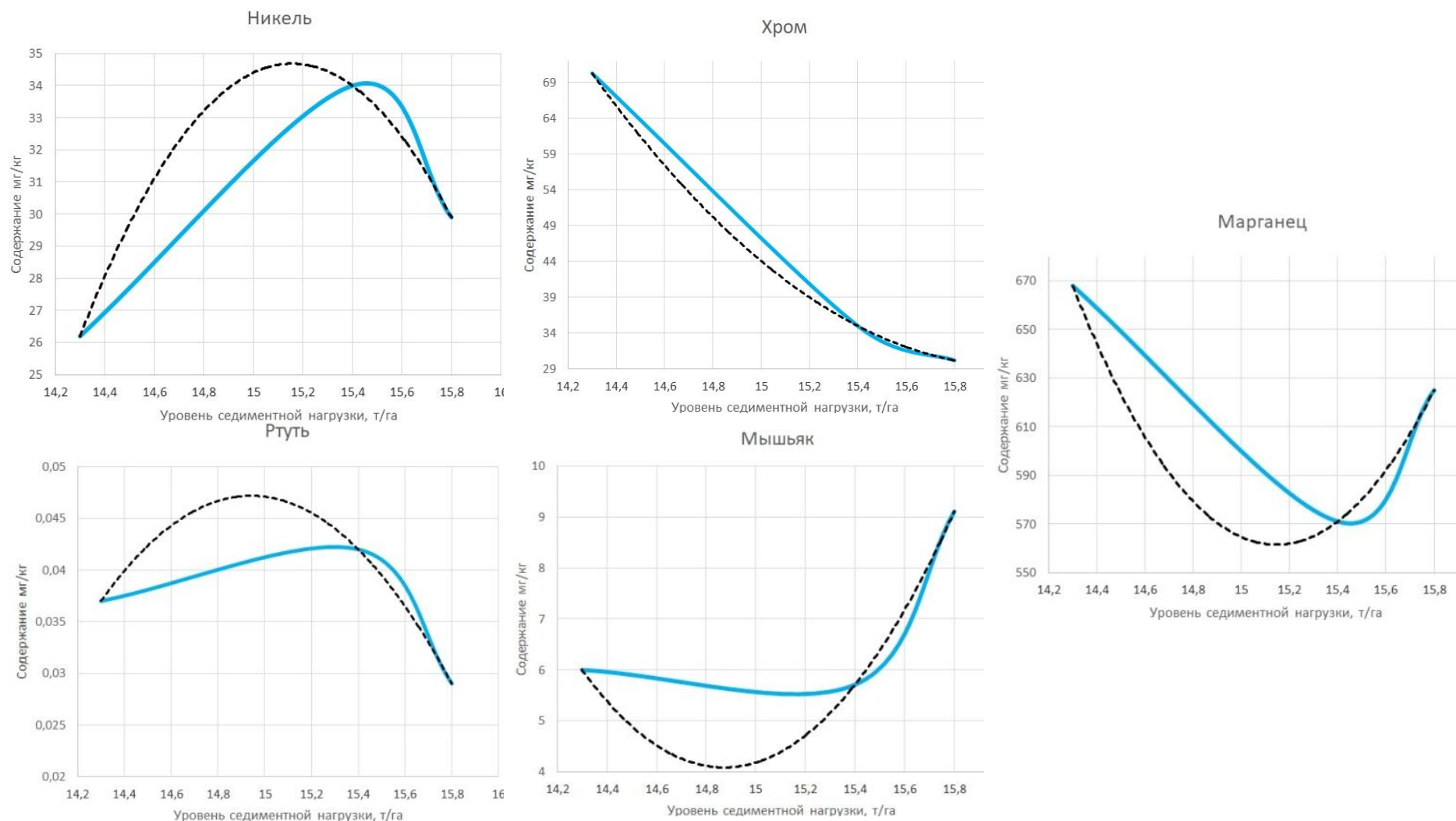
Элемент	Уравнение регрессии*
1) Медь	$y = -3,6515x^2 + 106,18x - 750,94$
2) Цинк	$y = 5,5455x^2 - 168,52x + 1373,2$
3) Свинец	$y = 6,4697x^2 - 197,6x + 1524,3$
4) Кадмий	$y = 8,1606x^2 - 256,46x + 2021,4$
5) Никель	$y = -11,561x^2 + 350,44x - 2621,1$
6) Хром	$y = 13,394x^2 - 429,89x + 3478,8$
7) Ртуть	$y = -0,0247x^2 + 0,738x - 5,4668$
8) Мышьяк	$y = 5,8424x^2 - 173,78x + 1296,4$
9) Марганец	$y = 148,79x^2 - 4507,2x + 34695$
Примечание * – при величине коэффициента аппроксимации, $R^2 = 1$	



Линия ряда данных: — ; полиномиальная линия тренда (полином 2-й степени): - - - - -

Рисунок 4 – Графическое представление содержания в седиментах валовых форм меди, цинка, свинца и кадмия в зависимости от уровня седиментной нагрузки

Figure 4 – Graphic representation of the content of gross forms of copper, zinc, lead and cadmium in sediments depending on the level of sediment load



Линия ряда данных: — ; полиномиальная линия тренда (полином 2-й степени): - - - - -

Рисунок 5 – Графическое представление содержания в седиментах валовых форм никеля, хрома, ртути, мышьяка и марганца в зависимости от уровня седиментной нагрузки

Figure 5 – Graphical representation of the content of gross forms of nickel, chromium, mercury, arsenic and manganese in sediments, depending on the sedimentation load level

В структуре поступления в агроэкосистему с седиментами из рассмотренных химических элементов марганец занимает первое место: на него приходится 73,0 %. На втором месте расположен цинк – 11,4 %, на третьем хром – 5,4 %, на четвертом никель – 3,6 %, на пятом свинец – 2,2 %, на шестом медь – 2,1 %, на седьмом кадмий – 1,5 %, на восьмом мышьяк – 0,8 %, на последнем ртуть – менее 0,01 %. Эмпирический ряд поступления тяжелых металлов и мышьяка с седиментами на пойменный агроландшафт имеет следующий вид: $Mn > Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > Cd > As > Hg$. Элементная последовательность ряда прослеживалась на всем протяжении периода исследований, что говорит о схожем характере поступления тяжелых металлов и мышьяка с паводковыми седиментами на пойменный агроландшафт.

Выводы. Результаты многолетних исследований паводковой седиментации показывают, что техногенное воздействие на почву выпадающих осадков довольно значительно. Поступление поллютантов варьирует в зависимости от величины и характера паводка в диапазоне значений: медь 15,1–20,7; цинк 93,2–97,4; свинец 15,5–21,5; кадмий 6,56–22,8; никель 26,2–34,0; хром 30,2–70,3; ртуть 0,029–0,042; мышьяк 5,71–9,11; марганец 571–668 мг/кг соответственно.

В нынешних экологических условиях уже сейчас необходимо организовать и проводить локальный агроэкологический мониторинг содержания тяжелых металлов и мышьяка в паводковых седиментах и подстилающей почве. На следующем этапе необходимо разработать базу данных результатов экологического мониторинга седиментной нагрузки. Это позволит прогнозировать загрязнение пойменного агроландшафта и использовать приемы, которые помогут снизить перемещение тяжелых металлов и мышьяка в растения и грунтовые воды. К числу таких относятся внесение мелиорантов и фиторемедиантов, повышающих буферность почвы.

Список источников

1. Ильинский А. В., Матвеев А. В., Евсенкин К. Н. Снегомерные исследования как элемент системы комплексного экологического мониторинга мелиорированных земель // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 4. С. 28–31. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-28-31. EDN: XYMOFU.
2. Борисочкина Т. И., Колчанова К. А. Геохимия тяжелых металлов почв урбанизированных ландшафтов зон воздействия металлургических предприятий // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 10. С. 50–56. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-50-56. EDN: MMWYIZ.
3. Силаев А. Л., Чекин Г. В., Смольский Е. В. Распределение микроэлементов в почвах пойменного ландшафта р. Унеча // Агрохимический вестник. 2021. № 5. С. 12–17. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-003. EDN: YUTDGW.
4. Kałmykow-Piwińska A., Falkowska E. Morphodynamic conditions of heavy metal concentration in deposits of the Vistula River valley near Kępa Gostecka (central Poland) // Open Geosciences, 2020, Vol. 12, no. 1. P. 1036-1051. DOI: 10.1515/geo-2020-0058. EDN: TEPDHC.
5. Пыленок П. И. Влияние седиментации на качество аллювиальной почвы в пойме р. Ока // Агрофизика. 2020. № 4. С. 7–13. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.04.02. EDN: DMANWI.
6. Zakrutkin V. E., Reshetnyak V. N., Reshetnyak O. S. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the East Donbass (Rostov region, Russia) // Water and Ecology. 2020. № 3(83). С. 32–40. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40. EDN: STSFGI.
7. Изучение содержания тяжелых металлов в донных отложениях и воде в отводящем канале рисовой оросительной системы / Т. И. Дрововозова, Л. А. Булгакова, М. В. Власов, Н.Н. Красовская // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 4. С. 155–170. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1479> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-155-170. EDN: WNZGHZ.
8. Баканева А. А. Миграция тяжелых металлов в экосистемах Волго-Ахтубинской поймы по сезонам года // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2(58). С. 164–170. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-16. EDN: YXYBZF.
9. Влияние наводнений и урбанизации на содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях реки Амур / А. Н. Махинов, Л. Шугуан, А. Ф. Махинов, Ч. Даи // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 12. С. 32–38. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-32-38. EDN: TGDAEV.
10. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохраных программ / В. И. Данилов-Данильян, В. О. Полянин, Т. Б. Фашевская, Н. В. Кирпичникова, М. А. Козлова, Е. В. Веницианов // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 503–514. DOI: 10.31857/S0321059620050053. EDN: LTEFWL.
11. Kalimoldina L. M., Sultangazieva G. S., Suleimenova M. Sh. Contamination of soils with heavy metal in the urban area of Almaty // Почвоведение и агрохимия. 2022. № 3. С. 38–45. DOI: 10.51886/1999-740X_2022_3_38. EDN: YOMFMO.
12. Особенности влияния антропогенных и климатических факторов на состояние земель сельскохозяйственного назначения Запорожской области / Ю. В. Чебанова, И. А. Короткая, Ю. А. Клипакова, Е. М. Денисова // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 4. С. 352–370. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1491> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-352-370. EDN: BRKRRK.
13. Техногенное загрязнение речных экосистем: монография / В. Н. Новосельцев, И. Б. Бесфамильный, Б. М. Кизяев, В. Е. Райнин, Г. Н. Виноградова, Т. Грэм, Ю. П. Добрачев, Т. А. Ильина, Н. В. Коломийцев, Р. Майсснер, А. А. Митрюхин, Г. Мюллер,

П. И. Пыленок, Ф. Х. Фриммель, А. Яхья, В. М. Яшин. М.: Научный мир, 2002. 140 с. EDN: YHKNSR.

14. Ильинский А. В., Евсенкин К. Н., Павлов А. А. Паводковые седименты как источник пополнения аллювиальных почв элементами питания растений // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 4. С. 645–654. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.645-654. EDN: PCZTLX.

15. Ilinskiy A., Evsenkin K., Pavlov A. Examination of heavy metal input from flood sediments in agricultural landscapes // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024), Astana, Kazakhstan, 15–18 oct. 2024 year. 2024. Vol. 592. Article number: 06003. DOI: 10.1051/e3sconf/202459206003. EDN: GLECUQ.

16. Кирейчева Л. В., Шевченко В. А. Состояние пахотных земель Нечерноземной зоны Российской Федерации и основные направления повышения плодородия почв // Международный сельскохозяйственный журнал. 2020. № 2. С. 12–16. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12021. EDN: PLTIOX.

17. Нейтрализация загрязненных почв: монография / С. Б. Адьяев, В. З. Веневцев, Т. Л. Волчкова, С. В. Гальченко, Т. М. Гусева, И. Ю. Давыдова, Э. Б. Дедова, Н. Ф. Деева, А. А. Дементьев, Д. В. Демин, Е. А. Дронник, Н. Н. Дубенок, В. Ф. Евтюхин, А. А. Ильина, А. В. Ильинский, В. А. Лисютин, К. Ю. Лобова, А. А. Ляпкало, Ю. А. Мажайский, В. П. Максименко, Т. К. Никушина, В. С. Печенина, И. К. Родин, М. А. Сазонов, Л. Х. Сангаджиева, С. М. Севостьянов, Ю. Я. Спиридонов, Ю. А. Томин, А. Я. Фридман, В. Ю. Агеец, В. И. Желязко, Р. Р. Капытовский, Т. Ф. Персикова, А. Г. Подоляк, М. В. Царева, М. Вышковски, В. Сондей, В. Цецько. Рязань: Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, 2008. 528 с. EDN: QKZFYJ.

References

1. Ilyinsky A.V., Matveev A.V., Evsenkin K.N., 2023. *Snegomernye issledovaniya kak element sistemy kompleksnogo ekologicheskogo monitoringa meliorirovannykh zemel'* [Snow measurement research as an element of the system of comprehensive ecological monitoring of reclaimed lands]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 4, pp. 28-31, DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-28-31, EDN: XYMOFU. (In Russian).

2. Borisochkina T.I., Kolchanova K.A., 2021. *Geokhimiya tyazhelykh metallov pochv urbanizirovannykh landshaftov zon vozdeystviya metallurgicheskikh predpriyatiy* [Geochemistry of heavy metals in soils of urbanized landscapes in zones affected by metallurgical enterprises]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], vol. 25, no. 10, pp. 50-56, DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-50-56, EDN: MMWIZ. (In Russian).

3. Silaev A.L., Chekin G.V., Smolsky E.V., 2021. *Raspredelenie mikroelementov v pochvakh poymennogo landshafta r. Unecha* [Microelements distribution in soils floodplain landscape of the Unecha River]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 5, pp. 12-17, DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-003, EDN: YUTDGW. (In Russian).

4. Kałmykow-Piwińska A., Falkowska E., 2020. Morphodynamic conditions of heavy metal concentration in deposits of the Vistula River valley near Kępa Gostecka (central Poland). *Open Geosciences*, vol. 12, no. 1, pp. 1036-1051, DOI: 10.1515/geo-2020-0058, EDN: TEPDHC.

5. Pylonok P.I., 2020. *Vliyanie sedimentatsii na kachestvo allyuvial'noi pochvy v poime reki Oka* [The influence of sedimentation on the quality of alluvial soil in the floodplain of the Oka River]. *Agrofizika* [Agrophysics], no. 4, pp. 7-13, DOI: 10.25695/AGRPH.2020.04.02, EDN: DMANWI. (In Russian).

6. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S., 2020. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the East Donbass (Rostov region, Russia). *Water and Ecology*, no. 3(83), pp. 32-40, DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40, EDN: STSFGI.

7. Drovozova T.I., Bulgakova L.A., Vlasov M.V., Krasovskaya N.N., 2024. *Izuchenie sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh i vode v otvodyashchem kanale risovoy orositel'noy sistemy* [Study of heavy metal content in bottom sediments and water in the diversion channel of rice irrigation system]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 14, no. 4, pp. 155-170, URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1479> [accessed 10.02.2025], DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-155-170, EDN: WNZGHZ. (In Russian).

8. Bakaneva A.A., 2020. *Migratsiya tyazhelykh metallov v ekosistemakh Volgo-Akhtubinskoy poymy po sezonam goda* [Migration of heavy metals in the ecosystems of the Volga-Akhtuba floodplain according to the seasons of the year]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceed. of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 2(58), pp. 164-170, DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-16, EDN: YXYBZF. (In Russian).

9. Makhinov A.N., Shuguan L., Makhinov A.F., Dai Ch., 2020. *Vliyanie navodneniy i urbanizatsii na sodержanie tyazhelykh metallov v vode i donnykh otlozheniyakh reki Amur* [Impact of flooding and urbanisation on the content of heavy metals in the water and bottom sediments of the Amur River]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], vol. 24, no. 12, pp. 32-38, DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-32-38, EDN: TGDAEV. (In Russian).

10. Danilov-Danilyan V.I., Polyanin V.O., Fashchevskaya T.B., Kirpichnikova N.V., Kozlova M.A., Venitsianov E.V., 2020. *Problema snizheniya diffuznogo zagryazneniya vodnykh ob'ektov i povyshenie effektivnosti vodookhrannykh programm* [The problem of reducing the diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water protection programs]. *Vodnye resursy* [Water Resources], vol. 47, no. 5, pp. 503-514, DOI: 10.31857/S0321059620050053, EDN: LTEFWL. (In Russian).

11. Kalimoldina L.M., Sultangazieva G.S., Suleimenova M.Sh., 2022. Contamination of soils with heavy metal in the urban area of Almaty. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], no. 3, pp. 38-45, DOI: 10.51886/1999-740X_2022_3_38, EDN: YOMFMO.

12. Chebanova Yu.V., Korotkaya I.A., Klipakova Yu.A., Denisova E.M., 2024. *Osobennosti vliyaniya antropogennykh i klimaticheskikh faktorov na sostoyanie zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya Zaporozhskoy oblasti* [Features of the influence of anthropogenic and climatic factors on the state of agricultural lands in the Zaporizhzhya region]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 14, no. 4, pp. 352-370, URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1491> [accessed 10.02.2025], DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-352-370, EDN: BRKRRK. (In Russian).

13. Novosel'tsev V.N., Besfamil'ny I.B., Kizyaev B.M., Rainin V.E., Vinogradova G.N., Gramm T., Dobrachev Yu.P., Ilyina T.A., Kolomiytsev N.V., Meissner R., Mitryukhin A.A., Müller G., Pylenok P.I., Frimmel F.H., Yahya A., Yashin V.M., 2002. *Tekhnogennoe zagryaznenie rechnykh ekosistem: monografiya* [Technogenic Contamination of the River Ecosystems: monograph]. Moscow, Scientific World Publ., 140 p., EDN: YHKNSR. (In Russian).

14. Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Pavlov A.A., 2024. *Pavodkovye sedimenty kak istochnik popolneniya allyuvial'nykh pochv elementami pitaniya rasteniy* [Flood sediments as a source of replenishment of alluvial soils with plant nutrition elements]. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* [Agrarian Science of the Euro-North-East], vol. 25, no. 4, pp. 645-654, DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.645-654, EDN: PCZTLX. (In Russian).

15. Ilinskiy A., Evsenkin K., Pavlov A., 2024. Examination of heavy metal input from flood sediments in agricultural landscapes. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024), Astana, Kazakhstan, vol. 592, Article number: 06003, DOI: 10.1051/e3sconf/202459206003, EDN: GLECUQ.

16. Kireycheva L.V., Shevchenko V.A., 2020. *Sostoyanie pakhotnykh zemel' Nechernozemnoy zony Rossiyskoy Federatsii i osnovnye napravleniya povysheniya plodorodiya pochv*

[State of arable lands of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation and the main directions of increasing soil fertility]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 2, pp. 12-16, DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12021, EDN: PLTIOX. (In Russian).

17. Adyaev S.B., Venevtsev V.Z., Volchkova T.L., Galchenko S.V., Guseva T.M., Davydova I.Yu., Dedova E.B., Deeva N.F., Dementyev A.A., Demin D.V., Dronnik E.A., Dubenok N.N., Evtukhin V.F., Ilina A.A., Ilyinsky A.V., Lisyutin V.A., Lobova K.Yu., Lyapkalo A.A., Mazhaisky Yu.A., Maksimenko V.P., Nikushina T.K., Pechenina V.S., Rodin I.K., Sazonov M.A., Sangadzhieva L.K., Sevostyanov S.M., Spiridonov Yu.Ya., Tomlin Yu.A., Fridman A.Ya., Ageets V.Yu., Zhelyazko V.I., Kapytovsky R.R., Persikova T.F., Podolyak A.G., Tsareva M.V., Vyshkovsky M., Sondey V., Tsets'ko V., 2008. *Neytralizatsiya zagryaznennykh pochv: monografiya* [Neutralization of Contaminated Soils: monograph]. Ryazan, Meshchersky branch of the State Scientific Institution VNIIGiM of the Russian Agricultural Academy, 528 p. EDN: QKZFYJ. (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Ильинский – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Россия, ilinskiy-19@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6843-9170;

К. Н. Евсенкин – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Россия, kn.evsenkin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0194-8552;

А. А. Павлов – научный сотрудник, кандидат биологических наук, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Россия, kupoz@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5932-1624.

Information about the authors

A. V. Ilyinsky – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russia, ilinskiy-19@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6843-9170;

K. N. Evsenkin – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russia, kn.evsenkin@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-0194-8552;

A. A. Pavlov – Researcher, Candidate of Biological Sciences, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russia, kupoz@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5932-1624.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025; одобрена после рецензирования 21.05.2025; принята к публикации 24.06.2025.

The article was submitted 24.02.2025; approved after reviewing 21.05.2025; accepted for publication 24.06.2025.