

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.67.03:627.157

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-1-80-99

Накопление тяжелых металлов донными отложениями коллектора с учетом дифференциации поверхностного водосбора по источникам антропогенного воздействия

Татьяна Ильинична Дрововозова¹, Михаил Вячеславович Власов²,
Наталья Николаевна Красовская³, Даниил Игоревич Ольгаренко⁴

^{1, 2, 3, 4}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

¹tid70.drovovozova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8724-7799>

²m_vlasov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9103-1958>

³panya-86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4426-7762>

⁴dan21022001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1281-9800>

Аннотация. Цель: провести исследования степени загрязнения донных отложений и накопления ими тяжелых металлов на участках коллектора, дифференцированных по источникам антропогенного воздействия на поверхностный водосбор. **Материалы и методы.** Дана морфометрическая характеристика поверхностного водосбора коллектора с разделением на типичные участки. Исходными данными являлись результаты лабораторных исследований донных отложений и воды из коллектора и истока р. Подпольной. Оценку степени накопления тяжелых металлов донными отложениями проводили по коэффициенту донной аккумуляции. **Результаты.** Поверхностный водосбор коллектора представлен орошаемыми, богарными землями, населенными пунктами. Наибольшей степенью загрязнения характеризовались донные отложения, отобранные в коллекторе в границах населенного пункта, наименьшей – в границах орошаемых земель. Во всех контролируемых точках коллектора концентрации свинца, меди, цинка, марганца в донных отложениях превышали их концентрации в водной среде, что свидетельствует о высоком уровне их накопления (максимальное значение коэффициента донной аккумуляции достигает 90500) на всех исследуемых участках в течение всего вегетационного периода, за исключением марганца, характеризующегося высокой миграционной активностью. В точке коллектора, поверхностный водосбор которого находится в границах населенного пункта, установлен максимальный уровень накопления цинка. **Выводы.** Установлен высокий уровень аккумуляции тяжелых металлов донными отложениями коллектора. При насыщении донных отложений этими элементами происходит обратное их поступление в водную среду. Соответственно, донные отложения становятся источником вторичного загрязнения водной среды. Эти факторы указывают на необходимость очистки коллекторных каналов от донных отложений.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, дифференциация поверхностного водосбора, донные отложения, аккумуляция загрязняющих веществ, коллекторный канал, тяжелые металлы

Источник финансирования: субсидии на выполнение государственного задания № 082-00062-25-00 за счет средств федерального бюджета.

Для цитирования: Накопление тяжелых металлов донными отложениями коллектора с учетом дифференциации поверхностного водосбора по источникам антропо-

генного воздействия / Т. И. Дрововозова, М. В. Власов, Н. Н. Красовская, Д. И. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 1. С. 80–99. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-1-80-99>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Accumulation of heavy metals in collector bottom sediments taking into account the surface watershed differentiation by sources of anthropogenic impact

**Tatyana I. Drovovozova¹, Mikhail V. Vlasov², Natalia N. Krasovskaya³,
Daniil I. Olgarenko⁴**

^{1, 2, 3, 4}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹tid70.drovovozova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8724-7799>

²m_vlasov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9103-1958>

³panya-86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4426-7762>

⁴dan21022001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1281-9800>

Abstract. Purpose: to study the degree of pollution of bottom sediments and accumulation of heavy metals in them in collector sections, differentiated by sources of anthropogenic impact on the surface watershed. **Materials and methods.** The morphometric characteristics of the collector surface watershed divided into typical sections are given. The initial data were the results of laboratory studies of bottom sediments and water from the collector and the source of the Podpolnaya River. The degree of accumulation of heavy metals by bottom sediments was assessed based on the bottom accumulation coefficient. **Results.** The surface watershed of the collector is represented by irrigated and dryland lands, and residential areas. The highest degree of pollution was characteristic of bottom sediments collected in the collector within the boundaries of a residential area, the least – within the boundaries of irrigated lands. At all monitored collector points, concentrations of lead, copper, zinc and manganese in bottom sediments exceeded their concentrations in the aquatic environment, indicating high levels of accumulation (the maximum bottom accumulation coefficient reached 90,500) at all studied sections throughout the growing season, with the exception of manganese, which is characterized by high migration activity. The maximum level of zinc accumulation was observed at the collector point, the surface catchment area of which is located within the boundaries of a residential area. **Conclusions.** High levels of heavy metal accumulation in the bottom sediments of the collector were established. When bottom sediments become saturated with these elements, they are released back into the aquatic environment. Consequently, bottom sediments become a source of secondary pollution of the aquatic environment. These factors indicate the need to clean the collector channels of bottom sediments.

Keywords: anthropogenic impact, surface watershed differentiation, bottom sediments, pollutant accumulation, collector channel, heavy metals

Funding: subsidies for carrying out State Assignment No. 082-00062-25-00 from the federal budget.

For citation: Drovovozova T. I., Vlasov M. V., Krasovskaya N. N., Olgarenko D. I. Accumulation of heavy metals in collector bottom sediments taking into account the surface watershed differentiation by sources of anthropogenic impact. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(1):80–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-1-80-99>.

Введение. Донные отложения (ДО) водотоков в земляном русле обладают способностью аккумулировать химические вещества из водной среды, которые в последующем, в процессе десорбции, вновь поступают в последнюю, способствуя увеличению их концентраций [1–5]. Такие естественные процессы приводят к вторичному загрязнению водной среды, поэтому изучение процессов накопления различных веществ в донных отложениях представляет практический интерес. Особенно актуальны подобные исследования для искусственных водотоков, требующих периодического проведения уходных работ, связанных с извлечением донных отложений (расчисткой каналов в земляном русле) и их последующей утилизацией. Большой интерес представляют коллекторные каналы оросительных систем, поскольку они выполнены в земляном русле, по ним осуществляется отведение дренажных вод с орошаемых земель и, следовательно, они являются потенциальным источником негативного воздействия на естественные водные объекты. Большинство водоприемников коллекторно-дренажного стока – это малые реки, водосбор которых представлен одновременно и природным, и сельскохозяйственным, и урбанизированным ландшафтами. Основным источником поступления загрязняющих веществ (ЗВ) – рассредоточенный диффузный сток с площади водосбора. Организованный сброс коллекторно-дренажных вод (КДВ) в малый водный объект может оказывать как негативное, так и положительное влияние на водную среду. Подобные процессы связаны с тем, что протяженность отводящих коллекторов составляет десятки километров, расходы в коллекторе и водоприемнике сопоставимы, сброс КДВ носит сезонный характер, химический состав коллекторно-дренажного стока существенно зависит от состояния поверхностного водосбора коллектора, качества оросительной воды, способности донных отложений аккумулировать загрязняющие вещества.

В настоящее время существует несколько методических подходов к оценке аккумулирующей способности и качества донных отложений, в ос-

нову которых положен интегральный показатель, базирующийся на сравнении с фоновой концентрацией вещества для изучаемого бассейна [4–8].

Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации разработаны и утверждены «Методические указания по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов», являющиеся по сути единственным на сегодняшний день нормативным документом¹. Количественным показателем степени накопления вещества в донных отложениях служит коэффициент донной аккумуляции (КДА).

В связи с вышеизложенным, цель работы – провести исследования степени загрязнения донных отложений и накопления ими тяжелых металлов (ТМ) на участках коллектора, дифференцированных по источникам антропогенного воздействия на поверхностный водосбор.

Материалы и методы. Объект исследования – искусственный водоток – открытый коллекторный канал в земляном русле протяженностью 12 км, из которого КДВ сбрасываются в естественный водоприемник – малую реку Подпольную протяженностью 63 км, водосбор которой представлен всеми видами ландшафта: природным, сельскохозяйственным, урбанизированным. Предмет исследования – степень загрязнения и аккумуляции тяжелых металлов в донных отложениях коллекторного канала в зоне орошаемого земледелия.

В настоящее время предельно допустимые концентрации для донных отложений отсутствуют, поэтому руководствуются либо концентрациями по «голландским листам», либо бассейновым подходом, используя фоно-

¹Методические указания по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов [Электронный ресурс]: Приказ Минприроды России от 24 февр. 2014 г. № 112. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

вые концентрации. В таблице 1 дана характеристика нормативных и фоновых концентраций исследуемых тяжелых металлов в донных отложениях и в водной среде.

Таблица 1 – Допустимые концентрации тяжелых металлов в воде и донных осадках

Table 1 – Permissible concentrations of heavy metals in water and bottom sediments

Характеристика	Металл			
	Mn	Cu	Zn	Pb
Предельно допустимая концентрация в водном объекте рыбохозяйственного значения, мг/дм ³	0,01	0,001	0,01	0,006
Допустимая концентрация в донных осадках по «голландским листам», мг/кг сухой массы	Информация отсутствует	35,0	140,0	85,0
Фоновые концентрации в донных осадках в р. Дон, мг/кг [5]	4,2	2,1	1,9	2,2
Концентрации ТМ в ДО в истоке р. Подпольной, мг/кг	1,3	5,2	12,9	3,2
Класс опасности для ДО	3	2	1	1
Класс опасности для ВО	4	3	3	2

Из данных таблицы 1 видно, что фоновые концентрации ТМ в ДО р. Дон намного ниже, чем принятые в зарубежной практике нормирования качества осадков концентрации по «голландским листам», поэтому в расчетах использовали фоновые концентрации ТМ в ДО поймы р. Дон [1, 9, 10].

Река Подпольная относится к бассейну Нижнего Дона. Как видно из данных таблицы 1, концентрации в истоке реки для меди выше, чем фоновые для р. Дон, в 2,5 раза, цинка – в 6,63 раза, свинца – в 1,5 раза, что свидетельствует о высоком уровне накопления этих металлов в донных осадках р. Подпольной. Исследуемый коллектор гидрографически связан с бассейном Нижнего Дона, поэтому использовали сведения о фоновых концентрациях ТМ в ДО поймы р. Дон из работ В. С. Дворниковой, Н. В. Каверинной, Г. Г. Матишова, В. В. Польшина, Г. В. Ильина, Г. С. Усягиной [1, 5]. Коллекторный канал является искусственным водотоком, созданным в результате хозяйственной деятельности человека, поэтому на всем его протяжении состав донных отложений является антропогенно преобразованным.

Изучено строение поверхностного водосбора отводящего коллектора, и проведена морфометрическая типизация его отдельных участков. Анализ спутниковых материалов позволил установить тип рельефа водосбора на всем протяжении коллектора, уклоны рельефа, что дало возможность определить территорию водосбора коллектора, площадь которого составляет 11,88 км².

Территория поверхностного водосбора представлена солончаками, населенными пунктами, орошаемыми и богарными землями, отделенными лесополосами, проходящими вдоль коллектора, и без них, асфальтированной автомагистралью. Типизация поверхностного водосбора коллектора позволила разделить его на участки по источникам формирования химического состава КДВ. Общая схема коллектора с границами водосбора, поделенного на участки, точки отбора проб представлены на рисунке 1. Первая точка отбора проб установлена в зоне влияния сельского населенного пункта (НП), вторая точка отбора проб – в зоне влияния орошаемых земель (ОЗ), третья точка отбора проб – в зоне влияния богарных земель (БЗ).



Участок 1 – богарные земли; участок 2 – орошаемые земли; участок 3 – населенный пункт; участок 4 – богарные земли; участок 5 – орошаемые земли; участок 6 – орошаемые земли, огражденные лесомелиоративными насаждениями; участок 7 – населенный пункт и шоссе; участок 8 – солончаки
Plot 1 – dry lands; plot 2 – irrigated lands; plot 3 – residential area; plot 4 – dry lands; plot 5 – irrigated lands; plot 6 – irrigated lands, fenced with forest reclamation plantations; plot 7 – residential area and highway; plot 8 – salt marshes

Рисунок 1 – Космоснимок коллектора с границами поверхностного водосбора, поделенного на участки исследования, с точками отбора проб
Figure 1 – Satellite image of the collector with the boundaries of the surface catchment area, divided into study areas, with sampling points

Результаты обработки картографических данных с целью замера уклона рельефа представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Уклоны рельефа водосбора коллектора БГ-МС-6
Table 2 – Relief slopes of the BG-MS-6 collector catchment area

Участок, нумерация от истока	Характеристика участка	Максимальный уклон, %		Минимальный уклон, %		Средний уклон, %	
		Правый	Левый	Правый	Левый	Правый	Левый
1	Богарные земли	2,100	2,100	0,000	0,000	0,775	1,525
4	Богарные земли	2,400	0,500	0,000	0,000	1,200	0,303
2	Орошаемые земли	4,200	1,200	4,200	1,200	4,200	1,200
5	Орошаемые земли	2,800	1,500	0,000	0,800	1,625	1,035
6	Орошаемые земли	3,400	3,700	0,000	0,000	1,725	1,539
3	Населенный пункт	1,300	0,770	0,000	0,000	0,650	0,385
7	Населенный пункт и асфальтированное шоссе	3,600	2,700	0,000	0,000	1,558	1,500
		–	–	–	–	4,2	1,2
8	Солончаки	0,200	4,000	0,000	0,000	0,025	1,917

Анализ уклонов рельефа водосбора коллектора показал, что он характеризуется как ровный (около 98 % территории) и с малым уклоном (примерно 2 % территории). Площадь территорий, занятых в сельскохозяйственном производстве, прилегающих к коллектору, – 2330 га (23,3 км²), из них площадь орошения, «подвешенная» к каналу, 480 га (4,8 км²). На сельскохозяйственном распаханном водосборе избыток дождевой и талой влаги проникает в почву, поэтому поверхностный сток не образуется. Поверхностный сток в коллектор поступает в границах асфальтированного шоссе, расположенного перед населенным пунктом, особенно с правой стороны, для которой уклон составляет 4,2 %.

Коллектор выполнен в земляном русле, русло характеризуется плавным уклоном: 92,2 % протяженности коллектора (от истока до солончаков) имеет уклон в среднем 0,038 % и 7,8 % протяженности коллектора (1,1 км до устья) имеет уклон в среднем 1,2 %.

В таблице 3 представлены расчетные данные о доле площади исследуемых участков в общей площади водосбора и сведения об их назначении. Видно, что земли, входящие в границы водосбора коллектора, занятые в сельхозпроизводстве, составляют 91 %, из них около 51 % приходит-

ся на орошаемые земли, 8,75 % водосбора расположено в сельских населенных пунктах.

Таблица 3 – Доля исследуемых участков в общей площади водосбора коллектора

Table 3 – The share of the studied areas in the collector total catchment area

Участок	Характеристика участка	Доля площади водосбора каждого участка, %	Доля площади водосбора по назначению земель, %
5	Орошаемые земли	32,9	50,97
6	Орошаемые земли	14,4	
2	Орошаемые земли	3,67	
1	Богарные земли	19,63	39,83
4	Богарные земли	20,2	
3	Населенный пункт	4,8	8,75
7	Населенный пункт и автошоссе	3,95	
8	Солончаки	0,45	0,45

Подземный водосбор коллекторного канала представлен грунтовыми водами сульфатно-магниево-натриевого типа, что отражается на химическом составе КДВ.

Исходными данными для проведения количественной оценки качества донных отложений и их аккумулярующей способности в коллекторе являлись результаты лабораторных исследований в истоке малой реки Подпольной и на различных участках коллектора. Фото исследуемых объектов представлены на рисунке 2.

Отбор проб воды из канала БГ-МС-6 проводился согласно ГОСТ Р 59024-2020², донных отложений из канала БГ-МС-6 согласно РД 52.24.609-2013³, почвы согласно ГОСТ 17.4.3.01-2017⁴. Пробы отбира-

²ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб [Электронный ресурс]. Введ. 2022-06-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

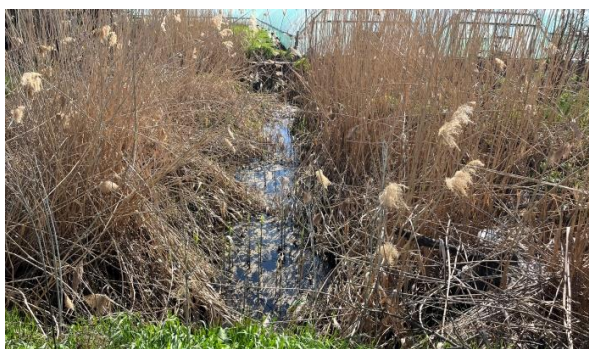
³Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов [Электронный ресурс]: РД 52.24.609-2013: утв. Зам. Рук. Росгидромета 07.08.13: введ. в действие с 02.09.13. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁴ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб [Электронный ресурс]. Введ. 2019-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

лись в течение вегетационного периода с марта по октябрь 2025 г. на глубине до 20 см. Лабораторные исследования проб проводили в аккредитованной лаборатории ФГБНУ «РосНИИПМ».



a) исток р. Подпольной
a) the source of the Podpolnaya River



b) коллектор
b) collector

Рисунок 2 – Исследуемые объекты (фото М. В. Власова)
Figure 2 – Objects under study (photo by M. V. Vlasov)

Уровень загрязнения донных отложений оценивали по показателю «степень загрязнения» C_d , который определяется как отношение фактической концентрации загрязняющего вещества в ДО к его фоновой [6–8].

Коэффициент донной аккумуляции (КДА) рассчитывали по формуле¹:

$$\text{КДА}_i = \frac{C_{i\text{ДО}}}{C_{i\text{вода}}}, \quad (1)$$

где $C_{i\text{ДО}}$ и $C_{i\text{вода}}$ – концентрация загрязняющего вещества в донных отложениях, мг/кг, и концентрация этого же вещества в воде, отобранной одновременно в этом же створе, мг/дм³.

Согласно Приказу МПР № 112 обстановка в водном объекте характеризуется в соответствии с критериями, представленными в таблице 4.

Таблица 4 – Критерии уровня донной аккумуляции загрязняющих веществ в водном объекте

Table 4 – Criteria for the level of bottom accumulation of pollutants in a water body

Интервал значений КДА	Характеристика уровня донной аккумуляции ЗВ в водном объекте	Характеристика процесса адсорбции-десорбции в системе «вода – донные отложения»
$< n \cdot 10$ (единицы)	Относительно удовлетворительный без признаков хронического загрязнения	Равновесный процесс адсорбции-десорбции
$n \cdot 10 \leq \text{КДА} \leq n \cdot 10^2$ (десятки – сотни)	Свежее загрязнение	Высокий уровень поступления ЗВ в ДО из водной среды
$n \cdot 10^3 \leq \text{КДА} \leq n \cdot 10^4$ (тысячи – десятки тысяч)	Высокий уровень загрязнения	Чрезвычайно высокий уровень накопления ЗВ в ДО
Примечание – $n \cdot 10^{1-4}$ – разряд числа.		

Результаты и обсуждение. Оценка степени загрязнения донных отложений коллектора проводилась по следующим тяжелым металлам: марганец, медь, свинец, цинк ($n = 4$). Изменение степени загрязнения донных отложений коллектора в течение вегетационного периода в исследуемых точках коллектора представлено на рисунках 3 и 4.

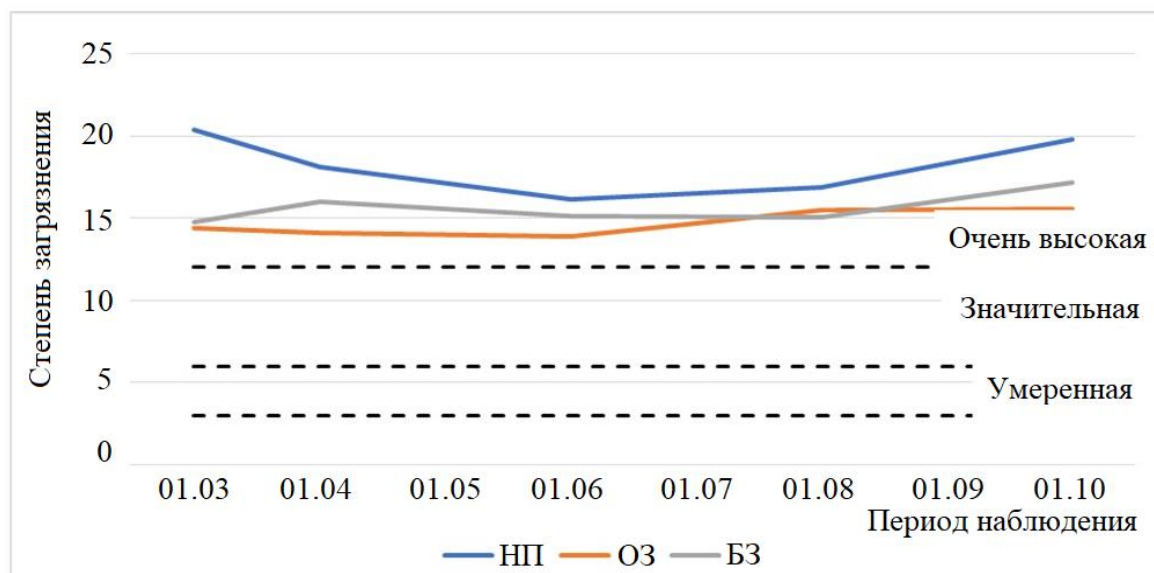


Рисунок 3 – Динамика степени загрязнения донных отложений коллектора в исследуемых точках в течение вегетационного периода (относительно фоновых концентраций в р. Дон)

Figure 3 – Dynamics of the degree of contamination of bottom sediments of the collector at the studied points during the growing season (relative to background concentrations in the Don River)

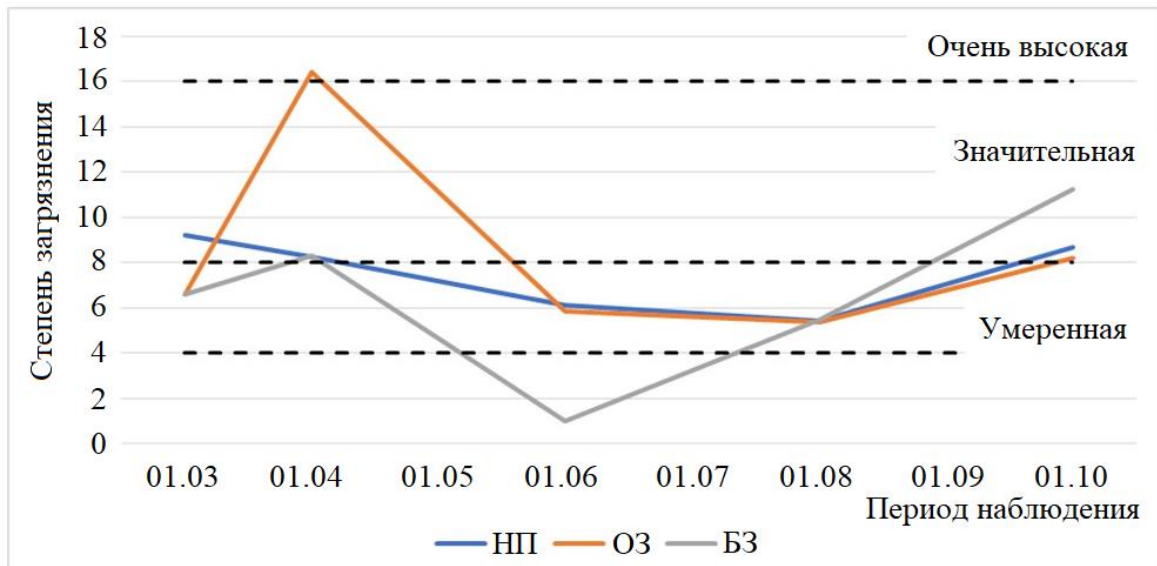


Рисунок 4 – Динамика степени загрязнения донных отложений коллектора в исследуемых точках в течение вегетационного периода (относительно концентраций в истоке р. Подпольной)

Figure 4 – Dynamics of the degree of contamination of bottom sediments of the collector at the studied points during the growing season (relative to concentrations at the source of the Podpolnaya River)

Результаты исследований показали, что степень загрязнения ДО коллектора по сравнению с ДО р. Подпольной колеблется от умеренной до значительной, а по сравнению с фоновыми во всех исследуемых точках коллектора в течение вегетационного периода характеризуется как очень высокая. При этом максимальная степень загрязнения отмечается в весенний период до начала полива. В период с осени до ранней весны в коллекторе уровень воды находится на высоте 40–50 см, течение практически отсутствует. Температура воды не превышает плюс 1 – плюс 5 °С. При таких условиях происходят отмирание части водной растительности, интенсивная агрегация частиц и их оседание на дно канала. Из-за малой скорости течения на протяжении нескольких месяцев происходит заиление придонного слоя канала, приводящее к росту слоя донных отложений и накоплению различных химических веществ в них, что было подтверждено результатами исследований в марте и апреле. Накопление тяжелых металлов донными отложениями происходит за счет комплексообразования с орга-

ническими лигандами в виде гуминовых и фульвокислот. Соответственно, металлы в донных отложениях находятся в виде хелатных комплексов с органическими кислотами, характеризующихся высокой устойчивостью и отсутствием способности к гидролизу. С ионами металлов Cu, Pb, Zn гуминовые и фульвокислоты образуют в ДО устойчивые хелатные мономерные комплексы, что и обуславливает высокий уровень их накопления по сравнению с содержанием в воде. Двухвалентный ион марганца образует комплексные соединения, отличающиеся повышенной миграционной способностью в водной среде, поэтому высокого уровня накопления данного металла в ДО не наблюдалось [11–14].

Далее после заполнения оросительной системы водой увеличиваются расход и скорости течения воды в коллекторе. При интенсивном течении наблюдается взмучивание донных осадков, приводящее к поступлению загрязняющих веществ из ДО в водную среду и выносу с течением воды, поэтому к июню наблюдалось снижение концентрации ТМ в донных осадках на всех исследуемых участках и, следовательно, степени загрязнения ими.

Наибольшей степенью загрязнения характеризовались донные отложения, отобранные в коллекторе в границах населенного пункта, наименьшей – в границах орошаемых земель.

На следующем этапе исследований провели анализ накопления тяжелых металлов донными отложениями коллектора с учетом антропогенного воздействия на поверхностный водосбор. Из литературных данных известно, что в колонках донных отложений основная часть загрязняющих веществ прочно депонируется в грунтах. Поэтому оценка уровня накопления загрязняющих веществ на отдельных участках коллектора позволяет с достаточной степенью адекватности сделать вывод о влиянии типа водосбора на формирование химического состава ДО в его границах [9, 10].

Анализ результатов исследований состава ДО и воды в коллекторе показал, что во всех контролируемых точках концентрации тяжелых ме-

таллов в ДО превышали их концентрации в водной среде, это свидетельствует о высоком уровне их аккумуляции донными отложениями.

По коэффициенту донной аккумуляции была выполнена оценка степени накопления донными отложениями тяжелых металлов Mn, Cu, Pb, Zn. Значения КДА для вышеуказанных элементов в исследуемых точках коллектора в течение вегетационного периода представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения коэффициентов донной аккумуляции тяжелых металлов в исследуемых точках коллектора в течение вегетационного периода

Table 5 – Values of the coefficients of bottom accumulation of heavy metals at the studied collector points during the growing season

Наименование места отбора проб	Дата отбора проб				
	11.03.2025	16.04.2025	10.06.2025	06.08.2025	02.10.2025
Марганец					
Населенный пункт	6,06	71,67	16,67	6,36	203,07
Орошаемые земли	3,9	76,19	71,43	23,33	117,71
Богарные земли	7,41	800,0	60,0	6,0	155,0
Медь					
Населенный пункт	2085,11	11142,86	11285,71	2900,0	4350,0
Орошаемые земли	2200,0	4857,14	3750,0	10150,0	9400,0
Богарные земли	3772,73	40000,0	20750,0	4375,0	9000,0
Свинец					
Населенный пункт	585,19	964,29	7250,0	1823,33	1152,78
Орошаемые земли	2285,71	2785,71	3066,67	2665,0	1933,33
Богарные земли	2156,25	1115,38	1111,11	284,29	895,52
Цинк					
Населенный пункт	11500,0	28375,0	92500,0	194500,0	6277,78
Орошаемые земли	4628,57	28833,33	22285,71	3150,0	2439,39
Богарные земли	20857,14	90500,00	42500,0	2600,0	4195,65

Расчеты КДА показали большой разброс абсолютных численных значений, поэтому в целях удобства оценки осуществили логарифмирование КДА:

$$K_A = \lg(KDA). \quad (2)$$

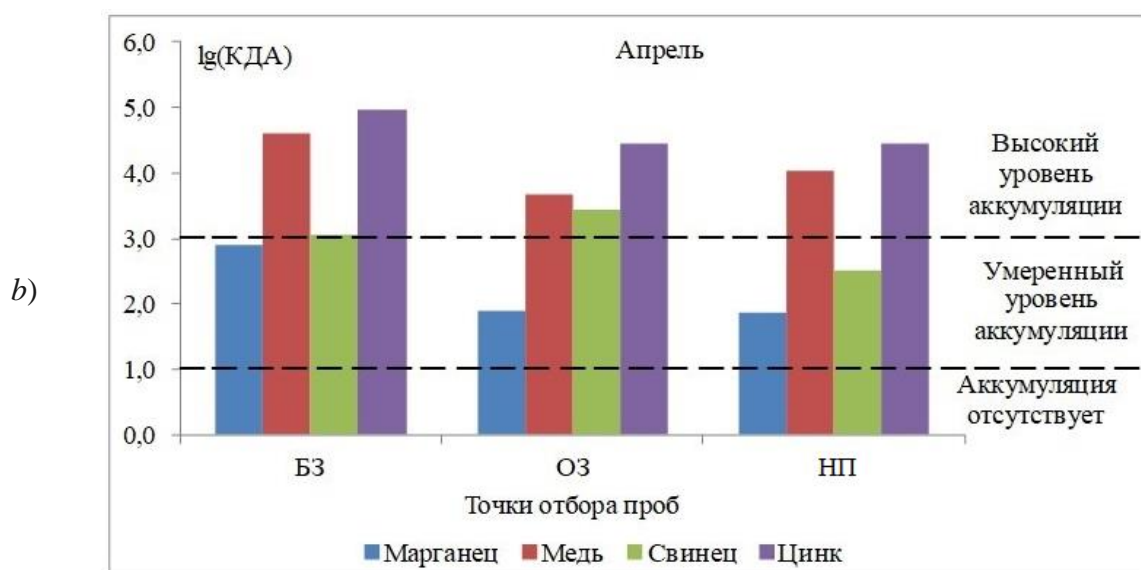
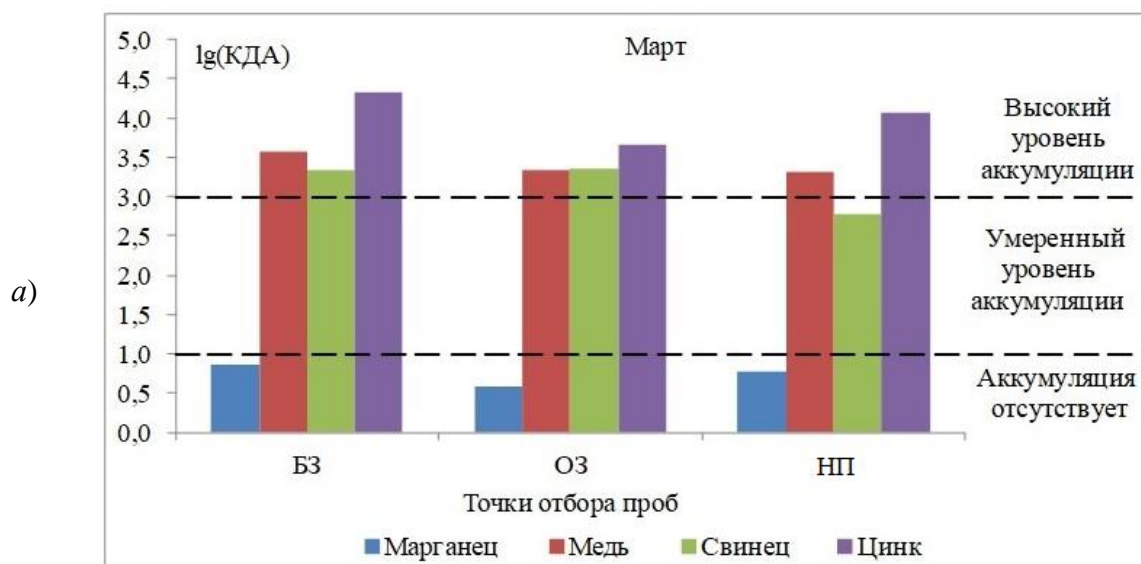
Для характеристики уровня накопления ЗВ в ДО по показателю K_A предложена шкала оценивания, представленная в таблице 6.

Логарифмическое масштабирование (логарифмическая шкала) по оси значений позволяет визуализировать данные, которые сильно различаются по порядку величины (рисунок 5).

Таблица 6 – Критерии оценки уровня аккумуляции и загрязнения по значению K_A

Table 6 – Criteria for assessing the level of accumulation and pollution by the K_A value

Значение K_A	Характеристика уровня донной аккумуляции ЗВ	Характеристика процесса адсорбции-десорбции в системе «вода – донные отложения»	Уровень загрязнения ДО
$[-3; 1)$	Отсутствие аккумуляции	Равновесный процесс адсорбции ↔ десорбции	Статический уровень загрязнения
$[1; 3)$	Умеренный	Умеренный уровень поступления ЗВ в ДО из водной среды (адсорбция > десорбции)	Свежее поступление загрязнения
$[3; 8)$	Высокий	Высокий уровень накопления ЗВ в ДО из водной среды (адсорбция >> десорбции)	Высокий уровень поступления загрязнений



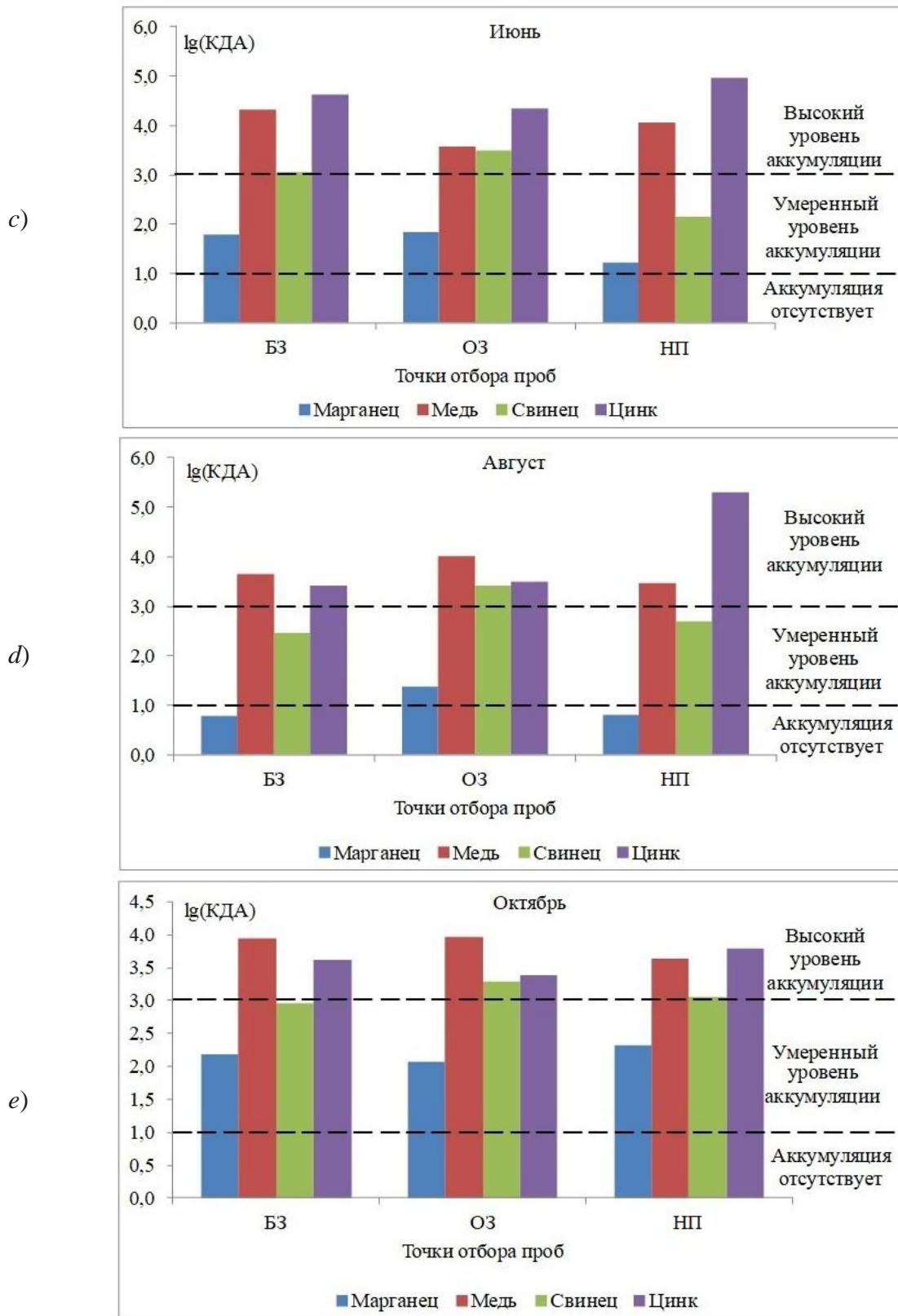


Рисунок 5 – Накопление тяжелых металлов по показателю K_A в исследуемых точках коллектора в течение вегетационного периода
Figure 5 – Heavy metal accumulation according to the K_A indicator at the studied collector points during the growing season

Динамика накопления тяжелых металлов донными отложениями на протяжении коллектора в зависимости от характера поверхностного водосбора показала, что для меди, свинца и цинка характерен высокий уровень накопления ДО коллектора на участках с прилегающими богарными и орошаемыми землями в течение всего наблюдаемого периода, это связано с их поступлением в воду с инфильтрационным и дренажным стоками, содержащими продукты вымывания минеральных солей ТМ из удобрений, и, соответственно, осаждением их в ДО. Марганец является более подвижным ионом, поэтому процесс его сорбции-десорбции колеблется на протяжении коллектора.

В границах населенного пункта наблюдалось резкое падение содержания марганца, свинца и меди, что связано с отсутствием поверхностного стока в районе жилой застройки и уменьшением количества вносимых удобрений на территории населенного пункта (за исключением приусадебных участков). В ДО канала в границах населенного пункта наблюдался рост содержания ионов цинка и его комплексных соединений, источниками его поступления являлись: внесенные в почву приусадебных участков удобрения, зола из домовых печей и костров, автотранспорт и асфальтированные дороги.

Выводы. Анализ накопления тяжелых металлов донными отложениями коллектора с учетом антропогенного воздействия на поверхностный водосбор показал высокий уровень их аккумуляции (максимальное значение КДА достигает 90500) на всех исследуемых участках в течение всего вегетационного периода, за исключением марганца, характеризующегося высокой миграционной активностью.

Поскольку в зимне-весенний период полив отсутствует, накопление ионов тяжелых металлов в ДО канала обусловлено: 1) ионным обменом между грунтовыми водами, водовмещающим слоем грунта и донными отложениями; 2) поступлением ионов из почв прилегающего поверхностного

водосбора с инфильтрационным стоком; 3) седиментацией ионов из водной среды; 4) комплексообразованием; 5) обменным процессом сорбции в системе «вода – донные отложения».

Накопление донными отложениями тяжелых металлов свидетельствует о высоком уровне их поступления в водную среду. При насыщении донных отложений тяжелыми металлами происходит обратное их поступление в водную среду. Соответственно, донные отложения становятся источником вторичного загрязнения водной среды. Эти факторы указывают на необходимость очистки коллектора от донных отложений.

Список источников

1. Дворникова В. С., Каверина Н. В. Геохимическое состояние донных отложений пойменных озер Подгоренского гидрографического участка р. Дон // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2016. № 1. С. 71–74. EDN: VVSHTN.
2. Рыжаков А. Н., Мартынов Д. В. Оценка степени загрязнения донных отложений малых рек Ростовской области // Экология и водное хозяйство. 2021. Т. 3, № 2. С. 29–39. DOI: 10.31774/2658-7890-2021-3-2-29-39. EDN: XZVBEX.
3. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / науч. ред. Е. М. Коробова; сост. Л. Д. Виноградова. М.: РАН, 2021. 298 с.
4. Молев М. Д., Паскарелов С. И., Мирошниченко Д. Е. Оценка содержания тяжелых металлов в донных отложениях реки Дон // Дневник науки. 2023. № 5(77). DOI: 10.51691/2541-8327_2023_5_25. EDN: BSBIUG.
5. Донные отложения дельты Дона и содержание техногенных радионуклидов в них / Г. Г. Матишов, В. В. Польшин, Г. В. Ильин, Г. С. Усягина // Наука юга России. 2023. Т. 19, № 3. С. 29–38. DOI: 10.7868/S25000640230305. EDN: IVPHPJ.
6. Nakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach // Water Research. 1980. Vol. 14. P. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
7. Донные отложения рек техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: сравнительная оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами по отечественным и зарубежным критериям / В. Е. Закруткин, В. Н. Решетняк, О. С. Решетняк, Е. В. Гибков // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 4. С. 554–564. DOI: 10.31857/S2587556621040130. EDN: EQGUFD.
8. Abraham G. M. S., Parker R. J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. Vol. 36. P. 227–238. DOI: 10.1007/s10661-007-9678-2. EDN: OSVTGE.
9. Федоров Ю. А., Доценко И. В., Михайленко А. В. Поведение тяжелых металлов в воде Азовского моря во время ветровой активности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2015. № 3. С. 108–112. EDN: UMDPBX.
10. Матишов Г. Г., Буфетова М. В., Егоров В. Н. Нормирование потоков поступ-

ления тяжелых металлов в Азовское море по оценкам интенсивности седиментационного самоочищения вод // Наука юга России. 2017. Т. 13, № 1. С. 44–58. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-44-58. EDN: YNEZQD.

11. Лихачева Н. А., Митрофанова В. В. Сорбция ионов тяжелых металлов гуминовыми веществами // Башкирский химический журнал. 2022. Т. 29, № 4. С. 41–48. DOI: 10.17122/bcj-2022-4-41-48. EDN: TAXUDK.

12. Взаимодействие гуминовых кислот с ионами металлов и структура металлгуминовых комплексов / И. И. Лиштван, Ф. Н. Капуцкий, Ю. Г. Янута, А. М. Абрамец, Г. С. Монич, В. П. Стригуцкий, Н. С. Глухова, В. Н. Алейникова // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. 2012. № 2. С. 12–16. EDN: SCSGCD.

13. Волкова И. В., Поляков Е. В. Комплексообразование гуминовых кислот с микроэлементами: методы и подходы // Журнал аналитической химии. 2023. Т. 78, № 12. С. 1064–1095. DOI: 10.31857/S0044450223120228. EDN: YXOLYV.

14. Загайнова Е. В. Процессы комплексообразования ионов марганца с органическими и неорганическими соединениями и их миграция в экосистеме слабопроточного водного объекта // Водное хозяйство России. 2013. № 5. С. 54–67. EDN: REWFAB.

References

1. Dvornikova V.S., Kaverina N.V., 2016. *Geokhimicheskoe sostoyanie donnykh otlozheniy poymennykh ozer Podgorenskogo gidrograficheskogo uchastka r. Don* [Geochemical condition of benthal deposits in flood plain lakes of Podgorenskiy hydrographic river reach Don]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], no. 1, pp. 71–74, EDN: VVSHTN. (In Russian).

2. Ryzhakov A.N., Martynov D.V., 2021. *Otsenka stepeni zagryazneniya donnykh otlozheniy malykh rek Rostovskoy oblasti* [Assessment of the degree of pollution of bottom sediments of small rivers of Rostov region]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo* [Ecology and Water Management], vol. 3, no. 2, pp. 29–39, DOI: 10.31774/2658-7890-2021-3-2-29-39, EDN: XZBBEX. (In Russian).

3. Vinogradov A.P., 2021. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of Rare and Trace Chemical Elements in Soils]. Moscow, RAS Publ., 298 p. (In Russian).

4. Molev M.D., Paskarelov S.I., Miroshnichenko D.E., 2023. *Otsenka sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh reki Don* [Evaluation of the content of heavy metals in the bottom sediments of the Don river]. *Dnevnik nauki* [Science Diary], no. 5(77), DOI: 10.51691/2541-8327_2023_5_25, EDN: BSBIUG. (In Russian).

5. Matishov G.G., Polshin V.V., Ilyin G.V., Usyagina G.S., 2023. *Donnye otlozheniya del'ty Dona i sodержanie tekhnogennykh radionuklidov v nikh* [Bottom sediments of the Don delta and the content of technogenic radionuclides in them]. *Nauka yuga Rossii* [Science in the South of Russia], vol. 19, no. 3, pp. 29–38, DOI: 10.7868/S25000640230305, EDN: IVPHPJ. (In Russian).

6. Hakanson L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, vol. 14, pp. 975–1001, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).

7. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., 2021. *Donnye otlozheniya rek tekhnogenno narushennykh geosistem Vostochnogo Donbassa: sravnitel'naya otsenka urovnya zagryazneniya tyazhelymi metallami po otechestvennym i zarubezhnym kriteriyam* [River bottom sediments of technogenic disturbed geosystems of the Eastern Donbas: comparative assessment of pollution level with heavy metals by Russian and international criteria]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of Russian

Academy of Sciences. Geographical Series], vol. 85, no. 4, pp. 554-564, DOI: 10.31857/S2587556621040130, EDN: EQGUFD. (In Russian).

8. Abraham G.M.S., Parker R.J., 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 36, pp. 227-238, DOI: 10.1007/s10661-007-9678-2, EDN: OSVTGE.

9. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V., 2015. *Povedenie tyazhelykh metallov v vode Azovskogo morya vo vremya vetrovoy aktivnosti* [The behaviour of heavy metals in water of the Sea of Azov during a wind-driven activity]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Natural Sciences], no. 3, pp. 108-112, EDN: UMDPBX. (In Russian).

10. Matishov G.G., Bufetova M.V., Egorov V.N., 2017. *Normirovanie potokov postupleniya tyazhelykh metallov v Azovskoe more po otsenkam intensivnosti sedimentatsionnogo samoochishcheniya vod* [The regulation of flows of heavy metals into the Sea of Azov according to the intensity of sedimentation of water self-purification]. *Nauka yuga Rossii* [Science in the South of Russia], vol. 13, no. 1, pp. 44-58, DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-44-58, EDN: YHEZQD. (In Russian).

11. Likhacheva N.A., Mitrofanova V.V., 2022. *Sorbtsiya ionov tyazhelykh metallov guminovymi veshchestvami* [Sorption of heavy metal ions by humic substances]. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], vol. 29, no. 4, pp. 41-48, DOI: 10.17122/bcj-2022-4-41-48, EDN: TAXUDK. (In Russian).

12. Lishtvan I.I., Kaputsky F.N., Yanuta Yu.G., Abramets A.M., Monich G.S., Strigutsky V.P., Glukhova N.S., Aleynikova V.N., 2012. *Vzaimodeystvie guminovykh kislot s ionami metallov i struktura metallguminovykh kompleksov* [Interaction of humic acids with metal ions and the structure of metal-humic complexes]. *Vestnik BGU. Seriya 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya* [Bulletin of BSU. Episode 2: Chemistry. Biology. Geography], no. 2, pp. 12-16, EDN: SCSGCD. (In Russian).

13. Volkova I.V., Polyakov E.V., 2023. *Kompleksoobrazovanie guminovykh kislot s mikroelementami: metody i podhody* [Complexation of humic acids with microelements: methods and approaches]. *Zhurnal analiticheskoy himii* [Journal of Analytical Chemistry], vol. 78, no. 12, pp. 1064-1095, DOI: 10.31857/S0044450223120228, EDN: YXOLYV. (In Russian).

14. Zagaynova E.V., 2013. *Protsessy kompleksoobrazovaniya ionov margantsa s organicheskimi i neorganicheskimi soedineniyami i ikh migratsiya v ekosisteme slaboprotchnogo vodnogo ob'yekta* [Manganese ions complexation processes with organic and inorganic compounds and their migration in a low-flowing water body ecosystem]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii* [Water Sector of Russia], no. 5, pp. 54-67, EDN: REWFAB. (In Russian).

Информация об авторах

Т. И. Дрововозова – ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, доцент, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), tid70.drovovozova@yandex.ru, AuthorID: 314686, ORCID: 0000-0002-8724-7799;

М. В. Власов – ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), m_vlasov@bk.ru, AuthorID: 632423, ORCID: 0000-0002-9103-1958;

Н. Н. Красовская – научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область,

г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), panya-86@mail.ru, AuthorID: 1094614, ORCID: 0000-0003-4426-7762;

Д. И. Ольгаренко – инженер, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), dan21022001@mail.ru, AuthorID: 1309966, ORCID: 0009-0005-1281-9800.

Information about the authors

T. I. Drovovozova – Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky Ave., 190), tid70.drovovozova@yandex.ru, AuthorID: 314686, ORCID: 0000-0002-8724-7799;

M. V. Vlasov – Leading Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky Ave., 190), m_vlasov@bk.ru, AuthorID: 632423, ORCID: 0000-0002-9103-1958;

N. N. Krasovskaya – Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky Ave., 190), panya-86@mail.ru, AuthorID: 1094614, ORCID: 0000-0003-4426-7762;

D. I. Olgarenko – Engineer, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky Ave., 190), dan21022001@mail.ru, AuthorID: 1309966, ORCID: 0009-0005-1281-9800.

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 16.07.2025; одобрена после рецензирования 09.02.2026; принята к публикации 19.03.2026.

The article was submitted 16.07.2025; approved after reviewing 09.02.2026; accepted for publication 19.03.2026.