

УДК 504.75 || EDN: DVSNPY

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЧЁРНОЙ РЕЧКИ В ПРЕДЕЛАХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

В.А. Кудрявцева*, Т.А. Попова, Т.Д. Шигаева**

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (ФИЦ РАН),
Санкт-Петербург, Россия*

Эл. почта: * valenkud@yandex.ru, ** t.sh54@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.11.2025; принята к печати 03.12.2025

Исследовано воздействие соединений тяжёлых металлов на экосистему Чёрной реки в Санкт-Петербурге. В летние месяцы 2023–2025 годов были определены валовые содержания кадмия, свинца, меди и цинка в донных отложениях. По индексу геоаккумуляции соединения кадмия вносят основной вклад в антропогенное загрязнение донных отложений. В устье реки (станция S1) уровень загрязнения был умеренно высоким, в истоке (станция S3) – с умеренного в 2023 году он возрос до значительного в последующие два года. На станции S2 в средней части течения реки незагрязнённое состояние в 2023 году перешло к умеренному загрязнению в 2024 и 2025 годах. Выявлено значительное повышение кислотности донных отложений в 2024 году. Эти изменения существенно повлияли на химический состав придонной воды. Концентрации цинка на станциях S1, S2 и S3 были в 300, 700 и 690 раз выше нормативных значений, соответственно. Уровень кадмия на станциях S1 и S2 превышал допустимые пределы в 4–5 раз. Также на станциях S1 и S2 было обнаружено повышенное содержание меди. Значительное увеличение концентраций растворимых форм цинка, меди и кадмия представляет риск вторичного загрязнения водной системы и долгосрочных негативных последствий для экосистем. Полученные данные подчеркивают необходимость разработки и внедрения комплексных мер по снижению антропогенного воздействия на экосистему Чёрной реки. Эти меры должны включать мониторинг качества воды, контроль за выбросами загрязняющих веществ и восстановление химического равновесия водных объектов.

Ключевые слова: донные отложения, тяжёлые металлы, растворимые формы металлов, индекс геоаккумуляции, Чёрная река Санкт-Петербурга.

Spatial and temporal dynamics of heavy metal accumulation in bottom sediments of a small river in an urbanized area of Saint Petersburg

V.A. Kudriavtseva*, T.A. Popova, T.D. Shigayeva

Saint-Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Email: * valenkud@yandex.ru, ** t.sh54@mail.ru

The impact of heavy metal compounds on the ecosystem of a small river in Saint Petersburg was investigated. During the summer months of 2023–2025, the gross contents of cadmium, lead, copper and zinc in sediment were determined. Cadmium compounds contribute most to anthropogenic sediment pollution according to the Geoaccumulation Index. At the mouth of the river (station S1) the level of pollution was moderately high. At the source (station S3) it was moderate in 2023 and increased to significant in the following two years. At station S2, in the middle of the river flow, the unpolluted state in 2023 turned to moderate pollution in 2024 and 2025. There was a significant increase in the acidity of bottom sediments in 2024. These changes significantly affected the chemical composition of the bottom water. Zinc concentrations at Stations S1, S2 and S3 were 300, 700 and 690 times higher, respectively, than the regulatory values. The level of cadmium at Stations S1 and S2 exceeded the permissible limits by 4–5 times. Also, elevated copper content was found at Stations S1 and S2. Significant increases in the concentrations of the soluble forms of zinc, copper and cadmium pose a risk of secondary contamination of the water system and long-term negative effects on ecosystems. The data obtained underline the need to develop and implement comprehensive measures to reduce anthropogenic impact on the ecosystem of the Black River. These measures should include water quality monitoring, control of pollutant emissions and restoration of the chemical balance of water bodies.

Keywords: *bottom sediments, heavy metals, soluble metal forms, geoaccumulation index, Black River of Saint-Petersburg.*

Введение

Малые реки выполняют роль приёмников стока городов и в значительной степени определяют гидрологический режим и качество вод рек, в которые впадают. Исследование уровня загрязнения малых рек – одна из важнейших задач экологического мониторинга. Также в силу своих малых объёмов и, как следствие, чувствительности к антропогенной нагрузке, малые реки служат хорошим индикатором экологического состояния своих водосборных территорий [2, 5, 12]. В каждом крупном городе организована ливневая канализация. Но далеко не всегда городские службы способны на ее прочистку, необходимый ремонт и замену, что приводит к утечкам в подземные воды, подтоплениям и загрязнению ливневого стока. Талые и дождевые воды, сформированные на территории городов, насыщенные растворенными и взвешенными химическими веществами, без очистки поступают в водные объекты. Химическое загрязнение водоемов промышленными стоками приводит к изменению их экологического состояния [4].

В водных системах донные отложения (ДО) препятствуют резкому изменению условий в водоеме при его загрязнении [6]. Это происходит вследствие выведения части наиболее трудно разлагаемых веществ на дно и их дальнейшей трансформации и захоронения в ДО. В связи с этим ДО рассматриваются как основные носители информации о загрязнении водоёма. При определённых условиях ДО могут служить источником вторичного загрязнения контактирующей с ними водной массы. Это зависит от состояния динамического равновесия в системе ДО–вода, а также от свойств воды, изменяющихся в присутствии различных загрязнителей [7, 13].

Тяжелые металлы (ТМ) являются ключевыми индикаторами состояния экосистем, их аккумуляция и распределение в природных средах служат важным диагностическим критерием экологического благополучия. Эти элементы не подвергаются биодegradации и не элиминируются из экосистем естественным путем, что приводит к их накоплению в различных компонентах окружающей среды. В результате тяжелые металлы трансформируются в новые химические формы, становясь основными источниками загрязнения экосистем.

В настоящее время при проведении экологических исследований ДО на предмет содержания тяжелых металлов доминирует метод оценки их валового количества, не учитывающий разнообразие форм их нахождения. Однако валовое содержание не предоставляет полной информации о степени токсичности, так как она определяется множеством факторов, включая химическую форму металла, а также физико-химические характеристики и биологические свойства среды, в которой происходит его аккумуляция.

Изучение форм нахождения тяжелых металлов в водных экосистемах, их подвижности, биодоступности для водных организмов, а также процессов миграции, седиментации и ремобилизации из ДО представляет собой актуальную и многоаспектную задачу, требующую комплексного подхода и применения современных аналитических методов. Анализ гидрохимического режима и низкой скорости течения в малых водотоках дельты Невы выявил, что эти условия способствуют интенсивному накоплению ДО с высокой концентрацией экотоксикантов, что негативно сказывается на биоценозах. В некоторых водотоках полностью отсутствуют донные беспозвоночные, что указывает на экологический кризис [11].

Цель настоящего исследования – изучить содержание растворимых и подвижных форм тяжелых металлов в ДО Черной речки в Санкт-Петербурге в летние периоды летом 2023–2025 годов; проверить, могут ли ДО загрязнять воду, когда тяжелые металлы из них мигрируют в водную толщу; выявить ключевые факторы, влияющие на качество воды в Черной речке.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – ДО и верхний слой воды Черной речки, относящейся к речному бассейну р. Невы. Со времени основания Санкт-Петербурга Черная речка, как и многие другие водотоки, претерпела ряд изменений: часть её русла стала либо расположенной в коллекторах, находящихся под землёй, либо засыпанной в ходе строительных работ. В настоящее время протяженность сохранившегося участка Черной речки не превышает 4 км [11].

Пробы поверхностного слоя ДО и образцы поверхностных вод Черной речки отобраны в летние периоды 2023–2025 годов. Отбор образцов ДО производили пробоотборником-ковшом Вин-Вана 0430 для донных отложений. Для исследований отбирали поверхностный десятисантиметровый слой. Географические координаты и места отбора проб ДО и поверхностных вод представлены в табл. 1 и на рисунках 1–3.

Табл. 1

Географические координаты станций отбора проб донных отложений и поверхностных вод Черной речки

Станция	S1	S2	S3
Географические координаты	59.989619 с.ш. 30.288421 в.д	59.986479 с.ш. 30.302431 в.д	59.984157 с.ш. 30.310250 в.д.

Станция S1 (устье) находится возле пешеходного моста, рядом с которым возведен новый жилой квартал.

Станция S2 расположена в средней части течения реки возле автодорожного моста, находящегося возле станции метро Черная речка. В данной точке набережная облицована гранитом, организованы спуски к воде. Наклонные спуски засеяны газонными травами.

Станция S3 расположена возле железнодорожного моста. Рядом расположены жилые дома, складские и производственные помещения. На данном участке нет организованных спусков к воде, глубина реки в летний период не превышает 0,5–1,0 м. На этом участке реки растёт много деревьев, лиственный опад которых заиливает русло реки.



Определение валовых концентраций тяжелых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu)

Для анализа валовых концентраций цинка, кадмия, свинца и меди использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе Agilent 7700х. Пробы ДО предварительно разлагали в микроволновой печи смесью равных объемов концентрированных азотной, плавиковой и хлорной кислот. После разложения раствор разбавляли до необходимого объема и подвергали анализу. Количественное определение элементов осуществляли путем сравнения масс-спектров рабочей пробы и калибровочной смеси, что позволяло автоматически вычислять содержание каждого элемента.

Процедура деструкции аналитических проб включала следующие этапы. Взвешивали навеску просеянного образца ДО (не менее 0,250 г), переносили навески в стакан для микроволновой печи, добавляли 10 см³ смеси концентрированной азотной кислоты, плавиковой кислоты и хлорной кислоты в соотношении 1:1:1, прикрывали стакан часовым стеклом и выдерживали в вытяжном шкафу в течение 2–3 часов. Добавляли около 10 см³ бидистиллированной воды, помещали стаканы в микроволновую печь и проводили разложение образцов, охлаждение проб до комнатной температуры без открытия стаканов, перенос раствора в мерную колбу объемом 50 см³ и доведение объема до метки бидистиллированной водой, после чего переносили подготовленный образец в пластиковую пробирку. Раствор вводили в анализатор, где его микрокапли полностью испарялись, а атомы подвергались термической диссоциации и ионизации. Сравнение сигналов элементов в рабочей пробе и калибровочной смеси обеспечивало автоматическое определение количественного содержания каждого элемента.

Определение растворимых и подвижных форм тяжелых металлов (Cd, Cu, Pb, Zn) в донных отложениях

Концентрации подвижных форм кадмия, меди, свинца и цинка в ДО определяли в растворах ацетатно-аммонийных вытяжек. Пробы высушивали до постоянной массы при комнатной температуре и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Для получения ацетатно-аммонийных вытяжек в колбу с притертой пробкой вносили 5±0,01 г воздушно-сухой навески пробы, добавляли 25 мл ацетатно-аммонийного буферного раствора с pH 4,8, смесь помещали на шейкер и энергично взбалтывали в течение двух часов, пробу выдерживали в ацетатно-аммонийном буферном растворе в течение суток при комнатной температуре. Через 24 часа раствор отфильтровывали в стеклянную колбу через бумажный фильтр.

Для водных вытяжек процесс был аналогичным, но вместо ацетатно-аммонийного раствора использовали воду Черной реки. Определение концентраций тяжелых металлов в водных и ацетатно-аммонийных вытяжках проводили методом анодной инверсионной вольтамперометрии на приборе АВА-3.

Анализ поверхностных вод

Анализ поверхностных вод на содержание тяжелых металлов проводили методом анодной инверсионной вольтамперометрии на приборе АВА-3. Величину pH измеряли на приборе pH 420 с использованием комбинированного электрода.

На каждой станции отбиралось по 9 проб воды и по 9 проб ДО (n=9). Концентрации тяжелых металлов в таблицах представлены в виде среднего значения ± среднеквадратичная ошибка.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа поверхностных вод представлены в табл. 2.

Табл. 2

Концентрации соединений тяжелых металлов и pH поверхностной воды Черной речки (n = 9)							
Станция	pH по годам			Металл	Концентрации тяжелых металлов (мкг/л) по годам		
	2023	2024	2025		2023	2024	2025
S1	н/н*	6,71±0,02	7,55±0,02	Cd	н/н	0,018±0,001	0,041±0,001
				Pb	н/н	1,14±0,10	0,256±0,01
				Cu	н/н	1,31±0,05	2,44±0,06
				Zn	н/н	2,21±0,18	2,77±0,37
S2	7,62±0,02	6,72±0,02	7,39±0,02	Cd	0,066±0,009	< 0,2	< 0,2
				Pb	0,948±0,115	0,64±0,01	0,222±0,02
				Cu	2,99±0,02	1,12±0,19	2,45±0,02
				Zn	3,20±0,48	2,03±0,17	1,74±0,32
S3	7,21±0,02	7,22±0,02	7,72±0,02	Cd	0,138±0,035	0,074±0,003	0,063±0,002
				Pb	1,65±0,09	4,11±0,13	0,910±0,038
				Cu	2,68±0,05	1,95±0,04	5,96±0,19
				Zn	3,83±0,22	2,00±0,22	5,64±0,28

Примечание: * н/н – нет наблюдений

В 2024 году произошло небольшое закисление воды на станциях S1 и S2. Превышение предельно допустимой концентрации наблюдается только для соединений меди на всех станциях (ПДК Cu = 1 мкг/л¹). Из табл. 2 следует, что наиболее загрязнен соединениями тяжелых металлов участок станции S3. В настоящее время недалеко от точки забора S3 идет строительство жилого дома, в 2023 году менялись газопроводные трубы. Развитие городской инфраструктуры, строительство, увеличение водонепроницаемых поверхностей усиливает интенсивность поверхностного стока [8], что мы и наблюдаем в истоке Черной речки.

Влияние объектов накопленного экологического вреда на качество водных ресурсов предложено рассматривать с учетом особенностей формирования ДО, принимая во внимание гидрологический и гидрохимический режимы малых рек, историю локальной антропогенной деятельности и динамики гидроклиматических показателей [1]. Традиционно экологическое состояние водных систем оценивается по валовому содержанию тяжелых металлов в ДО. В табл. 3 представлены средние значения валовых концентраций соединений тяжелых металлов в пробах, отобранных с верхнего десятисантиметрового слоя ДО в летние периоды 2023–2025 годов.

Табл. 3

Средние значения валовых концентраций тяжелых металлов (мг/кг) в донных отложениях в летние периоды 2023–2025 годов (n = 9)

Станция	Металл	Валовые концентрации (мг/кг) по годам			Фоновая концентрация (мг/кг) [10]
		2023	2024	2025	
S1	Cd	н/н	13,43±1,42	11,82±0,12	0,17
	Pb	н/н	96±9	84±8	17
	Cu	н/н	122±11	145±13	7,4
	Zn	н/н	341±31	298±30	41,5
S2	Cd	0,25±0,02	9,42±0,89	8,11±0,84	0,17
	Pb	22±2	110±12	102±10	17
	Cu	20±2	148±15	193±20	7,4
	Zn	49±5	415±42	285±29	41,5
S3	Cd	5,14±0,49	79,16±8,11	63,14±0,62	0,17
	Pb	43±4	96±10	83±8	17
	Cu	90±8	97±10	124±11	7,4
	Zn	164±15	427±41	314±32	41,5

Для оценки степени загрязнения ДО металлами использован индекс геоаккумуляции (I_{geo}) [15]. Расчет проводили по формуле

$$I_{geo} = \log_2 C/1,5 C_f, \quad (1)$$

где: C – концентрация тяжелых металлов в осадке; C_f – геохимическое фоновое значение концентрации химического элемента, которое определяют в результате специальных исследований, учитывая особенности

¹ Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26 мая 2025 года № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

рассеивания элемента в данном регионе; 1,5 – коэффициент, учитывающий различные варианты природных концентраций химического элемента.

В качестве фона принято содержание тяжелых металлов в алевритовых илах в верхнем течении р. Невы, к бассейну которой относится Черная речка [9]. Для оценки уровня загрязнения используется следующая шкала: ≤ 0 – незагрязненный (класс 0); 0–1 – от незагрязненного до умеренно загрязненного (класс 1); 1–2 – умеренно загрязненный (класс 2); 2–3 – от умеренно до сильно загрязненного (класс 3); 3–4 – сильно загрязненный (класс 4); 4–5 – от сильно до чрезвычайно сильно загрязненного (класс 5); 5–6 – чрезвычайно сильно загрязненный (класс 6). Табл. 4 демонстрирует изменение индекса геоаккумуляции соединений тяжелых металлов в ДО в летние периоды 2023–2025 годов.

Табл. 4

Индексы геоаккумуляции соединений тяжелых металлов в донных отложениях Черной речки в летние периоды 2023–2025 годов

Элемент	I _{geo} (S1)			I _{geo} (S2)			I _{geo} (S3)		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Cu	н/н	3,4	3,7	0,8	3,7	4,1	4,3	3,1	3,5
Zn	н/н	2,4	2,2	– 0,3	2,7	2,1	1,4	2,8	2,3
Cd	н/н	5,7	5,5	– 0,3	5,2	4,9	2,1	8,2	7,9
Pb	н/н	1,9	1,7	– 0,2	2,1	2	0,8	1,9	1,7

В 2023 году было зафиксировано антропогенное загрязнение ДО соединениями кадмия и меди на станции S3, что свидетельствует о вкладе техногенных факторов в экологическую деградацию водной системы Черной речки. В 2024 году наблюдался резкий скачок загрязнения ДО тяжелыми металлами на всех исследуемых станциях, причем уровень загрязнения кадмиевыми соединениями достиг критических значений. Интенсивное дорожное движение и активное строительство жилых комплексов вдоль русла Черной речки являются ключевыми факторами, способствующими поступлению кадмиевых соединений в ДО через поверхностный сток [1]. Эти процессы представляют собой сложную цепь взаимодействий, включающую физико-химические трансформации загрязняющих веществ в окружающей среде, их миграцию и аккумуляцию в различных компонентах экосистемы.

Определение общей концентрации тяжелых металлов в ДО не предоставляет исчерпывающей информации о функциональной роли этих отложений в качестве источника или резервуара загрязняющих веществ. Для более глубокого понимания механизмов миграции и аккумуляции тяжелых металлов необходимо проводить детальный анализ различных форм их присутствия в ДО [3, 10]. Химическая форма металлов оказывает значительное влияние на их миграционные свойства и токсичность, что подчеркивает важность изучения специфических форм металлов в экосистемах.

Особое внимание в экологических исследованиях уделяется наиболее подвижным и биологически доступным формам тяжелых металлов [9]. В табл. 5 представлены данные по процентному содержанию растворимых и подвижных форм ТО.

Табл. 5

Процентное содержание растворимых и подвижных форм тяжелых металлов в донных отложениях Черной речки в 2023–2025 годах

Станция	Металл	% растворимых форм ТМ в водных вытяжках по годам			% растворимых форм ТМ в ацетатно-аммонийных вытяжках по годам		
		2023	2024	2025	2023	2024	2025
S1	Cd	н/н	6,9	5,2	н/н	23	20
	Pb	н/н	0,004	0,01	н/н	18	18
	Cu	н/н	0,15	0,11	н/н	3	2
	Zn	н/н	4,5	3,1	н/н	36	32
S2	Cd	0,5	1,3	1,1	2	33	28
	Pb	5,2	0,001	4,8	10	12	11
	Cu	0,09	0,13	0,11	10	3	4
	Zn	2,4	8,5	6,4	11	39	27
S3	Cd	0,01	2,6	1,5	31	36	29
	Pb	0,01	0,001	0,008	19	8	7
	Cu	0,04	0,09	0,06	1	4	2
	Zn	0,5	8,1	6,4	28	46	34

Следует отметить, что в 2024 году происходит заметное процентное увеличение растворимых форм цинка и кадмия. Аналогичная картина наблюдается и для подвижных форм ТМ. Мы предположили, что в 2024 году из-за интенсивного строительства вдоль Черной речки произошли изменения физико-химического состояния ДО. Действительно, в 2024 году на всех исследуемых станциях Черной речки было зафиксировано закисление ДО, что сопровождалось схожими изменениями в физико-химических параметрах поверхностных

вод (табл. 2 и 6). Эти наблюдения свидетельствуют о существенном антропогенном воздействии на водные экосистемы данного региона

Табл. 6

Величины pH водных вытяжек донных отложений Черной речки (n = 9)			
Станция	pH водной вытяжки по годам		
	2023	2024	2025
S1	н/н	5,68±0,02	6,24±0,02
S2	6,77±0,02	5,89±0,02	5,92±0,02
S3	6,92±0,02	5,83±0,02	7,56±0,02

Изменения кислотно-щелочного баланса (pH) ДО привели к увеличению концентрации растворимых форм тяжелых металлов в донных отложениях и их миграции в придонный слой, что является важным фактором в формировании экологического риска (табл. 7)

Табл. 7

Концентрации (мкг/л) водорастворимых форм соединений тяжелых металлов в водных вытяжках донных отложений Черной речки (n = 9)										
Металл	Год									ПДК, мкг/л
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025	
	Станция S1			Станция S2			Станция S3			
Cd	н/н	18,52±0,45	1,31±0,03	0,05± 0,003	23,71±1,51	7,87±0,16	0,14±0,02	5,14±0,21	0,28±0,01	5
Pb	н/н	0,96±0,02	0,26±0,02	5,71±0,47	0,31±0,01	0,50±0,02	1,34±0,11	0,18±0,02	4,93±0,23	6
Cu	н/н	38±6	1,36±0,16	1,33±0,13	26,7±1,2	1,92±0,03	7,1±0,1	18,3±1,2	9,8±0,6	1
Zn	н/н	3071±136	448±48	10±1	7042±206	2403±33	168±9	6882±265	816±20	10

Сравнительный анализ полученных концентраций ТО с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) выявил значительные превышения. Для соединений цинка на станциях S1, S2 и S3 зафиксированы трехсот-, семисот- и семисоткратные превышения ПДК, соответственно. Концентрации соединений кадмия на станциях S1 и S2 превышают ПДК в 4-5 раз, тогда как на станции S3 увеличение концентрации растворимых форм кадмия не достигло предельных значений. Максимальные концентрации растворимых соединений меди наблюдаются на станциях S1 и S2.

В результате изменения pH донных отложений с 6,7 до 5,7 наблюдается значительное увеличение концентрации растворимых форм цинка, меди и кадмия, что способствует вторичному загрязнению поверхностных вод. Эти процессы могут иметь долгосрочные последствия для биогеохимического цикла элементов и состояния водных экосистем. Химические загрязнители могут влиять на различные этапы химических взаимодействий между организмами [16]. Водные организмы, такие как рыбы и ракообразные, в отличие от наземных позвоночных, имеют высокоразвитые системы обоняния и вкуса, которые напрямую контактируют с химическими веществами в воде [14]. Это делает их особенно чувствительными к антропогенным загрязнителям, которые могут нарушать работу сенсорных систем различными способами. Таким образом изучение трансформации форм тяжелых металлов в ДО позволяет оценить состояние здоровья водной экосистемы.

Заключение

Изучение валового содержания тяжелых металлов донных отложений позволило выделить участки Черной речки, отличающиеся по степени антропогенной нагрузки. Основным загрязнителем являются соединения кадмия, концентрация которых на всех станциях наблюдения увеличивалась в период с 2023 по 2025 год. Анализ кислотно-щелочного баланса донных отложений показал, что в 2024 году произошло увеличение кислотности, что способствовало росту концентрации растворимых форм тяжелых металлов в донных отложениях и их миграции в придонный водный слой, что является важным фактором в формировании экологического риска. Полученные данные указывают на необходимость разработки и внедрения комплексных мер по снижению антропогенного воздействия на экосистему Черной речки, включая мониторинг качества воды, контроль за выбросами загрязняющих веществ и восстановление химического равновесия водных объектов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FFZF-2025-0018).

Литература

1. Воробьев АЕ, Сарбаев ВИ, Дьяченко ВВ, Шилкова ОС. Транспортные магистрали как источник загрязнения окружающей среды. М.: МГИУ; 2000. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23691555>

2. Дроздова ОЮ, Карпухин ММ, Думцев СВ, Лапицкий СА. Формы металлов в воде и донных отложениях р. Малая Сеньга (Владимирская область). Вестн Моск ун-та сер 4. Геология. 2021;(2):97-103. URL: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-2-97-103>

3. Ерёмин ВН, Шешнёв АС, Решетников МВ, Теслинова ОВ. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах Ботанического сада Саратовского университета. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2020;20(1):41-5. DOI: 10.18500/1819-7663-2020-20-1-41-45
4. Коломийцев НВ, Корженевский БИ, Ильина ТА, Гетьман ЕН. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений. Мелиорация и водное хозяйство. 2015;(6):15-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26135874>
5. Корженевский БИ, Коломийцев НВ, Ильина ТА, Гетьман НО. Мониторинг загрязнения автотранспортом малых рек Московской области тяжелыми металлами. Безопасность жизнедеятельности. 2018;208(4):24-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32709598>
6. Крамер ДА, Тихонова ИО. Антропогенное загрязнение донных отложений малых рек. Башкирский химический журнал. 2012;19(4):29-34. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18980906>
7. Кудрявцева ВА, Шигаева ТД, Панкратова НМ. Особенности миграции тяжелых металлов в системе "придонная вода-поровая вода-поверхностный слой донных отложений" прибрежной зоны восточной части Финского залива в весенне-летний период. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022;333(1):95-104. DOI:10.18799/24131830/2022/1/3336
8. Мануйлов МБ, Московкин ВМ. Влияние поверхностного стока (дождевых и талых вод) на экологическую и техногенную ситуацию в городах. Вода и экология: проблемы и решения. 2016;(2):35-47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26154979>
9. Опекунов АЮ, Митрофанова ЕС, Опекунова МГ. Техногенная трансформация состава донных отложений рек и каналов Санкт-Петербурга. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017;(4):48-61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29991101>
10. Опекунов АЮ, Опекунова МГ, Джораева АН. Фракционирование металлов в донных осадках рек Санкт-Петербурга. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2024;69(1):166-84. DOI: 10.21638/spbu07.2024.109
11. Петров ДС, Якушева АМ. Оценка экологического состояния малых водотоков Санкт-Петербурга по показателям зообентоса в 2019-2021 гг. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022;67(3):529-44. DOI: 10.21638/spbu07.2022.308
12. Питулько ВМ, Кулибаба ВВ, Иванова ВВ. Оценка воздействия объектов накопленного вреда на геосистемы малых рек. Геоэкология. Инженерная геология, гидроэкология, геокриология. 2020;(6):54-62. DOI: 10.31857/S0869780920060090
13. Усманов ИА, Магай МП. Донные отложения как источник загрязнения природных вод. Экологический вестник Северного Кавказа. 2020;16(1):73-6. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42562605>
14. Karim K, Guha S, Beni R. Comparative Analysis of Chemical, Physical and Biological Contaminants in Drinking Water in Various Developed Countries around the World, Journal of Water Resource and Protection. 2020;12(8):714-28. DOI:10.4236/jwarp.2020.128043
15. Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins - Veränderungen seit 1971. Umschau in Wissenschaft und Technik. 1979;79:778-83.
16. Niinemets Ü, Kahru A, Nõges P, Tuvikene A, Vasemägi A, Mander Ü, Nõges T. Environmental feedbacks in temperate aquatic ecosystems under global change: why do we need to consider chemical stressors? Regional Environmental Change. 2017;17(7):2079-96. DOI:10.1007/s10113-017-1197-2