



ЭКОЛОГИЯ

ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336

EDN: MSXQQH

УДК 519.8:551.46

Научная статья / Research article

**Особенности изучения загрязнения
микроэлементами донных отложений водных объектов****Г.Ю. Толкачев^{ID}✉, Б.И. Корженевский^{ID}, Н.В. Коломийцев^{ID}***Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова,
г. Москва, Российская Федерация*

✉kolomiytsev@vniigim.ru

Аннотация. В настоящее время состояние и качество воды в водных объектах под воздействием техногенных факторов изменяются в худшую сторону. Исследования донных отложений водоемов позволяют установить неблагоприятные участки и определить источники загрязнения. С точки зрения техногенной нагрузки наиболее опасными загрязняющими веществами являются микроэлементы Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, As. Приведены результаты исследований загрязненности перечисленными микроэлементами донных отложений водоемов, оцененных по игео-классам – по загрязненности сорбирующей фракции (менее 0,02 мм). Описаны или представлены ссылки на методики, применяемые при проведении полевых и лабораторных исследований, а также расчетов уровней загрязнения. Для систематизации исследований осуществлено выделение объектов различных иерархических уровней на основании долголетних экспериментальных работ в пределах Волжского бассейна. Для различных по иерархии таксонов предлагаются различные площадные и временные режимы обследований. Представлена методология полевых и лабораторных исследований загрязнения донных отложений водоемов.

Ключевые слова: мониторинг, загрязнение, тяжелые металлы, участки категорий, методика, водные объекты, сорбирующая фракция

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

© Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 15.05.2024; доработана после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 15.08.2024.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Особенности изучения загрязнения микроэлементами донных отложений водных объектов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 325–336. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336>

Features of the study contamination of sediments by the trace elements

Gleb Yu. Tolkachev^{ID}✉, Boris I. Korzhenevskiy^{ID},
Nikolay V. Kolomiitsev^{ID}

*Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation
named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation*
✉kolomiitsev@vniigim.ru

Abstract. Currently, the condition and quality of water in water objects under the influence of technogenic factors changes for the worse. Studies of sediments of reservoirs make it possible to identify unfavorable areas and identify sources of pollution. From the point of view of technogenic load, the most dangerous pollutants are microelements Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, As. This article presents the results of studies of the contamination of sediments of reservoirs with the listed microelements, assessed by igeo-classes – by the contamination of the sorbing fraction (less than 0.02 mm). Describes or provides references to methods used in conducting nature and laboratory studies, as well as calculations of pollution levels. To systematize the research, objects of various hierarchical levels were identified on the basis of long-term experimental work within the Volga basin. For taxa of different hierarchies, various areal and time survey modes are proposed. The picture of contamination of sediments of the studied reservoirs is presented, and trends in its changes in space and time are noted.

Keywords: monitoring, pollution, heavy metals, sites of t categories, method, water objects, sorb fraction

Authors' contribution. All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Article history: received 15.05.2024; revised 21.06.2024; accepted 15.08.2024.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Tolkachev GYu, Korzhenevskiy BI, Kolomiitsev NV. Features of the study contamination of sediments by the trace elements. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):325–336. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336>

Наиболее опасными загрязняющими окружающую среду микроэлементами являются Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As. Комплексным показателем техногенной нагрузки на водный объект выступает степень

загрязнения его донных отложений (ДО). Они несут информацию об интенсивности и направленности инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, о качестве работы очистных сооружений, о поверхностном смыве с городских и промышленных зон. При этом водные объекты являются конечным звеном и потенциальным барьером в природно-техногенной ландшафтно-каскадной системе любой водосборной территории. Формальная нормативная база о допустимом содержании микроэлементов в ДО отсутствует. Это часто приводит к появлению существенно различающихся подходов к оценке загрязнения ДО.

На всех антропогенно осваиваемых территориях в водных объектах, как конечных звеньях стока, возникают геохимические аномалии. Для изучения состояния ДО водных объектов необходимо проводить мониторинг, поскольку сами отложения аккумулируют и трансформируют последствия техногенного воздействия, являясь при этом индикатором его уровня. Различное содержание тяжелых металлов (ТМ) и их набор в ДО определяется видами хозяйственной деятельности, гидродинамическими характеристиками водного объекта, физико-химическими процессами внутри него, а также минеральным и гранулометрическим составами сорбирующей фазы. От геоэкологического состояния поверхности водосбора зависит и режим водных объектов, прежде всего малых. На основании районирования водных объектов по условиям осадконакопления выбираются места отбора иловатых отложений. При изучении ДО водных объектов существует устоявшийся за четверть века подход в виде учета их гранулометрического состава [1-4].

Объекты и методы исследования

Для мониторинга и определения последовательности действий при обследовании водных объектов выделяются участки четырех категорий по природно-техногенным характеристикам [5]. К участкам I категории относятся чаши водохранилищ с сопредельными склонами, на которых расположены промышленные и селитебные зоны, сельхозугодья и прочие техногенные объекты, внутри участка I категории выделяются участки II категории, где фоновые значения элементов существенно превышены (города с промышленными зонами и поселки с сельхозугодьями). Малые реки – это участки III категории [5].

В большинстве исследований, посвященных ТМ в природных водных системах (т.е. металлам, связанным со взвешенными веществами или ДО), рассматривается валовое содержание элементов. При этом, как правило, упускается из рассмотрения их распределение по формам существования. При определении распределения микроэлементов в настоящей работе осуществлялся выбор фракций ДО, на которые могут повлиять различные условия среды. Использовался метод [6], позволяющий определить, с какими компонентами ДО связываются те или иные микроэлементы. Применение последовательных экстракций, хотя и требует значительного времени, предоставляет подробную

информацию о происхождении, способе появления, биологической и физико-химической доступности, мобилизации и транспорте микроэлементов. Фракция 1 – микроэлементы в обменном комплексе ДО. Изменения ионного состава природных вод влияют на процессы сорбции-десорбции. Фракция 2 – микроэлементы, связанные с карбонатами. Эта фракция очень восприимчива к изменениям pH среды. Фракция 3 – микроэлементы, связанные с оксидами железа и марганца. Фракция 4 – микроэлементы, связанные с органическим веществом ДО. В условиях окисления в природных водах органическое вещество может разлагаться, что приводит к выделению растворимых микроэлементов.

Определение концентрации ТМ в растворе осуществлялось на атомно-абсорбционном спектрометре «КВАНТ – Z.ЭТА-Т» (НПО «КОРТЭК», г. Москва). На нем определяются концентрации элементов в анализируемой пробе по селективному поглощению излучения резонансных спектральных линий определяемого элемента атомным паром анализируемой пробы¹. При использовании адсорбера диапазон линейности концентраций большинства исследованных элементов и аналитического сигнала наблюдается в интервале от 0 до 100 мг/мл. Стандартная ошибка разведения 2 %, стандартная ошибка прибора – 0,3–5 % [7].

Полевые исследования по изучению современного состояния и степени загрязнения водных объектов проводились на примере водных объектов Верхней Волги. Во время обследований пробы на активные формы микроэлементов отбирались из приповерхностной толщи ДО Ивановского водохранилища. В створе д. Плоски (Волжский плёс) и урочища Корчева в нижней части водохранилища активные формы кадмия, свинца и цинка связаны преимущественно с обменным комплексом и гидроксидами железа и марганца, активные формы меди – с обменным комплексом, гидроксидами железа и марганца и карбонатами, а никеля – с обменным комплексом и карбонатами. Активные формы вышеперечисленных элементов, связанных с органическим веществом ДО, не обнаружены. Результаты этих исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Концентрации Cd, Pb, Zn, Cu, Ni по активным формам существования в ДО, мг/кг
Table 1. Concentrations of Cd, Pb, Zn, Cu, Ni by active forms of existence in sediments, mg/kg

Пункты отбора	Cd		Pb		Zn		Cu			Ni	
	1	2	1	2	1	2	1	2	3	1	3
Дер. Плоски	1,78	–	21,8	55,6	10,0	43,8	35,8	37,2	6,0	21,8	43,8
Ур. Корчева	1,0	1,18	24,0	47,8	12,0	20,4	26,0	32,0	17,4	22,0	40,0

Примечание: 1 – ТМ, сорбированные в обменном комплексе; 2 – ТМ, сорбированные на гидроксидах железа и марганца; 3 – ТМ, сорбированные на карбонатах.

Источник: составлено Г.Ю. Толкачевым, Б.И. Корженевским, Н.В. Колومیицевым.

Note: 1 – HMs sorbed in an exchange complex; 2 – HMs sorbed on iron and manganese hydroxides; 3 – HMs sorbed on carbonates.

Source: compiled by G.Yu. Tolkahev, B.I. Korzhenevskiy, N.V. Kolomiitsev.

¹ Руководство по эксплуатации. Спектрометр атомно-адсорбционный «КВАНТ–Z.ЭТА–Т». М.: Научно-производственная фирма «Кортэк», 2006. 20 с.

Отметим, что все подвижные формы существования ТМ в ДО могут участвовать в процессах массопереноса в системе «твёрдая фаза – поровый раствор – вода». Возможный вынос микроэлементов из ДО не будет превышать их суммарные концентрации в подвижных соединениях. Исходя из полученных данных в настоящее время потенциальный вынос ТМ из отложений в водную толщу не является значительным, и опасности вторичного загрязнения водных масс исследуемыми элементами не существует.

Валовое накопление микроэлементов в ДО оценивалось с помощью «индекса геоаккумуляции» (I-geo) [8], который характеризует относительную кратность загрязнения ДО относительно естественного фона по [9] либо по [10] во фракциях <0,020 мм. ДО подразделяются на классы качества по каждому ТМ и As. Фоновое значение микроэлемента используется с полуторакратным запасом [8]. Более полувека система классифицирования загрязнённости ДО по Г. Мюллеру широко используется в Германии, Чехии и других странах [11]. Индекс геоаккумуляции (I-geo) также успешно используется для оценки степени загрязнённости почв ТМ.

На основании данной системы была разработана и применена методика оценки техногенной нагрузки на водные экосистемы [3; 12], что позволяет оценить уровень потенциальной и реальной опасности загрязнения водоемов (табл. 2). В настоящее время в России предложена иерархическая структура четырех уровней, разработанная для экосистем [13; 14]. Длительные исследования геоэкологических характеристик водных объектов в бассейнах рек европейской части показывают достаточно высокую корреляцию между техногенной нагрузкой и загрязненностью ДО.

Таблица 2. Оценка уровня загрязнения ДО по игео-классам и техногенной нагрузки на водные экосистемы

Table 2. Assessment of the level of pollution of sediments by geo-classes and technogenic load on aquatic ecosystems

I-geo	Уровень загрязнения ТМ по [8]	Техногенная нагрузка на водные экосистемы по [11]	
0	Незагрязненный	I	Слабая (малоопасная)
1	Незагрязненный до умеренно загрязненного		
2	Умеренно загрязненный	II	Умеренная (умеренно опасная)
3	Среднезагрязненный		
4	Сильно загрязненный	III	Сильная (опасная)
5	Сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного		
6	Чрезмерно загрязненный	IV	Чрезмерная (чрезвычайно опасная)

Источник: составлено Г.Ю. Толкачевым, Б.И. Корженевским, Н.В. Коломийцевым.

Source: compiled by G.Yu. Tolkachev, B.I. Korzhenevskiy, N.V. Kolomiytsev.

Использование комплекта моноэлементных карт для оценки комплексных геохимических аномалий в ДО водных объектов представляется весьма сложным. Для обоснования водоохраных мероприятий необходима интегральная информация о состоянии ДО водных объектов. Для оценки комплексного загрязнения ДО предлагается использовать суммарный показатель

токсического загрязнения (СПТЗ), разработанный для оценки загрязнения ТМ снежного покрова и городских почв [15]. СПТЗ проявляет существенную зависимость от числа учитываемых элементов. При обследовании той или иной территории их количество должно быть постоянным. Для оценки техногенной нагрузки по СПТЗ на водные объекты в каждой точке следует учитывать загрязнение ДО семью ТМ (Cd, Pb, Zn, Hg, Cr, Cu, Ni) и мышьяком [1].

Обсуждение результатов

Ранжирование территории по различным таксонам позволяет достаточно четко определить участки разного уровня при исследовании загрязнений и определять последовательность действий, необходимых при изучении загрязнений ДО ТМ. Выбор пунктов отбора проб и частота повторяемости отбора позволит минимизировать затраты на эти операции [3; 5].

При обосновании критических нагрузок на водные объекты первым и важнейшим этапом является исследование форм нахождения, физико-химической миграции, трансформации и взаимодействия изучаемых загрязняющих веществ в системе «источник загрязнения – водосбор – водный объект» с учетом природной специфики исследуемой территории [5]. Предыдущими и настоящими исследованиями установлено, что наибольшую информацию о содержании микроэлементов в ДО водоемов предоставляет определение их подвижных форм нахождения, или существования, в означенных отложениях. Информация об именно подвижных формах существования микроэлементов, в свою очередь, позволяет оценить возможности самоочищения и вторичного загрязнения водных масс водоемов. Мы использовали методику А. Тессье, по которой определяются подвижные формы существования ТМ, участвующие в процессах массообмена в системе «вода – ДО». Данный методический подход, в совокупности с определением физико-химических параметров, позволяет достаточно достоверно определять возможность вторичного загрязнения в определенном районе водного объекта. Недостатком подхода является его ресурсо- и трудоемкость, в связи с чем целесообразно применять его точечно в районах с потенциальным либо реальным уровнем загрязнения отложений от среднего и выше. Изначально уровень загрязнения отложений определяется за счет валового содержания в них металлов, и в зависимости от класса загрязнения далее возможно более подробное определение подвижных форм искомых элементов.

Комбинирование перечисленных методов – ранжирование территории, ранговая оценочная структура и определение форм существования элементов – позволяет выделять и наносить на карты водоемов три вида загрязнения их районов, определяемых по содержанию ТМ в их отложениях.

К первому виду загрязнений могут относиться районы с потенциальной опасностью вторичного загрязнения: это районы с уровнем загрязнения отложений металлами по системе игео-классов и СПТЗ от среднего и выше,

с высокой долей подвижных форм существования данных металлов, с неблагоприятной гидрохимической обстановкой – низкое содержание кислорода и рН ниже нейтрального. Даже при незначительном ухудшении гидрохимической обстановки, а также механических процессах взмучивания и перемешивания отложения становятся источником существенного вторичного загрязнения. В приведенном исследовании к такому виду района можно отнести участок реки Клязьмы от г. Щёлково, где расположены очистные сооружения и производится сброс сточных вод, до пос. Лосино-Петровский. При этом, как уже отмечалось, по сравнению с предыдущими исследованиями протяженность района существенно сократилась. К этому же виду можно отнести участок реки Москва от г. Москвы до г. Бронницы с рекой Пахрой.

Ко второму виду можно отнести районы с так называемой «равновесной» системой массообмена между водой и ДО – одновременный разнонаправленный процесс, металлы переходят из водной массы в подвижные формы отложений и обратно. Уровень загрязнения любого из элементов не превышает умеренно загрязненного либо среднего. При этом не заметно преимущества одного из этих процессов, однако незначительно преобладает процесс самоочищения, т. е. переход из воды в отложения. При сохраняющейся физико-химической и гидрохимической обстановке данная система не представляет опасности вторичного загрязнения и может функционировать практически неограниченное время. К таким районам можно отнести плёс «Городской» озера Селигер, практически всё Ивановское и Угличское водохранилища, а также участок реки Клязьмы от г. Ногинска до г. Владимира, река Ока выше и ниже впадения р. Москвы, ряд притоков рек Москвы и Клязьмы.

К третьему виду относятся районы, в которых ДО загрязнены слабо либо на фоновом уровне, и способствуют самоочищению водоема – в первую очередь в силу своей удаленности от источников загрязнения, а также в силу значительного количества своей сорбирующей фракции. К таким районам можно отнести участки реки Клязьма, начиная от д. Пенкино (30 км ниже г. Владимир) до устья, и ее притока реки Пекша от г. Кольчугино также до устья. На данных участках в отложениях по мере удаления от источников загрязнения снижаются уровни содержания металлов – происходит нейтрализация техногенной нагрузки. Также к данному виду можно отнести Шошинский плёс Ивановского водохранилища, который фактически нейтрализует загрязнение от двух автомобильных и железнодорожного мостов, накапливая их в своих отложениях.

В соответствии с ранжированием территории по таксонам районы первого вида загрязнений могут быть отнесены к участкам спецнаблюдений или IV категории, на которых проводится регулярный отбор проб как на валовое содержание ТМ, так и на определение их подвижных форм. С целью предупреждения вторичного загрязнения также необходимо регулярно отслеживать и гидрохимическую обстановку – измерение растворенного кислорода

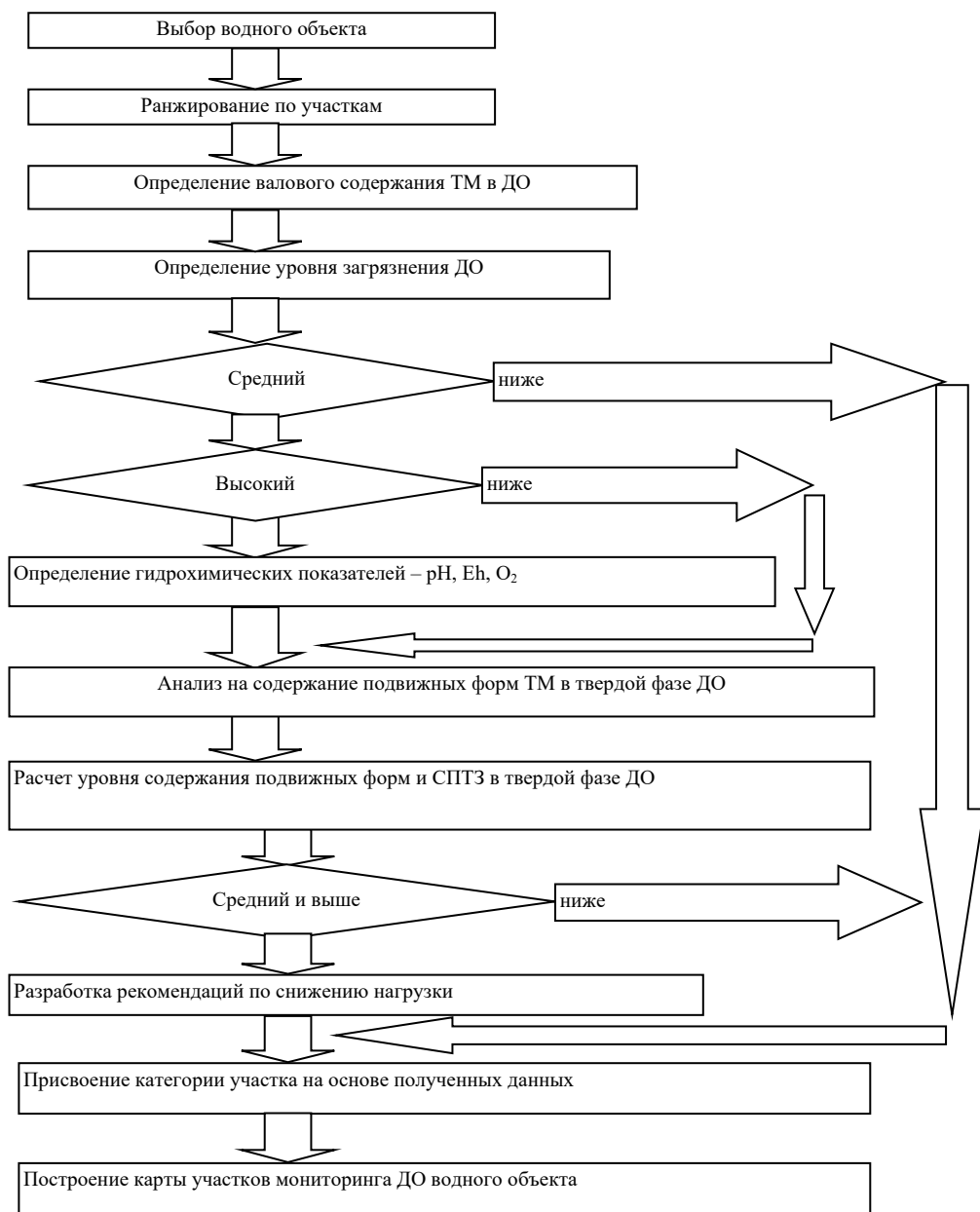
и рН в придонном слое воды, рН и Eh в отложениях. По результатам исследований представляется возможным давать рекомендации по снижению техногенной нагрузки на водоем и улучшению геоэкологической ситуации. Вместе с тем данные районы представляют собой интерес для дальнейшего изучения процессов миграции и трансформации ТМ в системе «вода – ДО».

Районы второго вида загрязнений могут быть отнесены к участкам I и II категории, на которых исследования валового загрязнения отложений проводятся приблизительно каждые 3–5 лет – в зависимости от близости источников загрязнения и городских застроек. Исследования подвижных форм элементов в отложениях осуществляются приблизительно каждые 10 лет. В первую очередь данный подход применим к водоемам – источникам водоснабжения, таким как Иваньковское водохранилище и озеро Селигер. По результатам исследований составляются карты загрязнения, и в зависимости от результатов могут даваться рекомендации по недопущению увеличения техногенной нагрузки.

Районы третьего вида загрязнений могут быть отнесены к участкам III категории, или условно чистым. Исследования целесообразно проводить приблизительно каждые 10 лет на валовые содержания ТМ. Поскольку данные районы способствуют самоочищению водной массы всего остального водоема и нейтрализации техногенной нагрузки, рекомендацией может быть сохранение уже существующего *status quo* с минимизацией экспансии хозяйственной деятельности человека.

На основании подведенных итогов представляется возможным составить соответствующий алгоритм (последовательность действий), выполнение которого позволяет получить результат. Этот термин широко применяется в информатике и цифровых технологиях, где под ним понимают инструкции для решения задачи наиболее эффективным способом. В настоящее время под данным термином подразумеваются любые последовательности действий, которые можно четко описать и разделить на простые шаги и которые приводят к достижению цели. Алгоритм может быть записан в виде текстового описания, блок-схемы, псевдокода или других формализованных представлений, он позволяет исследователю оперативно принимать ситуационные (экспертные) решения. В алгоритме есть место для условий, циклов и других нелинейных действий.

На рисунке представлен алгоритм организации полевых и лабораторных исследований, с определением первичной информации – обследование ДО водоемов и ранжирование участков по таксонам. Данный алгоритм позволяет с наименьшими затратами и наибольшей эффективностью проводить мониторинг различных водных систем на загрязнение ТМ. При слабом загрязнении ДО определение активных форм микроэлементов не проводится.



Алгоритм полевых и лабораторных исследований и ранжирования участков по таксонам

Источник: составлено Г.Ю. Толкачевым, Б.И. Корженевским, Н.В. Коломийцевым.

Algorithm for field and laboratory studies and ranking of sites by taxa

Source: compiled by G.Yu. Tolkachev, B.I. Korzhenevskiy, N.V. Kolomiytsev.

Выводы

1. В соответствии с ранжированием территории по таксонам районы первого вида загрязнений могут быть отнесены к участкам спецнаблюдений, или IV категории, на которых проводится регулярный отбор проб как на валовое

содержание ТМ, так и на определение их подвижных форм. С целью предупреждения вторичного загрязнения также необходимо регулярно отслеживать и гидрохимическую обстановку – измерение растворенного кислорода и рН в придонном слое воды, рН и Eh в отложениях. По результатам исследований представляется возможным давать рекомендации по снижению техногенной нагрузки на водоем и улучшению геоэкологической ситуации. Вместе с тем данные районы представляют собой интерес для дальнейшего изучения процессов миграции и трансформации ТМ в системе «вода – ДО».

2. Районы второго вида загрязнений могут быть отнесены к участкам I и II категории, на которых исследования валового загрязнения отложений проводятся приблизительно каждые 3–5 лет – в зависимости от близости источников загрязнения и городских застроек. Исследования подвижных форм элементов в отложениях производятся приблизительно каждые 10 лет. В первую очередь данный подход применим к водоемам – источникам водоснабжения. По результатам исследований составляются карты загрязнения, в зависимости от результатов могут даваться рекомендации по недопущению увеличения техногенной нагрузки.

3. Районы третьего вида загрязнений могут быть отнесены к участкам III категории, или условно чистым. Исследования целесообразно проводить приблизительно каждые 10 лет на валовые содержания ТМ. Поскольку данные районы способствуют самоочищению водной массы всего остального водоема и нейтрализации техногенной нагрузки, единственной рекомендацией может быть сохранение уже существующего порядка вещей, или status quo, с минимизацией экспансии хозяйственной деятельности человека.

4. По итогам проведенных исследований представляется возможным составить алгоритм организации полевых и лабораторных исследований, с определением первичной информации – обследование ДО водоемов и ранжирование участков по таксонам. Данный алгоритм позволяет с наименьшими затратами и наибольшей эффективностью проводить мониторинг различных водных систем на загрязнение ТМ, определять геоэкологическое состояние водных объектов и формировать отчетные материалы.

Список литературы

- [1] Коломийцев Н.В., Ильина Т.А. Интегральные критерии для оценки экологического состояния донных отложений водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство. 2009. № 5. С. 39–42.
- [2] Коломийцев Н.В., Райнин В.Е., Ильина Т.А., Зимина-Шалдыбина Л.Б., Мюллер Г. Исследования загрязненности донных отложений как основа мониторинга состояния водотоков // Мелиорация и водное хозяйство. 2001. № 3. С. 11–15.
- [3] Техногенное загрязнение речных экосистем / Новосельцев В.Н. и др.; под ред. В.Е. Райнина, Г.Н. Виноградовой. М.: Научный мир, 2002. 140 с.
- [4] Mueller G., Ottenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 μM or <2 μM ? // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. 2001. Vol. 371, no. 5. P. 637–642.

- [5] Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А., Коломийцев Н.В. Основные принципы мониторинга загрязнения большой реки (на примере бассейна реки Волги) // Строймного. 2017. № 2 (7). С. 1–7.
- [6] Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // *Analytical chemistry*. 1979. Vol. 51, no. 7. P. 844–851.
- [7] Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведение. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с.
- [8] Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veraenderungen seit 1971 // *Umschau* 79. 1979. H. 24. S. 778–783.
- [9] Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.
- [10] Turekian K.K., Wedepohl K.H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust // *Geological Society of America, Bulletin*. 1961. Vol. 72. P. 175–192.
- [11] Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Гетьман Е.Н. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.
- [12] Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / под ред. А.С. Керженцева, Р. Майснера. М.: Наука, 2006. 223 с.
- [13] Виноградов Б.В., Орлов В.А., Снакин В.В. Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России // ИЛ РАН. Сер. 5. География. 1993. № 5. С. 77–79.
- [14] Экологические функции литосферы / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
- [15] Большаков В.А. Методические рекомендации по оценке загрязнения городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами. М.: ВНИИП им. Докучаева, 1999. 32 с.

References

- [1] Kolomiitsev NV, Il'yina TA. Integral criteria for assessing the ecological state of sediments of water bodies. *Melioration and water management*. 2009;(5):39-42. (In Russ.)
- [2] Kolomiitsev NV, Rainin VE, Il'yina TA, Zimina-Shaldybyina LB, Mueller G. Studies of sediment pollution as a basis for monitoring the state of watercourses. *Melioration and water management*. 2001;(3):11–15. (In Russ.)
- [3] Novoseltsev VN et al. *Technogenic pollution of river ecosystems*. V.E. Rainin and G.N. Vinogradova (eds.). Moscow: Scientific world; 2002. 140 p. (In Russ.)
- [4] Mueller G, Ottenstein R, Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µM or <2 µM? *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. 2001;371(5):637–642.
- [5] Korzhenevskiy BI, Tolkachev GYu, Il'yina TA, Kolomiitsev NV. Basic principles of pollution monitoring of a large river (on the example of the Volga River basin). *Stroy mnogo*. 2017;(2):1–7. (In Russ.)
- [6] Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical chemistry*. 1979;51(7):844–851.
- [7] Dmitriev EA. *Mathematical statistics in soil science*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1995. 320 p. (In Russ.)
- [8] Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veraenderungen seit 1971. *Umschau* 79. 1979;24:778–783. (In German)
- [9] Vinogradov AP. *Geochemistry of rare and scattered elements in soils*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1957. 235 p. (In Russ.)

- [10] Turekian KK, Wedepohl KH. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America, Bulletin*. 1961;72:175–192.
- [11] Kolomiytsev NV, Korzhenevskiy BI, Il'yina TA, Get'man EN. Assessment of anthropogenic load on water bodies by pollution of sediments. *Melioration and water management*. 2015;(6);15-19. (In Russ.)
- [12] Kerzhentsev AS, Meisner R (eds.). *Modeling of erosion processes in the territory of a small catchment area*. Moscow: Nauka; 2006. 223 p. (In Russ.)
- [13] Vinogradov BV, Orlov VA, Snakin VV. Biotic criteria for the allocation of zones of ecological disaster in Russia. *IL RAS. Ser. 5. Geography*. 1993;(5):77-79. (In Russ.)
- [14] Trofimov VT (ed.). *Ecological functions of the lithosphere*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2000. 432 p. (In Russ.)
- [15] Bolshakov VA. *Methodological recommendations for the assessment of pollution of urban soils and snow cover with heavy metals*. Moscow: VNIIMP named Dokuchaev; 1999. 32 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Толкачев Глеб Юрьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Российская Федерация, 127434, Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2. ORCID: 0000-0001-6983-7106; SPIN-код: 7258-6870; AuthorID: 70414. E-mail: k-26@yandex.ru

Корженевский Борис Игоревич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Российская Федерация, 127434, Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2. ORCID: 0000-0001-7663-9677; Scopus: 57195526993; SPIN-код: 4475-8455; AuthorID: 350982. E-mail: 542609@list.ru

Коломийцев Николай Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Российская Федерация, 127434, Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2. ORCID: 0000-0001-8169-7644; SPIN-код: 6298-6146; AuthorID: 546333. E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru

Bio notes:

Gleb Yu. Tolkachev, Dr. in Geography, Senior Researcher, Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 44, bldg 2, B. Akademicheskaya St, Moscow, 127434, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6983-7106; SPIN-code: 7258-6870; AuthorID: 70414. E-mail: k-26@yandex.ru

Boris I. Korzhenevskiy, Dr. in Geology, Senior Researcher, Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 44, bldg 2, B. Akademicheskaya St, Moscow, 127434, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7663-9677; Scopus: 57195526993; SPIN-code: 4475-8455; AuthorID: 350982. E-mail: 542609@list.ru

Nikolay V. Kolomiytsev, Dr. in Geology, Leading Researcher, Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 44, bldg 2, B. Akademicheskaya St, Moscow, 127434, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8169-7644; SPIN-code: 6298-6146; Author ID: 546333. E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru