

Самоочищение водных объектов урбанизированных территорий (на примере реки Дачная)

М.В. Шмакова¹  , Д.И. Исаев² 

 m-shmakova@yandex.ru

¹Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Состояние донных отложений служит интегральным индикатором техногенной нагрузки на водный объект и позволяет выявить динамику загрязнения за длительный период. Данная работа посвящена анализу степени загрязненности донных отложений и оценке самоочищающей способности р. Дачной, протекающей по территории Санкт-Петербурга. **Методы.** Исследованы пробы донного грунта р. Дачная на содержание тяжелых металлов по отношению к региональным нормативам. Проведен анализ комплексных показателей степени загрязненности донных отложений. **Результаты.** Показатели анализа проб донных отложений р. Дачная (содержание кадмия, никеля, хрома, свинца, цинка, меди, мышьяка, ртути) были сопоставлены с региональными нормативами, фоновыми концентрациями, индексом геоаккумуляции и показали значительное превышение содержания тяжелых металлов по всем критериям качества. Установлено, что невыраженные скорости реки и, как следствие, замедленный водообмен в озеровидных расширениях русла приводят к накоплению тяжелых металлов. Однако связь содержания повышенных концентраций тяжелых металлов с возможными источниками загрязнения в виде объектов инфраструктуры, расположенных в непосредственной близости от водотока, не выявлена. Анализ динамики содержания тяжелых металлов в донных отложениях вдоль исследуемого водотока показал отсутствие процессов самоочищения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: р. Дачная, загрязнение, водоток, урбанизированный водосбор, донные отложения, тяжелые металлы.

Для цитирования: Шмакова М.В., Исаев Д.И. Самоочищение водных объектов урбанизированных территорий (на примере реки Дачная) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 39–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-39-50.

Дата поступления 27.04.2024.

SELF-PURIFICATION OF WATER BOIES ON URBANIZED TERRITORIES (WITH THE DACHNAYA RIVER AS AN EXAMPLE)

Marina V. Shmakova¹  , Dmitriy I. Isaev² 

 m-shmakova@yandex.ru

¹Institute of Limnology RAS, Saint-Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The bottom sediments' state is an integral indicator of the technogenic load upon the given water body and enables to reveal the pollution dynamics over a long time period.

© Шмакова М.В., Исаев Д.И., 2024

This work is devoted to the analysis of the degree of contamination of bottom sediments and the assessment of the self-cleaning ability of the Dachnaya River flowing in the territory of St. Petersburg. **Methods.** We have studied the samples of the Dachnaya River bottom soil for the heavy metals' content in terms of their comparison with the regionally adopted norms. Analysis of the bottom sediments' pollution integrated indicators has been performed as well. **Results.** The results of the analysis of sediment samples on the river (cadmium, nickel, chromium, lead, zinc, copper, arsenic, mercury) They were compared with regional standards, background concentrations, and the geoaccumulation index and showed a significant excess of heavy metal content according to all these quality criteria. At the same time, the unexpressed speeds of the river and, as a result, the slow water exchange in the lake-like extensions of the riverbed leads to the accumulation of heavy metals. However, the connection of the content of elevated concentrations of heavy metals with possible sources of pollution in the form of infrastructure facilities located in the immediate vicinity of the watercourse has not been revealed. Also, an analysis of the dynamics of heavy metal content in bottom sediments along the studied watercourse showed the absence of self-purification processes.

Keywords: pollution, watercourse, urbanized catchment area, sediments, heavy metals

For citation: Shmakova M.V., Isaev D.I. Self-purification of water bodies on urbanized territories (with the Dachnaya River as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management.* 2024. No. 5. P. 39–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-39-50.

Received 27.04.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения рассматриваются как интегральный индикатор техногенной нагрузки на водный объект [1]. Их состояние позволяет проследить динамику загрязнения за длительный период техногенного воздействия. Тяжелые металлы (ТМ) относятся к загрязняющим веществам, снижение содержания которых в водных объектах может происходить за счет физических процессов массопереноса, сорбции и биоаккумуляции, физико-химических процессов комплексообразования [2–6]. Под воздействием физико-химических факторов в водных объектах происходит распределение ТМ между компонентами (вода, донные отложения) и, как следствие этого, могут наблюдаться процессы, которые можно отнести к процессам самоочищения.

Самоочищение вод – это восстановление их природных свойств в реках, озерах и других водных объектах, происходящее естественным путем в результате протекания взаимосвязанных физико-химических, биохимических и других процессов (турбулентная диффузия, окисление, сорбция, адсорбция и т. д.). Способность рек и озер к самоочищению находится в тесной зависимости от многих природных факторов. К числу таких факторов следует отнести: биологические – сложные процессы взаимодействия водных растительных организмов с поступающими стоками; гидрологические – разбавление и смешивание попавших загрязнений с основной массой воды; физические – влияние солнечной радиации и температуры; механические – осаждение взвешенных частиц; химические – превращение органических веществ в минеральные, т. е. минерализация.

В настоящее время ПДК для донных отложений не установлены и при оценке уровня загрязнения используют фоновые значения, кларки в породах, ПДК в почвах и другие геохимические показатели. Однако общим недостатком для

всех показателей является отсутствие особенностей гидрохимической трансформации загрязняющих веществ в системе «вода – наносы – донные отложения». Например, для определения степени загрязнения донных отложений тяжелыми металлами в Германии и других странах используют индексы геоаккумуляции I_{Geo} по Г. Мюллеру (табл. 1) [7–9], которые определяются на основании уравнения:

$$I_{Geo} = \ln_2(C/1,5C_{фон}), \quad (1)$$

где C – измеренная концентрация элемента в донных отложениях;

1,5 – коэффициент учета вариаций природных концентраций элемента;

$C_{фон}$ – геохимическая фоновая концентрация элемента (определяется по данным специальных исследований с учетом региональных особенностей рассеивания элемента).

Таблица 1. Оценка уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами [7]

Table 1. Assessment of the bottom sediments pollution level with heavy metals [7]

Значение индекса геоаккумуляции	Классы геоаккумуляции	Уровень загрязненности донных отложений (ДО) тяжелыми металлами
> 0	0	Практически незагрязненные донные отложения
> 0–1	1	Незагрязненные до умеренно загрязненного донные отложения
> 1–2	2	Умеренно загрязненные донные отложения
> 2–3	3	Средне загрязненные донные отложения
> 3–4	4	Сильно загрязненные донные отложения
> 4–5	5	Сильно загрязненные до чрезмерной загрязненности донные отложения
> 5	6	Чрезмерно загрязненные донные отложения

Для оценки качества донных отложений в исследуемых водных объектах можно использовать индекс загрязненности донных отложений (ИЗДО):

$$\text{ИЗДО} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}, \quad (2)$$

где n – число использованных показателей;

C_i – фактическое содержание i -ого загрязняющего вещества, мг/л;

ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -ого вещества.

Для оценки степени загрязнения донных отложений тяжелыми металлами также используется индекс нагрузки загрязнения (PLI) [10], коэффициент загрязнения CF , $K3$ – показатель комплексного загрязнения. Значение CF отслеживает обогащение тяжелых металлов в осадке за определенный период.

Значение $CF \geq 6$ означает высокое загрязнение, $3 \leq CF < 6$ является значительным, $1 \leq CF < 3$ – умеренным, а $CF < 1$ показывает низкий уровень загрязнения:

$$PLI = \left(\sum_{i=1}^n CF_i \right)^{1/n}$$

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{\text{фон}}} \quad (3)$$

$$K3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CF_i,$$

где i – индекс показателя; n – количество показателей.

В России утверждены нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, содержащие четыре класса загрязненности¹ (табл. 2). Этот документ является региональным и разработан в рамках российско-голландского сотрудничества по программе PSO 95/RF/3/1 в 1996 г.

Таблица 2. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, содержащие четыре класса загрязненности

Table 2. Norms and criteria for assessing the contamination of bottom sediments in the water bodies of St. Petersburg, containing four pollution classes

Загрязняющее вещество	Целевой уровень, мг/кг	Предельный уровень, мг/кг	Проверочный уровень, мг/кг	Уровень, требующий вмешательства, мг/кг
Кадмий (Cd)	0,8	2	7,5	12
Ртуть (Hg)	0,3	0,5	1,6	10
Медь (Cu)	35	35	90	190
Никель (Ni)	35	35	45	210
Свинец (Pb)	85	530	530	530
Цинк (Zn)	140	480	720	720
Хром (Cr)	100	380	380	380
Мышьяк (As)	29	55	55	55

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Дачная протекает на юго-западе Петербурга. До XVIII в. она брала свой исток в болотистой местности севернее Волхонского шоссе и Койровских деревень. Строительство Лиговского канала перерезало русло реки. Изначально

¹ Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив, разработанный в рамках российско-голландского сотрудничества по программе PSO 95/RF/3/1. СПб., 1996. 20 с.

была известна как Попов ручей или Поповка, в XX в. получила название по местности Дачное. В 1960-х годах в ходе массового жилищного строительства был засыпан нижний участок русла к северу от Ленинского проспекта. Верховья р. Дачная канализованы и используются в мелиоративных целях.

Река Дачная протекает в меридиональном направлении в районе проспекта Ветеранов в юго-западной части Санкт-Петербурга, ее длина составляет 6,3 км. Ширина открытой части реки меняется от относительно небольших значений в русловой части (5–15 м) до 60 м у Шереметевского сквера. Глубины исследуемого участка реки меняются от 2,75 м (участок пр. Народного Ополчения – пр. Ветеранов) до 0,4–1,0 м (пр. Ветеранов – Дачный) и далее постепенно увеличиваются до 2,2 м в районе Ленинского проспекта. Река разделена в своем течении дамбами-путепроводами на четыре неравные ветви, течение в которых затруднено. Берега земляные, высотой до 2–4 м, уклонами 20–50°, поросли травой, редкими деревьями, у уреза воды часто встречаются заросли тростника. Местами склоны реки искусственно выровнены с уклонами 40–50°. Наблюдаются слабые оползневые явления. На берегах р. Дачной имеется несколько бетонных водосливных труб и колодцев диаметром около 50 см. Донные отложения водотока представлены несортированным грунтом и крупной опесачаненной пылью.

Химический состав донных отложений р. Дачная

В исследуемом водотоке отобрано 30 образцов донного грунта, которые исследованы на содержание тяжелых металлов – меди, свинца, никеля, хрома, цинка, кадмия, мышьяка, ртути (рис. 1). Следует отметить повышенные значения концентраций практически по всем исследуемым показателям. Однако, согласно приведенным в работе [11] результатам исследования, содержания тяжелых металлов в донных отложениях рек северо-западного региона, полученные в результате анализа концентрации, соответствуют или незначительно превышают фоновые значения. Выявлена пространственная неоднородность, которая не может полагаться генетическим химическим составом донного грунта, а определенно имеет антропогенную природу. Наибольшее суммарное количество металлов наблюдается в илистых донных отложениях и находится в диапазоне 256–565 мг/кг, за исключением образца Дачная-10 (20 м выше по течению, поворот на прямое русло к Шереметьевскому мосту) – 61 мг/кг.

Значительно меньше металлов обнаружено в песчаных донных отложениях – 112–155 мг/кг. В донных отложениях, сложенных разнородным илистым песком (63 % образцов), количество металлов находится в диапазоне от 119 до 256 мг/кг, за исключением станций отбора Дачная-23 (420 мг/кг) и Дачная-6, Дачная-14, Дачная-15 – (16–52) мг/кг. При этом аккумуляция тяжелых металлов увеличивается в ряду: песок < илистый песок < ил песчаный. Анализ единичных показателей превышения измеренных концентраций над значениями ПДК показал, что наибольшие превышения по всем станциям отбора проб приходятся на цинк. Вместе с тем, анализ содержания тяжелых металлов в донных осадках по отношению к региональным нормативам¹ выявил отсутствие загрязнения никелем, кадмием, свинцом, хромом и мышьяком на всех станциях.

Анализ превышения измеренных концентраций тяжелых металлов над фоном [11] показал существенные превышения содержания ртути в донных отложениях для всех станций отбора в десятки и сотни раз. Устойчивые превышения содержания тяжелых металлов над фоновыми значениями почти для всех станций приходится также на медь и цинк. Сопряженный алгоритмически индекс геоаккумуляции *Igeo* для почти всех показателей и проб соответствовал уровню от «практически незагрязненные донные отложения» до «умеренно загрязненные» и «средне загрязненные». Исключение составил индекс геоаккумуляции для ртути, который показал загрязнение от «умеренного» до «чрезмерного».

При анализе комплексных показателей степени загрязненности донных отложений также получен неудовлетворительный результат. Показатель комплексного загрязнения (КЗ) по всем исследуемым элементам показал превышения в 1,5–18 раз над единицей почти для всех станций отбора проб воды. Лишь для станции Дачная-14 коэффициент КЗ не превышал единицу. Индекс *PLI* определил загрязнение от «умеренного» до «чрезвычайно загрязненного» для половины станций. При этом превышение измеренных концентраций над ПДК в среднем для всех исследуемых показателей (ИЗДО) составляет 1,25–2,05 ПДК лишь для семи станций Дачная (2, 3, 5, 7, 20, 21, 23).

Из приведенного выше анализа единичных и комплексных показателей загрязнения можно сделать вывод о том, что по сравнению с фоновыми значениями региональных концентраций имеет место существенный антропогенный вклад в содержание тяжелых металлов в донных отложениях р. Дачной. При этом наиболее значительно превышаемый показатель для всех станций отбора – это ртуть, также почти на всех станциях отбора в пробах превышено содержание меди и цинка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частный водосбор исследуемого участка р. Дачной представлен жилой застройкой и хорошо развитой инфраструктурой. В непосредственной близости от береговой линии расположено 11 медицинских организаций, в т. ч. медицинские лаборатории, две ветеринарные клиники, бензозаправочная станция и две автомайки. Водный объект расположен в пределах территории, ограниченной крупными магистралями – КАД, Дачный пр., пр. Ветеранов, Ленинский пр. и пр. Стачек.

Тяжелые металлы поступают в придорожное пространство как в результате работы автотранспортных средств, так и при истирании дорожного полотна. От истирания автопокрышек в почву поступают алюминий, кобальт, медь, железо, марганец, свинец, никель, фосфор, титан, цинк и другие элементы [12–16]. Подшипники, вкладыши, тормозные масла – источники поступления в окружающую среду меди и цинка [17]. Кадмий попадает в природную среду в результате износа шин и истирания асфальтобетона, никель и хром – продукты износа покрытий кузовов, железо – продукт истирания цилиндров двигателя [17]. Основная масса газовых выбросов оседает в непосредственной близости от автодорог, остальная часть в зависимости от рельефа местности, направления ветра,

типа почвы, растительного покрова, наличия лесозащитных насаждений может распространяться на расстояния до 200 м от полотна дороги. Результатом суммарного действия рассеянных газовых выбросов и тяжелых металлов является изменение биоты придорожных зон. Наземные части растений загрязняются непосредственно из воздуха, через корневую систему и вторично – с поверхности почвы. Наибольшее отрицательное воздействие такого загрязнения наблюдается в стометровой полосе, непосредственно прилегающей к дороге [17].

Повышенное содержание таких тяжелых металлов, как кадмий, ртуть, свинец и хром, также характерно для поступающего с территории автомоек стока. Наличие значительных концентраций этих тяжелых металлов в донных отложениях исследуемого участка русла р. Дачной определяет в качестве основного источника загрязнения именно эти объекты инфраструктуры.

Однако прямой зависимости повышенного содержания тяжелых металлов в донных отложениях от расположения объектов инфраструктуры не наблюдается, тогда как имеет место прямая зависимость концентрации тяжелых металлов от типа донных отложений. Как известно, поверхностная адсорбция тяжелых металлов в значительной степени зависит от их гранулометрического и композиционного состава. Наибольшее количество показателей с повышенными значениями концентраций приходится на илстые отложения, которые характеризуются высокой адсорбционной способностью.

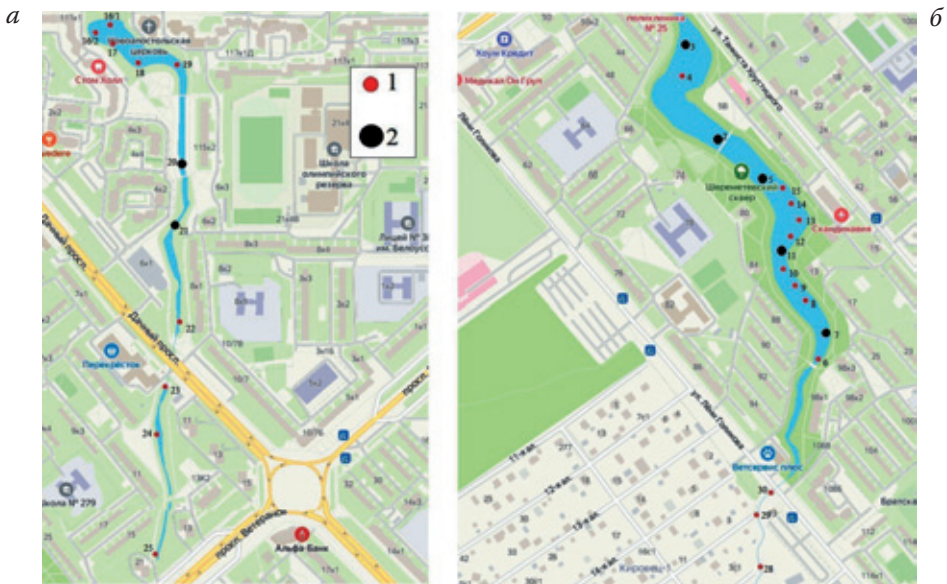


Рис. 1. Карта р. Дачной (а – севернее пр. Ветеранов; б – южнее проспекта Ветеранов) с обозначенными точками пробоотбора: 1 – станции с низким содержанием тяжелых металлов в донных отложениях; 2 – станции с повышенным содержанием тяжелых металлов в донных отложениях.

Fig. 1. The Dachnaya River map (a is north of Veterans Avenue; b is south of Veterans Avenue) with designated sampling points: 1 – stations with a low content of heavy metals in the bottom sediment; 2 – stations with a high content of heavy metals in bottom sediment.

Пространственное распределение тяжелых металлов в донных отложениях не связано с морфометрией русла р. Дачной, поскольку глубина всей исследуемой части акватории примерно одинакова и составляет около двух метров. Также не обнаружены пространственные закономерности распределения концентраций вдоль течения реки. Замедленный водообмен водотока в озеровидных расширениях русла приводит к сосредоточенности наибольших концентраций тяжелых металлов, прежде всего, у объектов инфраструктуры, являющихся возможными источниками загрязнения.

Общая степень самоочищения р. Дачной по отношению к тяжелым металлам рассчитана по формуле:

$$CC = 100 \frac{C_{i-1} - C_i}{C_i}, \quad (4)$$

где CC – степень самоочищения, %;

C – содержание металла в створе i , кг/л [17].

Или в абсолютных единицах:

$$CC' = C_{i-1} - C_i \quad (5)$$

На рис. 2 и рис. 3 приведены динамика изменения концентраций тяжелых металлов по длине р. Дачная и интегральные кривые степени самоочищения реки (в абсолютных единицах). Наибольшие концентрации по хрому, цинку и меди приходятся на среднее и нижнее течение р. Дачной, тогда как по прочим показателям концентрации меняются точно, в зависимости от источника загрязнения.

Анализ степени самоочищения реки вдоль всего исследуемого участка не показал никаких закономерностей, что является следствием высокого фоновое содержания тяжелых металлов в грунтах исследуемого региона, а также свидетельствует об отсутствии процессов самоочищения и прямой связи содержания повышенных концентраций тяжелых металлов в донных отложе-

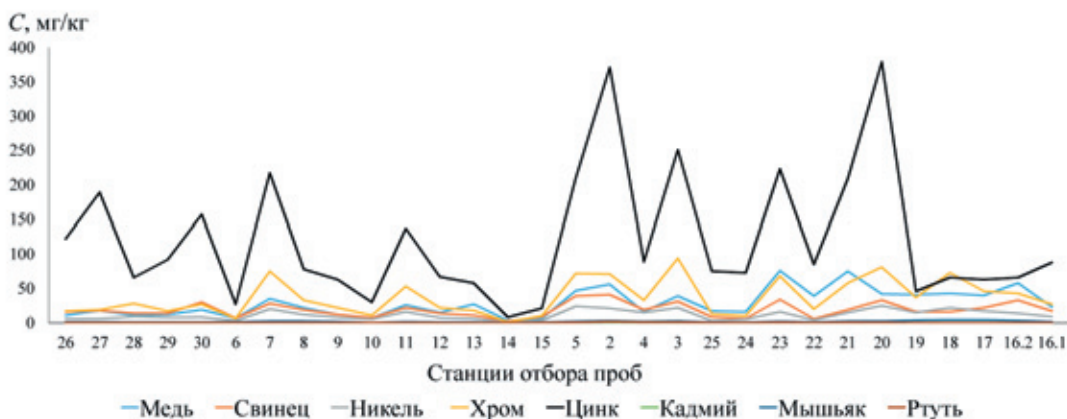


Рис. 2. Динамика изменения концентраций тяжелых металлов по длине р. Дачная
Fig. 2. Dynamics of changes in heavy metal concentrations along the length of the Dachnaya River.



Рис. 3. Интегральные кривые степени самоочищения р. Дачная.
 Fig. 3. Integral curves of the Dachnaya River self-purification degree .

ниях с источниками загрязнения. Последнее объясняется, в первую очередь, относительно неравномерным поступлением загрязняющих веществ в акваторию р. Дачной и ее весьма замедленным водообменом. Все это определяет отсутствие динамики выноса загрязняющих соединений и их аккумуляцию в донных отложениях.

Следует отметить, что сорбционные процессы занимают важное место в самоочищении водных экосистем, перераспределении тяжелых металлов в водных объектах. Миграционную способность тяжелых металлов из донных отложений в воду можно объяснить посредством коэффициента распределения K [18, 19]:

$$\lg K = \frac{C_{\text{ДО}}}{C_{\text{вода}}}, \quad (6)$$

где $C_{\text{ДО}}$ и $C_{\text{вода}}$ – концентрация тяжелых металлов в донных отложениях и в воде соответственно.

Интерпретация $\lg K$ сводится к тому, что чем меньше значение коэффициента распределения, тем интенсивнее миграция металла из донных отложений в воду. Использование коэффициента распределения в сезонной динамике для каждого металла позволяет определить периоды их максимального содержания в воде с предположением о влиянии исследуемых факторов на поступление тяжелых металлов из донных отложений в воду, как следствие этого, на степень самоочищения воды от тяжелых металлов. Однако, в силу отсутствия проб воды на гидрохимический анализ на исследуемом водном объекте, определить физико-химические причины самоочищения р. Дачной в непосредственных местах отбора проб не представляется возможным.

ВЫВОДЫ

Химический состав донных отложений водных объектов является одной из компонент, формирующих качество воды. В водные объекты урбанизиро-

ванных территорий металлы попадают с поверхностными водами и в результате антропогенной деятельности на водосборе. Высокая токсичность ионных форм тяжелых металлов, их биоаккумуляция определяют актуальность изучения процессов миграции и трансформации тяжелых металлов и оценки интенсивности самоочищения водных объектов. При этом донные отложения водотоков с замедленным водообменом, протекающих по урбанизированной территории, являются устойчивой аккумулярующей емкостью для загрязняющих веществ. Адсорбируя тяжелые металлы, донные отложения способствуют самоочищению водной среды, однако при взмучивании донные отложения определяют вторичное загрязнение водного объекта.

На основании проведенных исследований на определенных участках дна р. Дачной выявлено значительное превышение содержания тяжелых металлов по всем критериям качества: региональные нормативы, фоновые концентрации, индекс геоаккумуляции. Повышенная концентрация таких тяжелых металлов, как кадмий, ртуть, свинец и хром, характерна для стока, поступающего преимущественно с антропогенных инфраструктурных объектов, и, прежде всего, с территории автомоек.

Анализ динамики содержания тяжелых металлов в донных отложениях вдоль исследуемого водотока показал отсутствие процессов самоочищения. При этом отмечена прямая зависимость концентрации тяжелых металлов от типа донных отложений. Наибольшее количество показателей с повышенными значениями концентраций приходится на илистые отложения, которые характеризуются высокой адсорбционной способностью.

Исследование степени загрязнения донных отложений малоизученной с гидрологической и гидрохимической точек зрения р. Дачной является первым этапом оценки экологического состояния водотока. Дальнейшее комплексное обследование р. Дачной позволит разработать рекомендации по улучшению качества воды и оздоровлению реки в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веницианов Е.В., Кирпичникова Н.В., Щеголькова Н.М. Разработка интегральных критериев выделения потенциально опасных зон донных отложений водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 27–40. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-3.
2. Forstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Springer-Verlag, 1981. 486 p.
3. Elderfield H., McCaffrey R.J., Luedtke N., Bender M., Truesdale V.W. Chemical diagenesis in Narragansett Bay sediments // American Journal of Science. 1981. Vol. 281. P. 1021–1055.
4. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2002. 236 с.
5. Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.
6. Скурлатов Ю.И., Дука Г.Г., Мизити А.М. Введение в экологическую химию. М.: Высшая школа, 1994. 400 с.
7. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. Veraenderungen seit. 1979. H. 24. P. 778–783.
8. Kowalska J.B., Mazurek R., Gašiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.

9. Nowrouzi M., Pourkhabbaz A. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran // *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2014. Vol. 26. P. 99–105.
10. Islam M.S., Ahmed M.K., Raknuzzaman M., Habibullah-Al-Mamun M., Islam M.K. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country // *Ecology indicator*. 2015. No. 48. P. 282–291.
11. Опекунов А.Ю., Янсон С.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю. Минеральные фазы металлов в техногенных осадках рек Санкт-Петербурга при экстремальном загрязнении // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2020. Т. 66. Вып. 2. С. 267–288.
12. Davydova S. Heavy metals as toxicants in big cities // *Microchemical Journal*. 2005. Vol. 79. P. 133–136.
13. Sharma V., Singh P. Heavy metals pollution and it's effects on environment and human health // *International Journal of Recent Scientific Research*. 2015. Vol. 6. Iss. 12. P. 7752–7755.
14. Веницианов Е.В., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в природных водах: сб. Воды суши: проблемы и решения, отв. ред. М.Г.Хубларян. М.: ИВП РАН, 1994. С. 299–326.
15. Остромогильский А.Х., Петрухин В.А.и др. // Мониторинг фоновое загрязнения природных сред. Вып. 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С.122–147.
16. Петрухин В.А., Бурцева Л.В., Лапенко Л.А., Чичева Т.Б., Виженский В.А., Комарденкова И.В. Фоновое содержание микроэлементов в природных средах по мировым данным // Мониторинг фоновое загрязнения природных сред. Вып. 5. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 4–27.
17. Левкин Н.Д., Лазеба А.В. Распространение тяжелых металлов в зоне движения автотранспорта // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 2014. Вып. 3. С. 9–16.
18. Корнеева Т.В. Геохимия взаимодействия рудничного дренажа с природными водоемами как естественными гидрохимическими барьерами: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2010. 16 с.
19. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в природных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 271 с.

REFERENCES

1. Venetsianov E.V., Kirpichnikova N.V., Shchegolkova N.M. Development of integral criteria for the identification of potentially dangerous zones of bottom sediments of reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 27–40 (In Russ.).
2. Forstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Springer-Verlag, 1981. 486 p.
3. Elderfield H., McCaffrey R.J., Luedtke N., Bender M., Truesdale V.W. Chemical diagenesis in Narragansett Bay sediments. *American Journal of Science*. 1981. Vol. 281. P. 1021–1055.
4. Venetsianov E.V., Lepikhin A.P. Physico-chemical bases of modeling migration and transformation of heavy metals in natural waters. Yekaterinburg: Rosniivkh, 2002. 236 p. (In Russ.).
5. Nikanorov A.M. *Hydrochemistry*. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001. 444 p. (In Russ.).
6. Skurlatov Yu.I., Duka G.G., Miziti A.M. Introduction to environmental chemistry. Moscow: Higher School, 1994. 400 p. (In Russ.).
7. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. *Veraenderungen seit*. 1979. H. 24. P. 778–783.
8. Kowalska J.B., Mazurek R., Gąsiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.
9. Nowrouzi M., Pourkhabbaz A. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2014. Vol. 26. P. 99–105.
10. Islam M.S., Ahmed M.K., Raknuzzaman M., Habibullah-Al-Mamun M., Islam M.K. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecology indicator*. 2015. No 48. P. 282–291.
11. Opekunov A.Yu., Yanson S.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu. Mineral phases of metals in technogenic sediments of St. Petersburg rivers under extreme pollution. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*, 2020. Vol. 66. Issue. 2. P. 267–288 (In Russ.).

12. Davydova S. Heavy metals as toxicants in big cities. *Microchemical Journal*, 2005. Vol. 79. P. 133–136.
13. Sharma V., Singh P. Heavy metals pollution and it's effects on environment and human health. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2015. Vol. 6. Iss. 12. P. 7752–7755.
14. Venitsianov E.V., Kocharyan A.G. Heavy metals in natural waters. *Land waters: problems and solutions*. Ed. by M.G.Khublaryan. M.: IVP RAS, 1994. P. 299–326 (In Russ.).
15. Ostromogilsky A.H., Petrukhin V.A. and others. In the book: *Monitoring of background pollution of natural environments*. Issue 4. L.: Hydrometeoizdat, 1987. P.122–147 (In Russ.).
16. Petrukhin V.A., Burtseva L.V., Lapenko L.A., Chicheva T.B., Vizhensky V.A., Komardenkova I.V. Background content of trace elements in natural environments according to world data. In the book: *Monitoring of background pollution of natural environments*. Iss. 5. L.: Hydrometeoizdat, 1989. P. 4–27 (In Russ.).
17. Levkin N.D., Lazeba A.V. Distribution of heavy metals in the traffic area. *News of TulsU. Earth Sciences*, 2014. Iss. 3 (In Russ.).
18. Korneeva T.V. *Geochemistry of interaction of mine drainage with natural reservoirs as natural hydrochemical barriers*: Abstract. ... Candidate of Geological Sciences. Novosibirsk, 2010. 16 p. (In Russ.).
19. Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Forms of migration of metals in natural waters*. L.: Hydrometeoizdat, 1986. 271 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Шмакова Марина Валентиновна, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория математических методов моделирования, Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9; ORCID 0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Исаев Дмитрий Игоревич, канд. геогр. наук, заведующий кафедрой водно-технических изысканий, Российский гидрометеорологический университет, Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98; ORCID: 0000-0003-2258-2366; e-mail: 79112541832@yandex.ru

About the authors:

Marina V. Shmakova, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, RAS Institute of Limnology Laboratory of Mathematical Modeling Methods, ul. Sevastyanova, 9, Saint-Petersburg, 196105, Russia; ORCID: 0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Dmitriy I. Isaev, Candidate of Geographical Sciences, Head, Russian State Hydrometeorological University Department of Water Engineering Research, pr. Malookhtinskiy, 98, Saint-Petersburg, 195196, Russia; ORCID: 0000-0003-2258-2366; e-mail:79112541832@yandex.ru