

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-85-99>

УДК 504.455+504.064+556.55

Поступила в редакцию 31.03.2025

Received 31.03.2025

АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА ПО ТЯЖЕЛЫМ МЕТАЛЛАМ НА ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Е. Ю. Дорожко, Ю. Г. Янuta

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Донные отложения представляют собой депонирующую среду, аккумулирующую загрязняющие вещества. Отложения не могут быть классифицированы как почвы или сапропели – из этого следует необходимость подбора метода анализа загрязняющих веществ, присутствие которых может препятствовать их использованию.

В работе в качестве объектов исследования выбраны донные отложения поверхностных водных объектов – р. Лошица (г. Минск), вдхр. Чижовское, р. Титовка (г. Марьина Горка, Минская обл.) и в качестве реперного водного объекта – оз. Сергеевское (аг. п. Сергеевичи, Минская обл.).

В образцах отложений изучали влажность, зольность проб – все пробы отложений обладают высокой влажностью ($W > 50\%$), а зольность меняется от $Ac = 24,24\%$ в оз. Сергеевское до $Ac = 87,62\%$ в р. Лошица. Состав проб исследовали методом элементного анализа с уточнением связей с помощью ИК-спектроскопии – по полученным данным отложения из р. Лошица, вдхр Чижовское и р. Титовка носят минеральный характер образования, а отложениям из оз. Сергеевское присущ естественный характер накопления. Оценка антропогенного влияния на донные отложения проводилась по величине содержания тяжелых металлов – Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Mn с использованием методов экстракционно-фотометрического, атомно-абсорбционной спектроскопии и мокрого озоления для выявления форм тяжелых металлов, связанных с органическим веществом. Антропогенная нагрузка рассчитывалась с помощью геохимического критерия I_{geo} .

Выявлено, что в вдхр. Чижовское наибольшее загрязнение тяжелыми металлами (Cu, Pb, Cr, Ni). Геоаккумуляционный индекс по Cu составил 0,43 (вдхр Чижовское, прибрежная зона), по Pb – 0,31 (вдхр Чижовское, центр), по Cr максимум составил 1,92 (вдхр Чижовское, центр), по Ni максимум составил 1,53 (вдхр Чижовское, центр).

Ключевые слова: донные отложения; водохранилище; река; озеро; тяжелые металлы; геоаккумуляционный индекс; антропогенная нагрузка.

Для цитирования. Дорожко Е. Ю., Янuta Ю. Г. Антропогенная нагрузка по тяжелым металлам на донные отложения поверхностных водных объектов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 85–99.

ANTHROPOGENIC HEAVY METAL LOADING ON THE BOTTOM SEDIMENTS OF SURFACE WATER BODIES

E. Yu. Dorozhko, Yu. G. Yanuta

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Bottom sediment is the material of long-term substance sedimentation under the influence of physical and chemical processes occurring within a water body. Sediments act as indicators of quality and determine the state of the water body, since they are alluvial deposit that accumulate pollutants. Bottom sediments contain heavy metals that may prevent the use of sediment after removal, if their concentrations exceed the permitted limits. Since sediment can't be attributed to any other natural features such as soil or sapropel, it is necessary to identify methods for the analysis of heavy metals specifically in sediments.

Bottom sediments of surface water resources are selected as research objects – the Loshitsa river (Minsk), Reservoir Chizhovsky, the Titovka river (Marjina Horka, Minsk region) and as background water object – Sergeevskoye lake (Sergeyevich agro-town, Minsk region).

Sediment samples were examined for moisture, soiling samples. The composition of the samples was investigated by means of an elemental analysis with a clarification of the bonds by IR spectroscopy. The anthropogenic impact on sediment was assessed according to heavy metal content – Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Mn, using methods of extractometric photometry, atomic absorption spectroscopy and wet ozone to identify heavy metal forms, related to organic matter. Anthropogenic loading was calculated by the geochemical criteria of igeoclasses I_{geo} .

It was found that the most heavy metal pollution (Cu, Pb, Cr, Ni) occurred in reservoir Chizhovsky. Geo-accumulation index for Cu was 0,43 (reservoir Chizhovsky, coastal zone), for Pb – 0,31 (reservoir Chizhovsky, center), for Cr maximum was 1,92 (reservoir Chizhovsky, center), for Ni maximum is 1,53 (reservoir Chizhovsky, center).

Keywords: bottom sediments; reservoir; river; lake; heavy metals; geoaccumulation index; anthropogenic load.

For citation. Dorozhko E. Yu., Yanuta Yu. G. Anthropogenic heavy metal loading on the bottom sediments of surface water bodies. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 85–99.

Введение. Водные ресурсы имеют большое значение для функционирования народного хозяйства Беларуси, обеспечивая водоснабжение, рыболовство и рекреацию. Однако антропогенные источники, включая промышленность и сельское хозяйство, оказывают негативное воздействие на окружающую среду через выбросы в атмосферу, сброс недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы, хранение и захоронение опасных отходов, использование гербицидов и пестицидов в сельском хозяйстве, что приводит к значительному загрязнению водных объектов. Превышение норм по сбросу сточных вод нарушает процессы самоочищения водных объектов, что усугубляет их загрязнение. В 2024 г. в поверхностные водные объекты было сброшено 1120,683 млн м³ сточных вод. Объем сточных вод, сбрасываемых с превышением допустимых норм по химическим и другим веществам, в 2024 г. возрос на 469 тыс. м³ по сравнению с 2023 г. и составил 2,811 млн м³ [1]. В табл. 1 представлены статистические данные поступления загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты [2].

Таблица 1. Поступление загрязняющих веществ со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты, т

Table 1. Inputs of pollutants from sewage discharges to surface water bodies, t

Загрязняющее вещество	Масса загрязняющего вещества, т				
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Хром общий	4	3	3	4	3
Медь	5	5	6	5	3
Цинк	24	25	29	20	17
Свинец	2	1	0,7	0,5	0,1
Никель	3	2	3	4	4
Марганец	3	2	2	3	4

Согласно данным мониторинга поверхностных водных объектов, осуществляющегося в рамках программы Национальной системы мониторинга окружающей среды, большинству исследованных водоемов Беларуси в 2024 г. присвоены 2-й и 3-й классы качества по гидрохимическим показателям. В частности, 73,8 % объектов имеют 2-й класс (хорошее состояние), а 22,8 % – 3-й класс (удовлетворительное состояние).

По данным мониторинга р. Свислочь в 2024 г. был присвоен 5-й класс по гидробиологическим и 3-й класс по гидрохимическим показателям, что указывает на ухудшение состояния водотока, связанное с увеличением антропогенного воздействия на водный объект [1].

Одним из ключевых индикаторов состояния водной экосистемы служат донные отложения (ДО), которые являются депонирующей средой, что позволяет в долгосрочной перспективе оценить антропогенную составляющую воздействия на водный объект.

ДО представляют собой компонент водной экосистемы поверхностного водного объекта, состоящий из осевших твердых и органических частиц, которые образовались и седimentировались на дне в результате физико-химических и биохимических процессов. Эти отложения служат средой, где загрязняющие вещества аккумулируются на протяжении длительного времени [3].

Одной из ключевых проблем водных ресурсов является интенсификация накопления ДО на дне водоемов и водотоков, что приводит к снижению полезного объема водной среды и вторичному загрязнению. Исследования показывают, что ежегодно полезный объем водоема уменьшается на 1 % из-за избытка накопления ДО, влажность которых может достигать 98 % [4].

Наиболее распространенными поллютантами являются тяжелые металлы (ТМ). Они поступают в водный объект в составе сбросов сточных вод промышленных предприятий и выброса твердых частиц промышленных металлообрабатывающих объектов, в результате попадания металлического мусора и смыва с автомагистралей атмосферными осадками, а также смыва пестицидов и гербицидов с сельскохозяйственных полей [5].

Результаты изучения загрязнения ДО водных объектов рассмотрены в работе А. И. Поздняковой: методом спектрального анализа измерено содержание ТМ в ДО и водной растительности, отобранное в водных объектах в зоне наблюдения Белорусской АЭС [6]. В работе Т. И. Дрововозовой

исследован коллектор, по которому отводятся дренажные воды с рисовой оросительной системы в р. Дон методом атомно-абсорбционной спектроскопии по таким металлам, как Fe, Mn, Cu, Pb, Zn [7]. Исследование О. В. Лукашева направлено на детальное опробование ДО р. Свислочь, в результате которого выяснено, что город Минск в настоящее время отличается от других населенных пунктов по загрязнению ДО только в отношении V, Cr, Ni и Cu по сравнению с реками Березинского биосферного заповедника. Типизация пунктов опробования ДО г. Минска по концентрации ТМ выполнена с помощью иерархического кластерного анализа, автор разделил пункты на две группы. К группе А относятся участки отбора с аномальными значениями ряда химических элементов, отличающиеся по степени загрязнения ДО и спектру металлов-загрязнителей. В группу В входят относительно чистые (незагрязненные) участки, которые можно разделить на две подгруппы [8]. Б. И. Корженевский в качестве показателей загрязнения и индикатора техногенной нагрузки на территории рассматривает индексы загрязненности микроэлементами Pb, Cd, Zn, As, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn ДО малых рек, в том числе притоков р. Клязьма, таких как Уча, Воря, Шерна, Киржач, Липня, Колокша, Пекша, Нерль. Полученные значения ранжированы по классификации и геоклассов, и техногенной нагрузки [9]. Л. Н. Рябовой установлено, что геохимическое состояние ДО в водоемах Брестской области находится в основном в удовлетворительном состоянии, степень загрязненности ТМ оценивается как допустимая. Содержание металлов определено с помощью фотометрического метода анализа. На основании проведенного автором анализа и обобщения полученных данных выполнено построение геохимических карт загрязнения ДО с учетом комплексного показателя антропогенного загрязнения [10].

По проведенной оценке в отложениях можно выделить два применяемых метода анализа ТМ – фотометрический и атомно-абсорбционный. Для определения антропогенной нагрузки по ТМ на водный объект применяют геохимические критерии и критерии геоклассов.

ТМ являются специфичными загрязняющими веществами, относящимися к классу консервативных веществ, которые не покидают водные экосистемы, а под воздействием факторов окружающей среды способны изменять форму своего нахождения в ней. Согласно классификации миграционных процессов, ТМ свойственна физико-химическая миграция, обусловленная воздействием физико-химических факторов, к которым относятся pH среды, минерализация воды, температурный режим [11].

ТМ, поступившие в водную среду, немедленно вовлекаются в цепь разнообразных перемещений и превращений под влиянием многочисленных факторов. В водной экосистеме могут наблюдаться следующие процессы: физические (механическое перемешивание, осаждение, адсорбция и десорбция, улетучивание, фотолиз); химические (диссоциации, гидролиз, комплексообразование, окислительно-восстановительные реакции); биологические (поглощение живыми организмами, разрушение и превращение с участием ферментов и метаболитов), геологические (накопление в ДО и породообразование).

Металлы в растворимой фракции могут находиться в виде гидратированных ионов, неорганических и органических соединений и комплексов, в том числе с хелатообразователями и гуминовыми кислотами, присутствующими в природных водах. Основная часть связанного вещества переходит в ДО, в результате чего донные грунты часто содержат необычайно высокие уровни загрязняющих веществ, в то время как их концентрация в воде может быть не повышена.

Степень токсичности ТМ находится в прямой зависимости от прочности связывания их в комплексы, характеризуемой величиной константы устойчивости [12].

В настоящее время для оценки экологического состояния водоемов необходимо проводить комплексный анализ ДО, которые являются долговременными накопителями загрязняющих веществ, поступающих в результате антропогенной деятельности.

Объекты и методы исследований. Объектом исследования являлись ДО, отобранные в поверхностных водных объектах. В качестве водных объектов пробоотбора ДО выбраны р. Лошица (г. Минск), вдхр Чижовское (г. Минск), р. Титовка (г. Марьина Горка, Пуховичский район, Минская область), оз. Сергеевское (аг. Сергеевичи, Пуховичский район, Минская область). В табл. 2 приведены основные морфометрические характеристики выбранных водных объектов [13].

Таблица 2. Морфометрические характеристики водных объектов

Table 2. Morphometric characteristics of water bodies

Водный объект	Длина, км	Ширина, км	Глубина, м
Река Лошица	9,2	0,2	3,4
Река Титовка	33,0	0,05	2,4
Водохранилище Чижовское	4,8	0,8	5,0
Озеро Сергеевичское (Сергеевское)	2,2	2,2	2,9

Места отбора проб ДО представлены на рис. 1. Пробы ДО отбирали с помощью торфяного бура в прибрежной зоне и в зоне наибольшей аккумуляции вещества – самой глубокой точке и самой непроточной зоне.



● – Точка отбора проб отложений

Рис. 1. Места отбора проб донных отложений:
а – река Лошица; б – водохранилище Чижовское; в – река Титовка; г – озеро Сергеевское

Fig. 1. Places of sampling of the bottom sediments:
a – river Loshitsa; b – reservoir Chizhovsky; c – river Titovka; d – lake Sergeyevskoye

Главная водная артерия Минска – р. Свислочь – является частью Вилейско-Минской водной системы, которая была введена в эксплуатацию в 1976 г. с целью более полного обеспечения города водой для промышленности и населения, а также для обводнения и водного благоустройства. Свислочь подвергается высокой антропогенной нагрузке. В ее бассейне 40 предприятий-водопользователей, которые сбрасывают сточные воды непосредственно в водные объекты бассейна [14].

Река Лошица впадает в Свислочь справа, за 1 км до Чижовского водохранилища. В районе ул. Семашко, перед слиянием с р. Мышка, Лошица принимает воды ливневого коллектора Слепянка, который собирает ливневые стоки. Отложения представляют собой песчано-илистую фракцию с характерным нефтяным запахом.

Чижовское водохранилище расположено в юго-восточной части Минска на р. Свислочь, предназначено для нужд технического водоснабжения. Оно испытывает значительное антропогенное воздействие, длительно накапливает отложения на дне. Водохранилище пропускает речные воды из Свислочи и все сточные воды с территории города. Сегодня водохранилище снабжает технической водой Минскую ТЭЦ-3 и 16 предприятий города. ДО водохранилища относятся к песчано-илистой фракции с нефтяным запахом.

Река Титовка берет свое начало от р. Птичья. Она впадает в Свислочь с правого берега. От истока у д. Загай река канализирована. В пределах г. Марьина Горка на Титовке создана группа искусственных водоемов. Антропогенное воздействие на реку оказывается промышленными предприятиями: поступление твердых частиц с газопылевых выбросов предприятий, занимающихся литьем и механической обработкой металла, сброс сточных вод и смыв загрязняющих веществ талыми и дождовыми водами с автомобильных дорог. Отложения представляют собой песчаную фракцию с нефтяным запахом.

Озеро Сергеевичское (Сергеевское) расположено в пределах Минской области, на территории Пуховичского района. Берега озера заболочены, к водоему прилегают разливы, образовавшиеся в котловинах, оставшихся после выемки торфа. ДО представлены илистой фракцией с землистым запахом.

Цвет ДО обусловлен окислительно-восстановительными условиями, содержанием и составом органического вещества, сульфидов, гидроксидов железа и марганца и описывается полутонаами (беловато-серый, темно-серый, желто-серый, черно-серый и др.). Запах ДО зависит от состава аккумулированных веществ и определяется органолептически после отбора проб. Консистенция в значительной мере зависит от наличия в них воды.

Общетехнические показатели объекта исследований определяли согласно [15]. Значения влажности ($W, \%$) находили при температуре $105 \pm 2^\circ\text{C}$ в лабораторном сушильном шкафу SNOL 75/350 до постоянной массы. Определение зольности проводили в тех же тиглях для нахождения значения влажности образца при температуре $500\text{--}600^\circ\text{C}$ в муфельной печи SNOL 8,2/1100.

Элементный состав ДО определяли с помощью универсального элементного анализатора газов CHNS-O,Cl модификации Vario EL cube фирмы ELEMENTAR.

ИК-спектры образцов ДО выявляли на ИК Фурье-спектрометре Shimadzu IRPrestige-2. Метод подготовки пробы ДО для анализа – таблетирование с КBr.

ТМ в составе ДО могут находиться в различных соединениях. С целью дифференциации содержания ТМ в ДО проводили определение валового и подвижного количества ТМ. Пробоподготовка ДО для изучения содержания полютантов включала высушивание, измельчение и растирание навески отложений. Валовые формы ТМ анализировали с помощью экстрагирующего агента – раствора $\text{HNO}_3 : \text{HCl}$, подвижные формы – с помощью $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с pH 4,8.

В качестве приоритетных ТМ были определены Ni, Cu, Pb, Zn, Cr, Mn. Анализировали содержание металлов двумя методами физико-химического анализа – последовательным экстракционно-фотометрическим методом и методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Фотометрическое определение металлов проводили с помощью спиртософтометра СФ-46. Для метода атомно-абсорбционной спектроскопии применяли атомно-абсорбционный спиртософтометр Shimadzu atomic-absorption spectrophotometer AA-7800.

Ионы Cu (II) определяли с помощью метода, основанного на взаимодействии раствора меди с диэтилдитиокарбаматом свинца в среде CCl_4 с образованием желто-коричневого диэтилдитиокарбамата меди, растворимого в слое органического растворителя. Измеряли светопоглощение при длине волны (λ) 430 нм.

Содержание Zn (II) измеряли дитизоновым методом, основанным на образовании окрашенного в красный цвет соединения цинка с дитизоном с дальнейшим извлечением дитизоната цинка в слой CCl_4 (при pH 4,5–4,8) при $\lambda = 540$ нм.

Анализировали содержание Pb (II) плюмбоновым методом, основанном на образовании (при pH 7,0–7,3) соединения свинца с сульфарсазеном, окрашенного в желто-оранжевый цвет. Свинец предварительно экстрагировали дитизоном в CCl_4 (при pH 9,2–9,6). Оптическую плотность раствора комплексного соединения измеряли при $\lambda = 515$ нм.

Cr (VI) определяли по методике, основанной на измерении светопоглощения при $\lambda = 540$ нм окрашенного (красно-фиолетового) комплексного соединения 1,5-дифенилкарбазоната Cr (III).

Ионы Ni (II) анализировали с диметилглиоксимом с образованием комплексного соединения розового цвета. Максимум светопоглощения соответствовал $\lambda = 490$ нм.

Mn (II) определяли каталитическим окислением соединений марганца персульфатом калия до перманганат-ионов при $\lambda = 540$ нм.

Определение форм металла, связанного с органическим веществом, проводили методом мокрого озоления. Навеску образца ДО подвергали озолению в муфельной печи SNOL 8,2/1100 при температуре 700°C с последующим растворением золы в концентрированной HNO_3 [16]. Количество связанных форм металла с органическим веществом рассчитывали как разность между валовыми формами металлов без озоления и валовыми формами, подвергшихся озолению.

Антропогенную нагрузку на ДО по металлам (табл. 3) рассчитывали с помощью геоаккумуляционного индекса (geo-accumulation index), для которого выделяют семь классов (от 0-го до 6-го) с соответствующим уровнем загрязнения (от незагрязненных до критически загрязненных) [17].

Таблица 3. Градация геоаккумуляционного индекса и классификация уровня загрязнения

Table 3. Classification of the geoaccumulation index and pollution level

Значение I_{geo}	Класс I_{geo}	Уровень загрязнения донных отложений
$I_{\text{geo}} < 0$	0	Незагрязненные
$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	1	Умеренно загрязненные (нижний предел)
$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	2	Умеренно загрязненные (верхний предел)
$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	3	Сильно загрязненные
$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	4	Очень сильно загрязненные
$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	5	Экстремально загрязненными
$I_{\text{geo}} > 5$	6	Критически загрязненные

Геоаккумуляционный индекс рассчитывали по формуле

$$I_{\text{geo}} = \frac{\log_2(C_n)}{1,5(B_n)}, \quad (1)$$

где I_{geo} – геоаккумуляционный индекс; C_n – измеренная концентрация ТМ; 1,5 – коэффициент, который минимизирует эффект от возможной вариации фона; B_n – фоновое содержание ТМ.

Результаты и их обсуждение. Отобранные пробы ДО представляют собой различные по свойствам и составу материалы. На месте отбора определили органолептические характеристики отложений. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Органолептические характеристики проб донных отложений

Table 4. Organoleptic characteristics of the bottom sediment samples

Водный объект	Цвет	Запах	Консистенция	Тип отложений
Река Лошица	Черно-серый	Нефтяной	Мягкие	Песчано-илистый
Водохранилище Чижовское	Черный	Нефтяной	Мягкие	Песчано-илистый
Река Титовка	Черный	Нефтяной	Жидкие	Песчаный
Озеро Сергеевское	Черный	Землянистый	Жидкие	Илистый

Нефтяной запах присущ отложениям из р. Лошица, вдхр Чижовское и р. Титовка. Наличие нефтяного запаха свидетельствует о месторасположении водного объекта в черте города – большинство нефтепродуктов поступает в воду в результате смыва с автомобильной дороги атмосферными осадками. Наличие в ДО нефтепродуктов, выявленных с помощью органолептических исследований, может быть связано с поглощением минеральными и органическими примесями нефтепродуктов и последующим осаждением таких агрегатов. Консистенция ДО из р. Титовка и оз. Сергеевское указывает на значительную влажность образцов. Отложениям из р. Лошица и вдхр Чижовское больше присуща мягкая консистенция ввиду большого содержания минеральных включений. Для отложений из р. Лошица и вдхр Чижовское присущ песчано-илистый тип – песок частично покрыт илом, ДО из р. Титовка полностью представлены песком, отложения из оз. Сергеевское – илом.

Важными характеристиками ДО являются влажность и зольность образцов, значения которых содержатся в табл. 5.

Таблица 5. Влажность и зольность отобранных проб донных отложений

Table 5. Humidity and ash-content of the bottom sediment samples

Водный объект	Влажность (W , %)	Зольность (A_c , %)
Река Лошица	54,89	87,62
Водохранилище Чижовское	65,77	83,43
Река Титовка	74,09	82,11
Озеро Сергеевское	91,91	24,23

Наибольшая влажность ($W = 91,91\%$) присуща ДО, отобранным из оз. Сергеевское. Это свидетельствует о том, что состав отложений представлен карбонатными сапропелями. Наименьшую влажность ($W = 54,89\%$) имеют отложения из р. Лошица, что связано с песчаным типом отложений и высокой минерализацией. Отложения рек и вдхр Чижовское имеют высокую зольность ввиду проточности водного объекта и поступления минеральных веществ с берегов и из стока, в то время как отложения из оз. Сергеевское обладают наименьшей зольностью ввиду большого содержания органического вещества.

Результаты элементного состава ДО представлены в табл. 6.

Наиболее богатыми органическим веществом являются отложения из оз. Сергеевское, на что указывает большая доля углерода в их составе. Значительное содержание углерода (до 39,67 %) и азота (до 2,74 %) в ДО озера может свидетельствовать о наличии большого количества органического материала и высокой продуктивности экосистемы. Большой процент содержания кислорода в отложениях рек и водохранилища свидетельствует о содержании в их структуре кислородосодержащих групп – карбоксильных и гидроксильных. Относительное высокое содержание азота в отложениях оз. Сергеевское указывает на значительное содержание амидных и аминогрупп в составе отложений.

В табл. 7 представлены атомные соотношения С : N, H : C и O : C в пробах ДО.

Таблица 6. Элементный состав донных отложений**Table 6. Elemental composition of the bottom sediment samples**

Водный объект	Массовые соотношения, %				Атомные соотношения, %			
	N	C	H	O	N	C	H	O
Река Лошица: прибрежная зона русло	0,35 0,32	5,64 4,61	1,77 2,12	91,96 92,67	0,31 0,27	5,87 4,62	21,96 25,34	71,86 69,76
Водохранилище Чижовское: прибрежная зона центр	0,54 0,39	6,44 5,03	1,28 1,37	91,16 92,83	0,51 0,30	7,10 5,50	16,84 17,87	75,54 76,26
Река Титовка: прибрежная зона русло	0,49 0,51	6,00 6,79	1,45 1,48	91,77 90,77	0,45 0,50	6,48 0,58	18,66 20,34	74,40 78,57
Озеро Сергеевское: прибрежная зона центр	2,74 2,73	39,67 37,79	6,15 5,04	51,04 54,08	1,52 1,66	25,82 26,84	47,71 42,66	24,94 28,84

Таблица. 7. Атомные соотношения в пробах отложений**Table. 7. Atomic ratio in bottom sediments samples**

Водный объект	C : N	H : C	O : C
Река Лошица: прибрежная зона русло	18,79 16,80	3,74 5,48	12,24 15,09
Водохранилище Чижовское: прибрежная зона центр	13,91 15,04	2,37 3,25	10,63 13,86
Река Титовка: прибрежная зона русло	14,28 15,53	2,88 2,60	11,48 10,04
Озеро Сергеевское: прибрежная зона центр	16,88 16,14	1,85 1,59	0,97 1,07

Соотношение С : N рассматривается как индикатор гумификации. Большое значение С : N свидетельствует о медленном разложении органического вещества в отложениях р. Лошица и оз. Сергеевское. Соотношение H : C указывает на ароматичность и стабильность соединений. Низкое значение H : C для оз. Сергеевское свидетельствует о большей устойчивости органических веществ к разложению. Это может привести к накоплению гумусовых веществ в ДО. Отношение O : C указывает на полярность и избыток кислорода. С увеличением содержания фенольных гидроксилов возрастают атомные соотношения O : C, т. е. увеличивается процент содержания кислорода, а с ростом содержания водорода увеличивается содержание карбоксильных групп. Кроме того, эти группы активно участвуют в сорбции ТМ [18].

Для изучения особенностей связей в отложениях получены ИК-спектры отобранных образцов. Результаты представлены на рис. 2.

Полученные ИК-спектры отложений р. Лошица и вдхр Чижовское имеют явную схожесть органического состава в области волновых чисел 3650–3200 см⁻¹ с максимумом в 3618 см⁻¹, что указывает на наличие свободных гидроксильных групп, связанных водородными связями, и в интервале 3500–3100 см⁻¹ с максимумом 3426 см⁻¹, что характеризует наличие N–H-валентных колебаний, более выраженных в отложениях р. Лошица. Большой пик наблюдается в интервале 1790–1690 см⁻¹ с максимумом 1435 см⁻¹ и определяется наличием ароматических соединений в отложениях прибрежной зоны р. Лошица и центра вдхр Чижовское. Минеральная часть колебаний представлена соединениями SiO (1100–900 см⁻¹) с двумя максимумами – 1080 и 1034 см⁻¹ – в прибрежной зоне р. Лошица и всех отложениях вдхр Чижовское. Содержание силоксанов подтверждается максимумом 880 см⁻¹ в интервале 1000–100 см⁻¹. В отложениях фиксируются примеси карбонатов в интервале 1500–1400 см⁻¹. Содержание соединений железа определяется наличием узкой полосы при максимуме 644 см⁻¹ в интервале 600–200 см⁻¹.

Органическая часть отложений р. Титовка представлена содержанием спиртов и фенолов с максимумом 3422 см⁻¹ в интервале 3650–3200 см⁻¹, в диапазоне 3450–3300 см⁻¹ фиксируется широкий спектр вторичных аминов. Максимум 1620 см⁻¹ широкой полосы в интервале 1625–1575 см⁻¹ указывает на наличие амидных структур. Соединения кремния фиксируются в максимуме 1080 см⁻¹, минеральная часть так же, как и в отложениях р. Лошица и вдхр Чижовское, представлена силоксанами и соединениями железа в максимуме 694 см⁻¹.

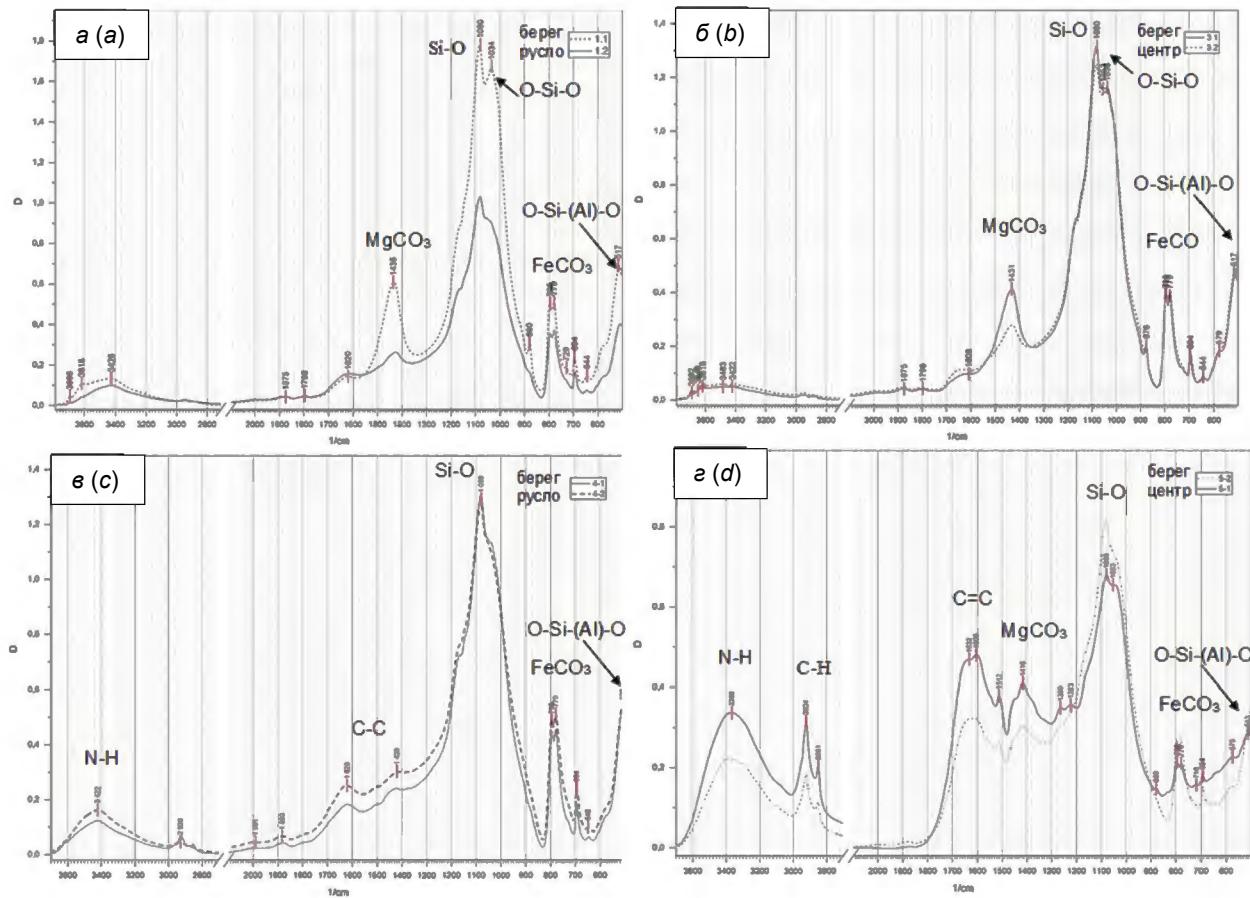


Рис. 2. ИК-спектры образцов донных отложений:
а – река Лошица; б – водохранилище Чижовское; в – река Титовка; г – озеро Сергеевское

Fig. 2. IR-spectra of the bottom sediment samples:
a – river Loshitsa; b – reservoir Chizhovsky; c – river Titovka; d – lake Sergeyevskoye

Отложения оз. Сергеевское отличаются значительным органическим составом, который представлен широким пиком свободных гидроксильных групп, содержанием спиртов, фенолов в максимуме 3368 cm^{-1} . Метильные и метиленовые группы встречаются в двух узких полосах при максимумах 2924 и 2851 cm^{-1} . Амидная часть фиксируется в интервале $1625\text{--}1575\text{ cm}^{-1}$ в максимумах 1632 и 1605 cm^{-1} . Присутствие ароматических колец с различными типами замещения представлены в интервале $1525\text{--}1475\text{ cm}^{-1}$. Минеральная часть отложений представлена большим пиком соединений кремния в интервале $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$. Силоксановая составляющая выражена гораздо меньше, чем в других анализируемых отложениях. Вода играет важную роль в процессах сапропелеобразования, именно она позволяет кремнию образовывать органоминеральные комплексы, которые легко усваиваются биотой (SiO_2bio). Адсорбированная вода фиксируется в пиках 1630 cm^{-1} [19].

Одним из методов, применимых для определения концентрации металлов в ДО, стал фотометрический. Результаты фотометрического метода анализа концентрации ТМ представлены на рис. 3.

Другим методом определения ТМ стал метод атомно-абсорбционной спектроскопии. Результаты представлены на рис. 4.

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии является более чувствительным по отношению к микроточествам ТМ. Этот метод обычно обладает высокой точностью, особенно для металлов, таких как Cu, Pb и Zn. Он позволяет обнаруживать очень низкие концентрации, что делает его предпочтительным для анализа загрязненных образцов. Атомно-абсорбционная спектроскопия позволяет избежать интерференции от других элементов, что важно для точного количественного анализа. Фотометрия может быть менее чувствительной по сравнению с атомно-абсорбционным методом. Однако для Pb допустимо использовать комплексообразующие реагенты, что позволяет повысить его чувствительность.

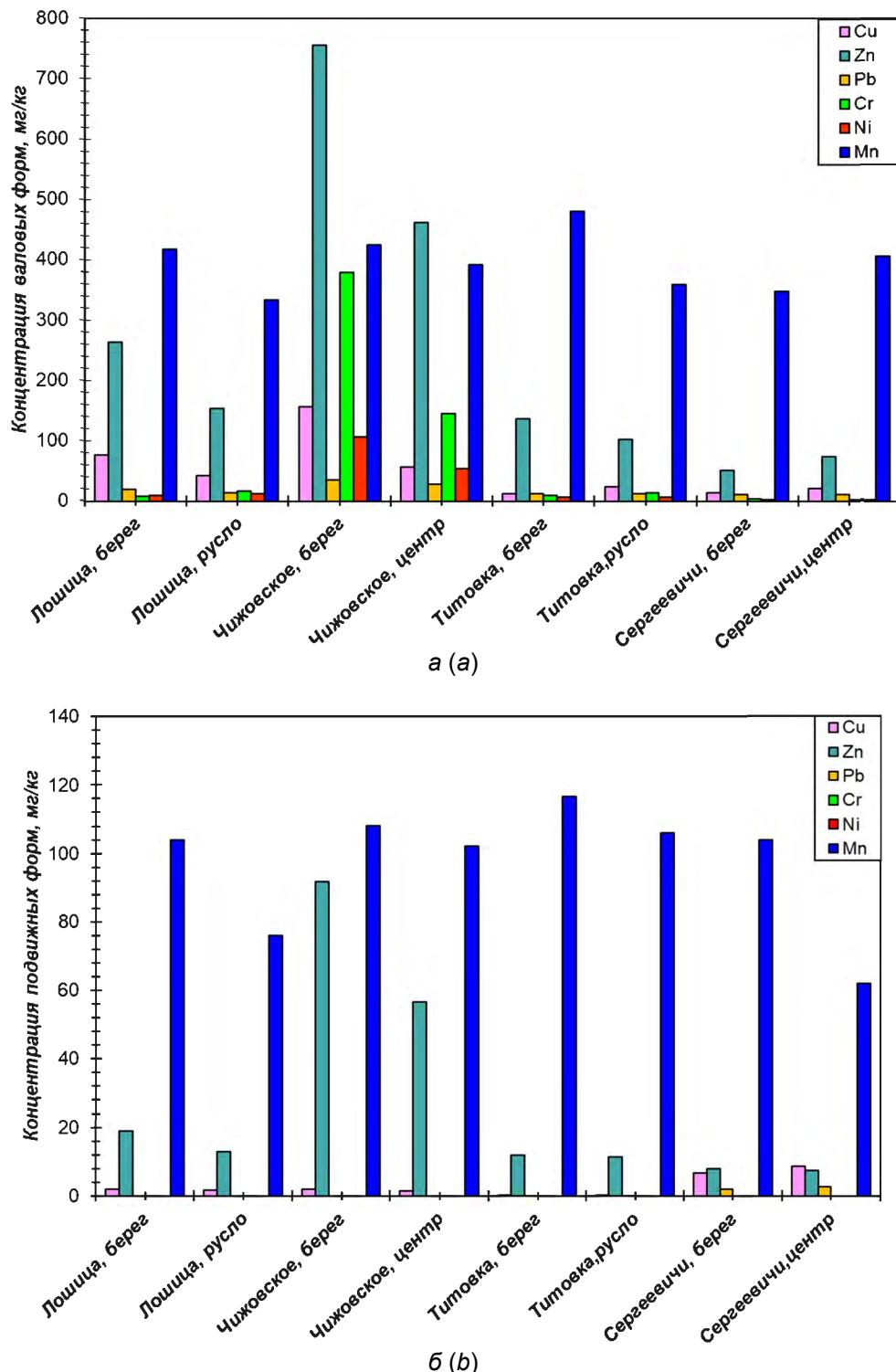


Рис. 3. Результаты фотометрического метода анализа валовых (а) и подвижных (б) форм тяжелых металлов в донных отложениях

Fig. 3. Results of the photometric method for analysis of gross (a) and mobile (b) heavy metals forms in bottom sediment

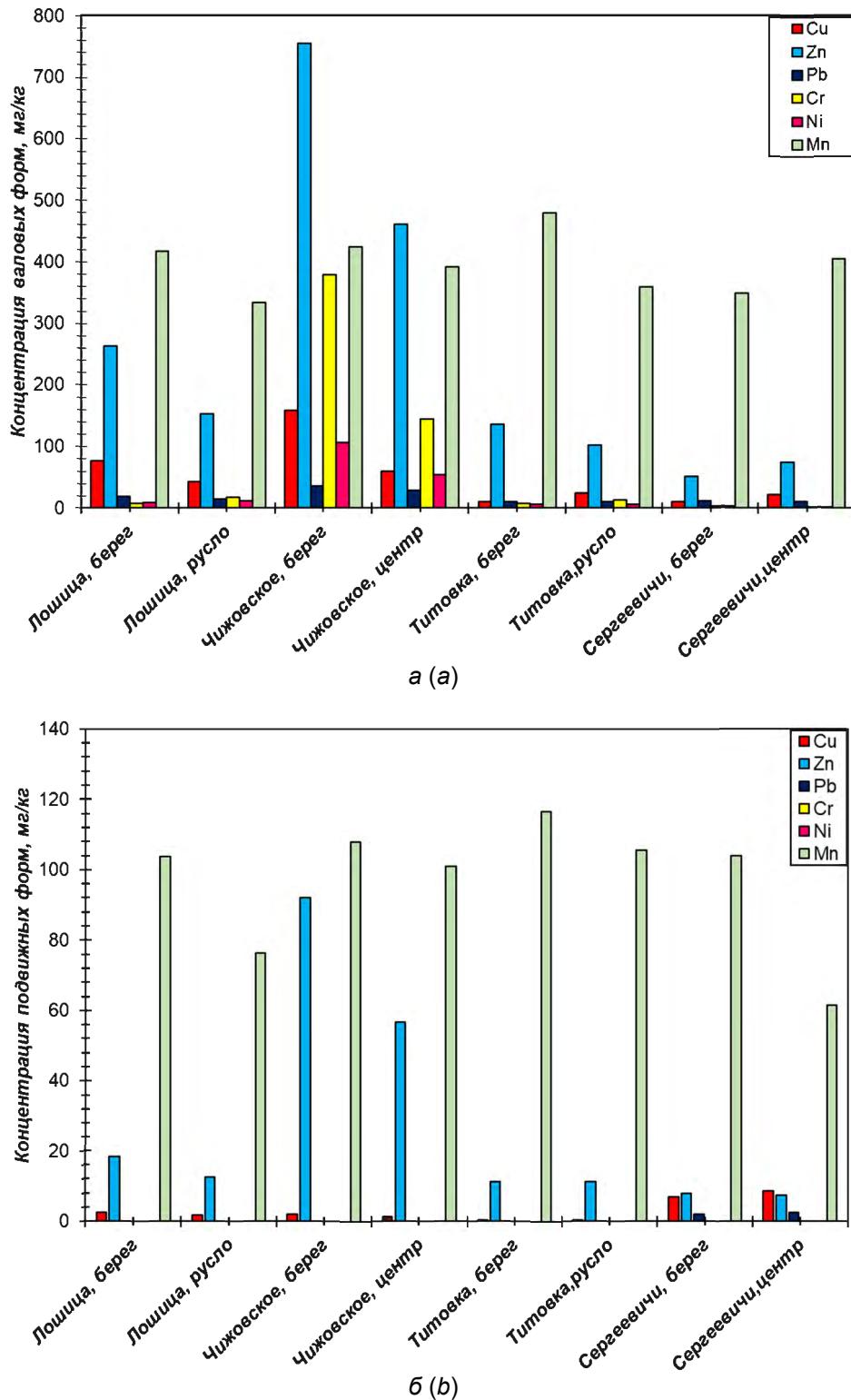


Рис. 4. Результаты атомно-абсорбционного метода анализа валовых (а) и подвижных (б) форм тяжелых металлов в донных отложениях

Fig. 4. Results of the atomic absorption method for analysis of gross (a) and mobile (b) heavy metal forms in bottom sediment

Содержание Cu варьирует в интервале 10,7–158,3 мг/кг, максимальное значение приходится на отложения прибрежной зоны вдхр Чижовское, а наименьшее – прибрежной зоны р. Титовка. Наибольшее содержание Zn (755 мг/кг) фиксируется в отложениях прибрежной зоны вдхр Чижовское,

наименьшее значение (52 мг/кг) – прибрежной зоны оз. Сергеевское. Концентрация Сг в отложениях варьирует в интервале 2,5–145,5 мг/кг, максимальное значение наблюдается в отложениях вдхр Чижовское, а минимальное – в центре оз. Сергеевское. Содержание Mn наблюдается в каждой пробе отложений и варьируется в интервале 348–480 мг/кг, максимальное значение – в прибрежной зоне р. Титовка, а минимальное – в прибрежной зоне оз. Сергеевское. В минимальных значениях накапливаются Pb и Ni – содержание Pb варьируется в пределах 10,1–35,9 мг/кг: минимум концентрации приходится на отложения из русла р. Титовка, а максимум – на прибрежную зону вдхр Чижовское; содержание Ni изменяется в интервале 2,5–106,0 мг/кг, при этом максимальное значение отмечено в отложениях прибрежной зоны вдхр Чижовское, а минимальное – в центре оз. Сергеевское.

При рассмотрении подвижности форм металлов выяснено, что фиксируемыми подвижными формами обладают Cu, Zn, Mn, Pb со следующими результатами подвижности: максимум подвижности Cu (30,54 %) фиксируется в отложениях прибрежной зоны оз. Сергеевское; для Mn максимум подвижности (14,91 %) наблюдается в прибрежной зоне оз. Сергеевское; Zn с максимумом (7,5 %) фиксируется в прибрежной зоне оз. Сергеевское; подвижное содержание Pb – только в отложениях оз. Сергеевское, максимум подвижности (12,5 %) – в центре оз. Сергеевское. Основными агентами закрепления как вочно, так и в непрочно связанным состоянии Cu, Pb, Zn выступают органическое вещество и несиликатные минералы. Тем не менее их связь с Cu, Pb, Zn проявляется по-разному, в зависимости от степени загрязнения. При разных уровнях техногенной нагрузки в удерживании Cu и Pb принимает активное участие органическое вещество. Основной вклад в подвижность форм вносят органические комплексы с фульвокислотами, карбоновыми кислотами, фенолами и аминокислотами. В результате связывания металлов с повышенной подвижностью в составе неустойчивых органических веществ может происходить вторичное загрязнение водного объекта ТМ в результате разрушения комплексов и высвобождения иона металла.

В исследованиях О. В. Лукашева максимальные средние концентрации Ni, Сг, Cu, Zn, Mn установлены в ДО рек Минска: максимумы Ni (382 мг/кг), Cu (163 мг/кг), Zn (757 мг/кг), а максимумы Сг (1341 мг/кг) и Mn (1811 мг/кг) фиксируются вблизи выхода ливневой канализации РУП «Станкостроительный завод им. С. М. Кирова». Максимальное содержание Pb характерно для ДО водохранилищ с максимумом концентрации 81,4 мг/кг в вдхр Чижовское [8]. В рамках данного исследования установлено, что на объекты р. Лошица, вдхр Чижовское, р. Титовка, оз. Сергеевское оказывается аномальная антропогенная нагрузка только по Zn, Mn, Сг, Cu. При этом максимум Zn (755 мг/кг) фиксируется в отложениях вдхр Чижовское – в сравнении с результатами О. В. Лукашева металл находится на прежнем уровне, максимум Cu (158,3 мг/кг) наблюдается в ДО вдхр Чижовское – металл находится в том же содержании, отличаясь лишь по микроколичеству. Содержание Сг имеет максимум 145,5 мг/кг, что в 9,3 раза меньше, чем в исследованиях О. В. Лукашева. Максимум Mn (488 мг/кг) в 3,8 раза меньше, чем его максимум в исследованиях О. В. Лукашева. Полученные результаты показывают, что антропогенная нагрузка по Zn и Mn осталась на прежнем уровне, а по Сг и Mn уменьшилась.

Для выявления форм металлов, способных выступать в качестве источников вторичного загрязнения водного объекта, проведено определение содержания форм ТМ, ассоциированных с органическими веществами, результаты которого представлены на рис. 5.

В отложениях р. Лошица и вдхр Чижовское большая часть органического вещества связана с Cu с минимальным содержанием (49,9 %) в отложениях центра вдхр Чижовское и максимумом (69,01 %) в ДО прибрежной зоны р. Лошица; органические формы Zn изменяются в интервале 54,75–59,47 % с минимумом в прибрежной зоне р. Лошица и максимумом в русле реки; Mn связан с органической частью в минимальном количестве (30,62 %) в прибрежной зоне р. Лошица, максимум содержания органических комплексов фиксируется (52,94 %) в прибрежной зоне вдхр Чижовское. Большое количество органических форм меди связано с высокой устойчивостью комплекса, процесс комплексообразования происходит за счет свободных гидроксильных групп соединений, входящих в состав ДО.

Для отложений р. Титовка имеется противоположная зависимость накопления органических форм Cu и Zn: для прибрежной зоны характерно в большей степени накопление Cu (84,12 %), в то время как в русле реки накапливаются органические комплексы Zn (90,17 %). В прибрежных отложениях также фиксируются органические формы Pb (36,69 %), что связано с большим, по сравнению с отложениями р. Лошица и вдхр Чижовское, содержанием гидроксильных групп и азотсодержащих соединений.

Большое количество валовых форм металлов (80,36 %) в оз. Сергеевское связано в составе с органическим веществом. Наибольшее количество приходится на Cu, Zn, Pb. Металлы могут координироваться с органическими лигандами, образуя комплексные соединения. Это взаимодействие является особенно сильным для металлов, которые имеют высокую электроотрицательность и могут создавать устойчивые комплексы с органическими молекулами. Cu и Pb образуют более прочные комплексы с органическими веществами благодаря их способности к образованию координационных соединений.

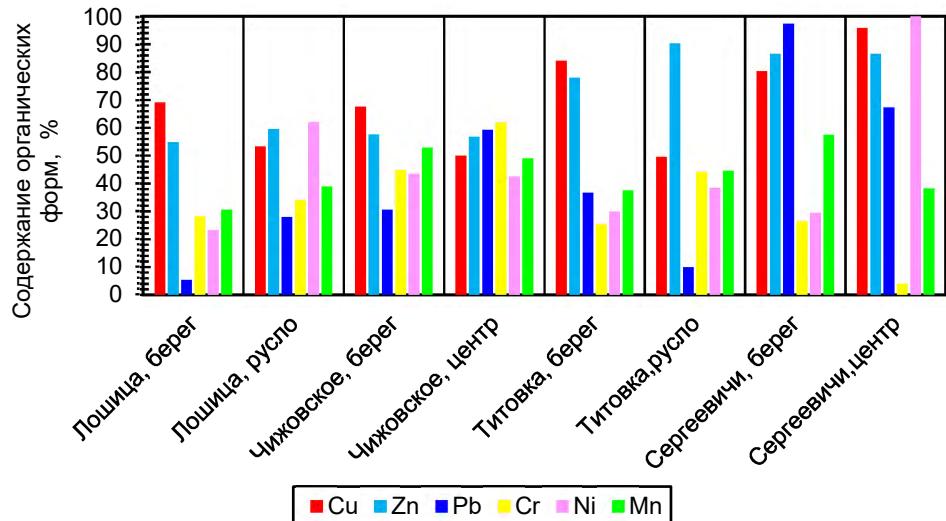


Рис. 5. Концентрации форм тяжелых металлов, связанных с органическим веществом

Fig. 5. Concentration of heavy metal forms, associated with organic matter

Антропогенную нагрузку рассчитывали с использованием геохимического критерия. В качестве фонового образца отложений принимали ДО, отобранные из оз. Сергеевское, ввиду минимальной антропогенной нагрузки на осадки. Результаты расчета представлены в табл. 8. Уровень загрязнения ДО определяли по классу рассчитанного I_{geo} (см. табл. 3).

Таблица 8. Значения индекса геоаккумуляции тяжелых металлов для отобранных проб донных отложений

Table 8. Values of the heavy metal geoaccumulation index of the bottom sediment samples

Водный объект	I_{geo}						Уровень загрязнения отложений
	(Cu)	(Zn)	(Pb)	(Cr)	(Ni)	(Mn)	
Река Loščica:							
прибрежная зона	0,37	0,1	0,25	0,55	0,61	0,017	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Zn, Pb, Cr, Ni и незагрязненные по Mn
русло	0,16	0,06	0,25	1,10	0,96	0,014	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, Ni, умеренно загрязненные (верхний предел) по Cr и незагрязненные по Zn, Mn
Водохранилище Čižkovskoe:							
прибрежная зона	0,43	0,12	0,3	1,68	1,32	0,016	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Zn, Pb, умеренно загрязненные (верхний предел) по Cr, Ni и незагрязненные по Mn
центр	0,18	0,08	0,31	1,92	1,53	0,014	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, умеренно загрязненные (верхний предел) по Cr, Ni и незагрязненные по Zn, Mn
Река Titovka:							
прибрежная зона	0,2	0,09	0,2	0,58	0,49	0,017	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, Cr, Ni и незагрязненные по Zn, Mn
русло	0,14	0,06	0,21	1,01	0,72	0,014	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, Ni, Cr и незагрязненные по Zn, Mn

Геоаккумуляционный индекс по каждому металлу изменяется в следующих интервалах: Си имеет максимум 0,43 (вдхр Чижовское, прибрежная зона) и минимум 0,14 (р. Титовка, русло); для Zn максимум составляет 0,12 (вдхр Чижовское, прибрежная зона), а минимум – 0,06 (р. Loščica, русло и р. Титовка, русло); Pb имеет максимум 0,31 (вдхр Чижовское, центр) и минимум 0,20 (р. Титовка, прибрежная зона); для Cr максимум составляет 1,92 (вдхр Чижовское, центр), а минимум – 0,55 (р. Loščica, прибрежная зона); Ni имеет максимум 1,53 (вдхр Чижовское, центр) и минимум 0,49 (р. Титовка, прибрежная зона); для Mn максимум составляет 0,017 (р. Loščica, прибрежная зона и р. Титовка, прибрежная зона), а минимум – 0,014 (вдхр Чижовское, центр и русло).

Наибольшее загрязнение по ТМ наблюдается в вдхр Чижовское, наибольшая антропогенная нагрузка создается от Cr и Ni. Антропогенное воздействие на водохранилище оказывается в результате сброса недостаточно очищенных ливневых стоков, осаждения твердых частиц из пылегазовых выбросов промышленных предприятий и в результате смыва атмосферными осадками.

Заключение. В результате анализа состава и свойств отобранных проб ДО установлено, что процесс образования и накопления осадков предусматривает наличие минеральных и органических форм вещества в отложениях.

В результате аналитических испытаний получили, что все пробы отложений обладают высокой влажностью (>50 %), а зольность меняется от минимального значения ($A_c = 24,24 \%$) у ДО, отобранных в оз. Сергеевское, до максимального значения ($A_c = 87,62 \%$) у ДО из р. Лошица. Высокой зольностью обладают ДО, отобранные из водных объектов, расположенных в черте города – р. Лошица, вдхр Чижовское и р. Титовка, что свидетельствует о преобладании минерального вещества в пробах. Низкая зольность проб отложений из оз. Сергеевское подтверждает преобладание органического вещества в составе ДО.

По исследованиям состава С, Н, N, O элементного анализа и полученным ИК-спектрам видно, что отложения из р. Лошица, вдхр Чижовское и р. Титовка носят минеральный характер образования с преимущественными структурами кремниевых конкреций, кальцита и силоксанов, а отложениям из оз. Сергеевское присущ более естественный характер накопления ввиду большого количества органического вещества амидных структур.

В ходе проведенных исследований методов анализа концентрации ТМ в ДО можно сделать вывод о том, что наиболее чувствительным является метод атомно-абсорбционной спектроскопии. Фотометрический метод при совместном присутствии менее чувствителен к малым концентрациям ионов ТМ, что не обуславливает его применение в качестве репрезентативного метода анализа донных осадков.

Наибольшей подвижностью обладают металлы Zn и Mn, что связано с закреплением металла в органических комплексах фульвокислот, карбоновых кислот, фенолов и аминокислот. В связи с этим неустойчивость органических комплексов с металлами может привести к вторичному загрязнению водного объекта.

Наибольшая антропогенная нагрузка по ТМ (Cu, Pb, Cr, Ni) обнаружена в отложениях рек Лошица и Титовка, а также в вдхр Чижовское. Cr и Ni имеют наиболее высокие уровни загрязнения, особенно в руслах рек и центре водохранилища. Содержание Mn во всех водных объектах находится на допустимом уровне.

Список использованных источников

1. Минский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды : [сайт]. – Минск, 2018–2025. – URL: <https://minoblpriroda.gov.by> (дата обращения: 04.03.2025).
2. Национальный статистический комитет Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 2018–2025. – URL: <https://www.belstat.gov.by/> (дата обращения: 04.03.2025).
3. Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь : [сайт]. – Минск, 2017–2025. – URL: <https://www.nstmos.by> (дата обращения: 04.03.2025).
4. Байков, В. Н. Речная гидравлика и свойства русловых отложений на урбанизированных территориях / В. Н. Байков, В. А. Курочкина, Д. В. Писарев // Вестник Могилёвского государственного строительного университета. – 2011. – № 2. – С. 221–227.
5. Jaskuła, J. Analysis of spatial variability of river bottom sediment pollution with heavy metals and assessment of potential ecological hazard for the Warta river, Poland / J. Jaskuła // Minerals. – 2021. – Vol. 11, № 3. – P. 327–347. – DOI: 10.3390/min11030327.
6. Позднякова, А. И. Тяжелые металлы в системе «донные отложения – водная растительность» речных экосистем в зоне наблюдения Белорусской атомной станции / А. И. Позднякова // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2020. – № 3. – С. 41–52.
7. Изучение содержания тяжелых металлов в донных отложениях и воде в отводящем канале рисовой оросительной системы / Т. И. Дрововозова, Л. А. Булгакова, М. В. Власов, Н. Н. Красовская // Мелиорация и гидротехника. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 155–170.
8. Лукашев, О. В. Закономерности аккумуляции металлов в современных донных отложениях р. Свислочь / О. В. Лукашев // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы III Междунар. науч. конф., г. Минск, 15 дек. 2021 г. – Минск : БГУ, 2021. – С. 238–267.
9. Особенности загрязнения донных отложений малых рек тяжелыми металлами в результате различной хозяйственной деятельности / Б. И. Корженевский, Г. Ю. Толкачев, Н. В. Коломийцев, Т. И. Ильина // Известия Нижневолжского агрониверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – Т. 63, № 3. – С. 415–426.

10. Рябова, Л. Н. Критерий оценки экологического состояния донных отложений (на примере Брестской области) / Л. Н. Рябова, И. А. Залыгина // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. наукаў. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 455–466. – DOI: 10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466.
11. Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil / Z. Wang, P. Luo, X. Zha [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 379. – P. 134043–134063. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134043.
12. A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater and the mechanism of treatment methods / Z. Xu, Q. Zhang, X. Li [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 429. – P. 131688–131708. – DOI: 10.1016/j.cej.2021.131688.
13. Информационная система «Экологический Портал Республики Беларусь» : [сайт]. – Минск, 2024–2025. – URL: <https://ecoportal.gov.by> (дата обращения: 09.03.2025).
14. Макаревич, А. А. Антропогенные гидрологические преобразования рек г. Минска / А. А. Макаревич // Вестник Белорусского государственного университета. – 2001. – С. 62–67.
15. Лихачева, А. В. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студ. / А. В. Лихачева, Л. А. Шибека. – Минск : БГТУ, 2011. – 204 с.
16. Qu K. Environmental Analytical Chemistry / K. Qu, D. Dan. – Amsterdam : Elsevier, 2023. – 230 p.
17. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River / G. Muller // Geojournal. – 1969. – Vol. 2. – P. 108–118.
18. Variation of humic substances within peat profile / H. Anderson, A. Hepburn // Peat and Water. – 1986. – Vol. 2. – P. 177–194.
19. Chukanov, N. V. Infrared spectroscopy of minerals and related compounds / N. V. Chukanov, A. D. Chernonnyi. – Cham : Springer, 2016. – 1109 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-25349-7.

References

1. *Minskij oblastnoj komitet prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy* [Minsk regional committee of natural resources and environmental protection]. Available at: <https://minoblpriroda.gov.by/> (accessed 04 March 2025). (in Russian)
2. *Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'* [National Statistical Book of the Republic of Belarus]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/> (accessed 04 March 2025). (in Russian)
3. *Glavnij informacionno-analiticheskij centr Nacional'noj sistemy monitoringa okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'* [The main information and analytical center of the National System for Environmental Monitoring in the Republic of Belarus]. Available at: <https://www.nsoms.by/> (accessed 04 March 2025). (in Russian).
4. Bajkov V. N., Kurochkina V. A., Pisarev D. V. *Rechnaya gidravlika i svojstva ruslovyh otlozhenij na urbanizirovannyh territoriyah* [River hydraulics and properties of cretaceous deposits in urbanized areas]. *Vestnik Mogilyovskogo gosudarstvennogo stroiteľ'nogo universiteta = Bulletin of Mogilev State University of Civil Engineering*, 2011, no. 2, pp. 221–227. (in Russian)
5. Jaskuła J. Analysis of spatial variability of river bottom sediment pollution with heavy metals and assessment of potential ecological hazard for the Warta river, Poland. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 327–347, DOI: 10.3390/min11030327.
6. Pozdnyakova A. I. *Tyazhelye metally v sisteme ‘donnye otlozheniya – vodnaya rastitel’nost’ rechnyh ekosistem v zone nablyudenija Belorusskoj atomnoj stancii* [Heavy metals in the system of ‘bottom sediments – aquatic vegetation’ of river ecosystems in the observation zone of the Belarusian nuclear power plant]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2020, no. 3, pp. 41–52. (in Russian)
7. Drovovozova T. I. *Izuchenie soderzhanija tyazhelyh metallov v donnyh otlozhenijah i vode v otvodyashchem kanale risovoj orositel'noj sistemy* [Study of heavy metals content in bottom sediments and water in draining channel of rice irrigation system]. *Melioraciya i gidrotehnika = Melioration and hydraulic engineering*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 155–170. (in Russian)
8. Lukashev O. V. *Zakonomernosti akkumulyacii metallov v sovremennyh donnyh otlozheniyah r. Svisloch'* [Patterns of metal accumulation in modern sediments in river Svisloch]. *Materialy III Mezhdunarod. nauch. konf. "Problemy regional'noj geologii zapada Vostochno-Evropejskoj platformy i smezhnyh territorij"* [Proc. of the III Int. conf. "Problems of the regional geology of the west of the East-European Platform and related topics"]. Minsk, 2021, pp. 238–267. (in Russian)
9. Korzhenevskij B. I. *Osobennosti zagryazneniya donnyh otlozhenij malyh rek tyazhelymi metallami v rezul'tate razlichnoj hozyajstvennoj deyatel'nosti* [Features of heavy metal contamination of small rivers by various economic activities]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Bulletin of the agrouniversity complex of the Low Volga region: science and higher professional education*, 2021, vol. 63, no. 3, pp. 415–426. (in Russian)
10. Ryabova L. N. *Kriterij ocenki ekologicheskogo sostoyaniya donnyh otlozhenij (na primere Brestskoj oblasti)* [Criteria for assessing the ecological status of sediment (as an example from the Brest region)]. *Vesti Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya himicheskikh nauk = Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of chemical sciences*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 455–466, DOI: 10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466. (in Russian)
11. Wang Z., Luo P., Zha X. Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil. *J. of Cleaner Production*, 2022, vol. 379, pp. 134043–134063, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134043.

12. Xu Z., Zhang Q., Li X. A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater and the mechanism of treatment methods. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 429, pp. 131688–131708, DOI: 10.1016/j.cej.2021.131688.
13. *Informacionnaya sistema "Ekologicheskij Portal Respubliki Belarus"* [Information system "Ecological Portal of the Republic of Belarus"]. Available at: <https://ecoportal.gov.by/> (accessed 09 March 2025). (in Russian)
14. Makarevich A. A. *Antropogennye gidrologicheskie preobrazovaniya rek g. Minska* [Anthropogenic hydrological transformation of the rivers of Minsk]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Belarusian State University*, 2001, pp. 62–67. (in Russian)
15. Lihacheva A. V., Shibeka L. A. *Himiya okrughayushchej sredy. Laboratornyj praktikum: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov* [Environmental chemistry. Laboratory workshop: teaching aid for students]. Minsk, 2011, 204 p. (in Russian)
16. Qu K. Environmental Analytical Chemistry. Amsterdam, Elsevier Publ., 2023, 230 p.
17. Muller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
18. Anderson, H. Variation of humic substances within peat profile. *Peat and Water*, 1986, vol. 2, pp. 177–194.
19. Chukanov N. V., Chervonnyi A. D. Infrared spectroscopy of minerals and related compounds. Cham, Springer Publ., 2016, 1109 p., DOI: 10.1007/978-3-319-25349-7.

Информация об авторах

Дорожко Елизавета Юрьевна – магистрант, младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: elizaveta2002belstu@gmail.com

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Information about the authors

Elizaveta Yu. Dorozhko – Master's degree student, Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: elizaveta2002belstu@gmail.com

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Deputy Director, Head of Lab. of physico-chemical mechanics of natural dispersed systems, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by