

Оригинальная статья

УДК 627.157: 002.637 (282.247.41)

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПО ФОРМАМ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ИХ СОДЕРЖАНИЕ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПЛЕСОВ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Толкачев Глеб Юрьевич , канд. геогр. наук, старший научный сотрудник
k-26@yandex.ru

Корженевский Борис Игоревич, канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
542609@list.ru

Коломийцев Николай Владимирович , канд. геол.-мин. наук, заведующий отделом
kolomiytsev@vniigim.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, корп. 2, Россия

Аннотация. Целью исследований является изучение загрязнения донных отложений плесов Иваньковского водохранилища тяжелыми металлами. Эти отложения водных объектов являются достаточно чувствительными индикаторами их загрязнения. Наиболее неблагоприятными загрязнителями представляются следующие металлы и микроэлементы: As, Cd, Hg, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni. По данным исследований, проведенных в 2021 г., рассмотрены тенденции изменения загрязнений донных отложений Иваньковского водохранилища. Определено содержание подвижных форм существования следующих микроэлементов: Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni и As. Содержание микроэлементов по формам существования определено методом А. Тессье, результаты исследований приведены в соответствии с оценкой по игео-классам – по загрязненности сорбирующей фракции (менее 0,02 мм). Основными загрязняющими элементами в подвижных формах донных отложений водохранилища являются кадмий и свинец, по которым уровень загрязнения оценивается в пределах второго игео-класса: от слабо- до умеренно загрязненного. Представлена картина как загрязнения донных отложений Иваньковского водохранилища микроэлементами, так и распределения и соотношения их подвижных форм существования в отложениях. Такие элементы, как Pb, Zn и Cr, находятся в основном в форме, связанной с гидроксидами железа и марганца; Co, Cd, Ni, Cr и Cu – большей частью в ионообменной и карбонатной формах. На основании полученных данных в настоящее время нагрузка на изученные объекты не является опасной. Полученные результаты представляют научный и практический интерес для организаций геоэкологической направленности, для специалистов в области охраны окружающей среды и природообустройства.

Ключевые слова: донные отложения, тяжелые металлы, загрязнение, подвижные формы, игеокласс, сорбирующая фракция, водохранилище

Формат цитирования: Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Распределение тяжелых металлов по формам существования и их содержание в донных отложениях плесов Иваньковского водохранилища // Природообустройство. 2023. № 1. С. 89-94. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94.

© Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В., 2023

Original article

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS BY FORMS OF EXISTENCE AND THEIR CONTENT IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE REACH OF THE IVANKOVSKY RESERVOIR

Tolkachev Gleb Yurjevich , candidate of geographic sciences, senior researcher
k-26@yandex.ru

Korzhenevskiy Boris Igorevich, candidate of geological-mineralogical sciences, senior researcher
542609@list.ru

Kolomiytsev Nikolay Vladimirovich ✉, candidate of geological-mineralogical sciences, head of department

kolomiytsev@vniigim.ru

All-Russian research Institute of hydraulic engineering and melioration named after A.N. Kostyakov», 127434, Moscow, B. Academicheskaya, 44, korp.2, Russian Federation

Annotation. The purpose of the research is to study the contamination of the bottom sediments of the Ivankovsky reservoir with heavy metals. These deposits of water bodies are quite sensitive indicators of their pollution. The most unfavorable pollutants are the following metals and trace elements: As, Cd, Hg, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni. According to the data of the work carried out in 2021, the trends in changes in the pollution of the bottom sediments of the Ivankovsky reservoir are considered. The content of mobile forms of existence of the following microelements was determined: Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni and As. The content of trace elements by forms of existence was determined by the method of A. Tessier, the results of the studies are given in accordance with the assessment by igeo-classes – by the contamination of the sorbent fraction (less than 0.02 mm). The main polluting elements in the mobile forms of the bottom sediments of the reservoir are cadmium and lead, for which the level of pollution is estimated within the 2nd igeo-class – from weakly to moderately polluted. A picture of both the contamination of the bottom sediments of the Ivankovsky reservoir with trace elements, and the distribution and ratio of their mobile forms of existence in the sediments is presented. Elements such as Pb, Zn and Cr are mainly in a form bound to iron and manganese hydroxides; Co, Cd, Ni, Cr and Cu are mostly in ion exchange and carbonate forms. Based on the data obtained, at present, the load on the studied objects is not dangerous. The obtained results are of scientific and practical interest for organizations of geo-ecological orientation, for specialists in the field of environmental protection and nature management.

Keywords: bottom sediments, heavy metals, pollution, mobile forms, sorption fraction, igeo-class, reservoir

Format of citation: Tolkachev G.Y., Korzhenevskiy B.I., Kolomiytsev N.V. Distribution of heavy metals by forms of existence and their content in the bottom sediments of the reach of the Ivankovsky reservoir // Prirodoobustrojstvo. 2023. № 1. S. 89-94. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94.

Введение. Создание новых водохранилищ является толчком к возникновению нового взаимодействия водных масс и донных отложений (ДО), которые обусловлены значительным изменением существовавших в режиме неподпруженной реки гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик. ДО новой гидроморфологической структуры играют двунаправленную роль, будучи как накопителем загрязнителей, так и источником их вброса в водную толщу. Характеристики состава ДО указывают и на неблагоприятные в геоэкологическом отношении участки и на условно «чистые» участки. Совокупность природных и антропогенных факторов обуславливает особенности миграции загрязнителей между твердой и жидкой компонентами водного объекта. Несмотря на то, что Ивановское водохранилище является одним из источников поступления пресной воды в г. Москву, оно продолжает подвергаться определенному антропогенному прессу, вызванному масштабным освоением водосборных площадей. Изучалось загрязнение ДО тяжелыми металлами и элементами первого и второго классов опасности, а также Se и Sb.

Валовое содержание ТМ является важным показателем, но оно не указывает на риск

проявления токсических эффектов при вторичном загрязнении водных масс. Большинство исследований, посвященных частицам металлов в природных водных системах (то есть металлам, связанным с взвешенными веществами или донными отложениями), касается общей концентрации металлов. При этом явно недостаточно оценивались их содержание и распределение по формам существования в ДО. Использование общей концентрации в качестве критерия для оценки потенциальных последствий загрязнения отложений подразумевает, что все формы данного металла оказывают равное воздействие на окружающую среду [1]. Однако данное предположение является некорректным. При определении форм существования твердый материал отложений может быть подразделен на определенные фракции, которые могут быть извлечены избирательно с использованием соответствующих реагентов.

Материалы и методы исследований.

Ивановское водохранилище было создано в 1937 г. в результате перекрытия русла р. Волги у села Иваново плотиной гидроэлектростанции. Протяженность водного пути от г. Твери до г. Дубна составляет 115 км, площадь водохранилища – 327 км², площадь водосбора – 4100 км² [2].

В процессе обследований 2021 г. пробы отбирались из поверхностного слоя ДО. Все изученные образцы состоят из близких по минеральному составу компонентов, что позволяет считать результаты сравнительной оценки сопоставимыми. Проба весом 300-500 г после отбора грейфером помещалась в широкогорлую пластиковую посуду, гомогенизировалась и распределялась по пакетам для исследований. Для упаковки проб ДО использовались полиэтиленовые пищевые пакеты, далее выделялась мокрым просеиванием «сорбирующая фракция» размером менее 0,020 мм. Эта фракция практически полностью состоит из высокодисперсных глинистых минералов, оксидов Fe и Mn, органического вещества, обладающего максимальными сорбционными свойствами [3]. Для корректировки результатов анализов определяли гигроскопическую влажность воздушно-сухих образцов.

Аккумуляция ТМ в ДО оценивалась с помощью «индекса геоаккумуляции» [4], который характеризует относительную кратность загрязнения ДО относительно природного фона [5-6]. ДО подразделяются на классы качества по каждому микроэлементу, где фоновое значение представлено с определенным запасом [7].

При определении распределения микроэлементов в компонентах ДО особое внимание уделялось выбору фракций, на которые могут повлиять различные условия окружающей среды; были выбраны четыре экстракции по методу А. Тессье [8]. Использование последовательных экстракций дает детальную информацию о происхождении, способе появления, биологической и физико-химической доступности, иммобилизации и транспорте микроэлементов.

Экстракция 1 – это микроэлементы в обменном комплексе. Адсорбция микроэлементов на их основных компонентах ДО (глинах, гидратированных оксидах железа и марганца, гуминовых кислотах); изменения ионного состава воды в водных объектах влияют на процессы сорбции-десорбции.

Экстракция 2 – микроэлементы, связанные с карбонатами. Значительные концентрации металлов могут быть связаны с карбонатами осадка; эта фракция весьма восприимчива к изменениям pH.

Экстракция 3 – ТМ, связанные с оксидами железа и марганца. Оксиды железа и марганца существуют в виде конкреций, цементных образований между частицами или просто в виде покрытия на частицах. Они являются поглотителями микроэлементов и термодинамически нестабильны в анаэробных условиях – при низком Eh.

Экстракция 4 – ТМ, связанные с органическим веществом ДО. ТМ связаны с различными формами органического вещества: живыми

организмами, детритом, покрытиями на минеральных частицах. В условиях окисления в природных водах органическое вещество может разлагаться, что приводит к выделению растворимых микроэлементов.

Определение концентраций микроэлементов в растворе проводилось на атомно-абсорбционном спектрометре «КВАНТ-З.ЭТА-Т» (НПО «КОРТЭК», г. Москва). Атомно-абсорбционный спектрометр «КВАНТ-З.ЭТА-Т» определяет концентрации элементов в анализируемой пробе по селективному поглощению излучения резонансных спектральных линий определяемого элемента атомным паром анализируемой пробы [9]. Стандартная ошибка разведения составляет 2%. Стандартная ошибка прибора составила 0,3-5% [10]. Определение каждой концентрации растворов производилось в 3-кратной повторности.

Результаты и их обсуждение. Распределение содержания некоторых микроэлементов по формам существования, или подвижным формам, в изученных районах водохранилища приведено в таблице 1. Точки отбора № 35, 34, 33 расположены в пределах Волжского плеса напротив с. Городня, д. Мелково и д. Плоски – сверху вниз по течению. Точка № 37 расположена в Шопинском плесе между автомагистралями. Точки 40, 41, 45, 48 расположены соответственно напротив урочища Корчева, острова Уходово, Коровинского залива и входа в канал им. Москвы. На рисунке 1 представлено процентное распределение элементов первого класса опасности в подвижных формах, что в свою очередь наглядно отражает соотношение данных форм и дает возможность

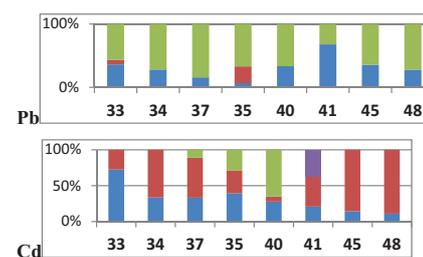


Рис. 1. Процентное распределение подвижных форм свинца и кадмия в ДО исследуемых районов Ивановского водохранилища:

- – в обменном комплексе;
 - – связанные с карбонатами;
 - – связанные с оксидами железа и марганца;
 - – связанные с органическим веществом
- Fig. 1. Percentage distribution of mobile forms of lead and cadmium in BS in the studied areas of the Ivankovsky reservoir:
- – in the exchange complex;
 - – bound with carbonates;
 - – bound with oxides of iron and manganese;
 - – bound with organic matter

оценить зависимость их распределения от района исследуемого объекта.

Как следует из таблицы 1, одна из основных форм As – сорбированная в обменном комплексе, как правило, – в ДО Иваньковского плеса. В ДО Волжского и Шошинского плесов, а также в районе Коровинского залива значительная часть As сорбирована на гидроксидах Fe и Mn. В верховьях Иваньковского водохранилища, в районе с. Городня, подавляющая часть As (80%) представлена формой, сорбированной на карбонатах, что может, в частности, объясняться активным смывом почв с левого берега с их последующей трансформацией в ДО. Что касается Cd, его «обменная» составляющая снижается от истоков к дамбе. С другой стороны, «карбонатная» форма в районе дамбы становится преобладающей.

В районе урочища (ур.) Корчева более 60% Cd находится в «гидроксидной» форме, что может объясняться болотистыми берегами с привносом железа. Металлы Pb и Zn связаны в основном с «гидроксидной» формой на значительной площади водохранилища, за исключением участка от островов Клинец и Уходово до Коровинского залива, на котором от 40 до 60% составляет ионообменная форма. Основная форма

существования в ДО Co и Ni – «карбонатная», она составляет до 80-90% для Co и 50-60% для Ni, за исключением Шошинского плеса и входа в канал им. Москвы, где формы Co, связанные с гидроксидами, составляют 90% для первого и 60% – для второго. В свою очередь, вторая определяющая форма для Ni является «обменной».

Таким образом, подвижная фаза Ni практически целиком находится в наиболее доступной фазе, более подверженной распаду с последующим выходом металла в водную массу при изменении гидрохимической обстановки. Содержание Cu в большинстве исследованных районов также находится в основном в «обменной» и «карбонатной» формах, и порядка 30-40% – в «гидроксидной». И только в районе острова Уходово «гидроксидная» форма составляет 80% всей суммы подвижных соединений. Также на гидроксидах железа и марганца сорбировано большинство (70-90%) содержания подвижного Cr.

Для оценки потенциального вторичного загрязнения рассчитаны суммы подвижных соединений микроэлементов исходя из возможности их полного выхода из отложений и оценены по системе игео классов; значения приведены в таблице 2. Наибольший уровень загрязнения

Таблица 1. Концентрации микроэлементов первого класса опасности по формам существования в ДО, мг/кг

Table 1. Concentrations of trace elements of the first hazard class by forms of existence in BS, mg / kg

№ точки отбора No of sampling points	Сорбированные в обменном комплексе Sorbed in the exchange complex				Сорбированные на гидроксидах железа и марганца Sorbed on iron and manganese hydroxides			
	As	Cd	Pb	Zn	As	Cd	Pb	Zn
33	0,6	1,0	29,8	14,0	0,84	-	46,4	48,6
34	1,0	0,6	21,8	10,0	1,16	-	55,6	43,8
37	0,6	0,6	16,0	6,0	0,48	0,20	84,8	55,2
35	0,2	1,0	6,0	6,0	-	0,72	60,2	37,2
40	1,0	0,8	24,0	12,0	-	1,88	47,8	20,4
41	1,4	0,2	22,0	10,0	-	-	10,4	18,8
45	0,2	0,2	14,0	8,0	0,52	-	25,4	9,8
48	0,4	0,2	12,0	6,0	-	-	31,0	9,8

Таблица 2. Суммы подвижных форм существования микроэлементов (числитель, мг/кг) и их значения в игео-классах (знаменатель)

Table 2. Sums of mobile forms of existence of trace elements (numerator, mg/kg) and their values in igeo-classes (denominator)

Т. отбора P. of sampling	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Co	Ni
33	1,44/ф	1,38/2	82,2/2	64,4/ф	75,2/1	4,84/ф	2,06/ф	64,4/ф
34	2,16/ф	1,78/2	77,4/2	53,8/ф	79,0/1	4,04/ф	1,88/ф	65,6/ф
37	1,60/ф	1,80/2	100,8/2	61,2/ф	82,8/1	4,6/ф	2,52/ф	73,2/0
35	1,00/ф	2,52/3	90,0/2	43,2/ф	108,8/1	3,24/ф	2,26/ф	68,4/0
40	1,28/ф	2,88/3	71,8/2	32,4/ф	75,4/1	2,42/ф	1,80/ф	62,0/ф
41	1,40/ф	0,96/2	32,2/1	28,8/ф	124,4/1	2,16/ф	0,80/ф	77,6/0
45	0,72/ф	1,40/2	39,4/1	17,8/ф	75,0/1	1,34/ф	1,18/ф	62,2/ф
48	0,40/ф	1,80/2	43,0/1	17,8/ф	85,8/1	1,34/ф	1,08/ф	64,4/ф

ДО отмечен для Cd – 3 и гео класс в районе с. Гордня на входе в водохранилище и Ивановском плесе в районе ур. Корчева. В других изученных районах суммарное содержание Cd в подвижных формах ДО соответствует 2 и гео классу. Согласно классификации [4] 3 и гео класс соответствует средне загрязненному уровню, 2 и гео класс – умеренно загрязненному уровню. Согласно классификации [3] оба эти класса соответствуют умеренной (умеренно опасной) техногенной нагрузке. Содержание Pb от с. Гордня до ур. Корчева находится на уровне 2 и гео класса. Далее по течению, вплоть до канала им. Москвы, содержание Pb снижается до 1 и гео класса, что соответствует «незагрязненному до умеренно загрязненного» уровню загрязнения [4] и слабой (малоопасной) техногенной нагрузке [3]. Содержание Cu по всей площади водохранилища находится на уровне 1 и гео класса. Содержание всех остальных изученных элементов находится либо в пределах фона, либо не превышают нулевой и гео класса – это незагрязненный уровень.

В предыдущих исследованиях был сделан вывод о том, что именно изменение содержания ТМ в подвижных формах способствует изменению их валового содержания в ДО [11, 12]. Необходимо подчеркнуть, что все подвижные формы существования ТМ в ДО могут участвовать в процессах массопереноса в системе «Твердая фаза – поровый раствор – вода», а их содержание зависит от ряда факторов: меняющегося соотношения приходной и расходной составляющих баланса веществ, гидродинамической обстановки в придонном слое, физико-химических условий в верхнем 10-сантиметровом слое ДО [12]. Возможный

вынос микроэлементов из ДО не будет превышать их суммарные концентрации в подвижных соединениях. На основании полученных данных говорить о том, что в настоящее время техногенная нагрузка на изученные объекты не является опасной.

Выводы

1. Установлено, что по всей площади измерений Pb, Zn и Cr находятся в основном в форме, связанной с гидроксидами железа и марганца; Co, Cd, Ni, Cr и Cu находятся в ионообменной и карбонатной формах. Содержание и распределение микроэлементов по формам существования зависят от меняющегося соотношения приходной и расходной составляющих баланса веществ, гидродинамической обстановки в придонном слое, физико-химических условий в верхнем слое ДО.

2. Отмечены наибольшие уровни загрязнения ДО водохранилища суммарными концентрациями подвижных соединений Cd и Pb, которые, однако, не превышают 2 и гео класса, или «умеренно загрязненного» уровня. Возможный вынос микроэлементов из ДО не будет превышать данные концентрации, поэтому о серьезной опасности вторичного загрязнения исследуемыми элементами говорить не приходится.

3. В настоящее время не выявлены четкие пространственные закономерности распределения микроэлементов по формам существования в ДО водохранилища. Вместе с тем, исходя из полученных данных, можно говорить об отсутствии значительного поступления приведенных в работе элементов с водосборной площади водохранилища.

Список использованных источников

1. Моржухина С.В. Геохимическая оценка загрязнения малых рек (на примере реки Сестра Московской области): Дис. ... канд. хим. наук. Дубна, 2000. 108 с.
2. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1987. 296 с.
3. Колومیцев 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.
4. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungenseit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. S. 778-783.
5. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.
6. 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. Pp. 175-192.
7. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / Под ред. А.С. Керженцева, Р. Майснера. М.: Наука, 2006. 223 с.

References

1. Morzhuhina S.V. Geohimicheskaya otsenka zagryazneniya malyh rek (na primere reki Sestra Moskovskoj oblasti). Diss. na soisk. uch. st. kand. him. nauk. – Dubna: 2000. – 108 s. 1.
2. Avakyan A.B., Saltankin V.P., Sharapov V.A. Vodohranilishcha i ih vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu. M.: Nauka. 1987. 296 s.
3. Kolomiytsev N.V. Otsenka tekhnogennoj nagruzki na vodnye objekty po zagryaznennosti donnyh otlozhenij / Korzhenevskiy B.I., Ijina T.A., Getman E.N. // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. 2015. № 6. S. 15-19.
4. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. S. 778-783.
5. Vinogradov A.P. Geohimiya redkih i rasseyannyh elementov v pochvah. M.: Izd-vo AN SSSR, 1957. 235 s.
6. 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. R. 175-192.
7. Modelirovanie erozionnyh protsessov na territorii malogo vodosbornogo bassejna / Pod red. A.S. Kerzhentseva, R. Majsnera. – M.: Nauka, 2006. 223 s. ISBN5-02-034205-X

8. 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. Pp. 844-851.

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

10. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: МГУ, 1995. 320 с.

11. Толкачёв Г.Ю. Тяжелые металлы в системе «Вода–донные отложения». Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 98 с.

12. Толкачёв Г.Ю., Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И. Содержание и формы существования тяжелых металлов в донных отложениях Иваньковского и Угличского водохранилищ // Мелиорация и водное хозяйство. 2017. № 4. С. 37-43.

Критерии авторства

Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 06.11.2022

Одобрена после рецензирования 12.12.2022

Принята к публикации 25.12.2022

8. 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.

9. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Spektrometr atomno-adsorbtsionnyj «KVANT – Z.ETA – T». M.: Nauchno-proizvodstvennaya firma Kortek, 2006. 20 s.

10. Dmitriev E.A. Matematicheskaya statistika v pochvovedenii. M.: MGU, 1995. 320 s.

11. Tolkachyev G.Yu. Tyazhyolye metally v sisteme «voda – donnye otlozheniya». Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. 98 s.

12. Tolkachyev G.Yu., Kolomiytsev N.V., Korzhenevskiy B.I. Soderzhanie i formy sushchestvovaniya tyazhelyh metallov v donnyh otlozheniyah Ivankovskogo i Uglichskogo vodohranilishch // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. 2017. № 4. S. 37-43.

Criteria of authorship

Tolkachev G.Y., Korzhenevskiy B.I., Kolomiytsev N.V. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Contributions of the authors

All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

The article was submitted to the editorial office 06.11.2022

Approved after reviewing 12.12.2022

Accepted for publication 25.12.2022