

2. *Валиев Айрат Расимович*, ректор ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

3. *Нуруллин Эльмас Габбасович*, профессор кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

4. *Еров Юрий Васильевич*, генеральный директор, Ассоциация по производству семян зерновых культур «Элитные семена Татарстана».

5. *Хисматуллин Марс Мансурович*, директор ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения по Приволжскому федеральному округу».

6. *Зезин Никита Николаевич*, директор, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

7. *Тагиров Марсель Шарипзянович*, генеральный директор, ООО «Агротехнологии».

8. *Захаров Владимир Григорьевич*, главный научный сотрудник отдела селекции, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.С. Немцева – филиал ФГБНУ Самарского федерального исследовательского центра РАН.

9. *Блохин Василий Иванович*, ведущий научный сотрудник, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подраз-

деление ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

10. *Воробьев Владимир Александрович*, главный научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства, Красноуфимский селекционный центр Уральского научно-исследовательского института сельского хозяйства – ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

Достоинством научно-внедренческой работы является ее многолетний характер и тесная интеграция исследований с практической работой семеноводческих хозяйств и сельских товаропроизводителей.

Объем монографии 528 страниц, тираж – 1000 экз.

Монография может быть полезна для научных работников, практической деятельности руководителей и специалистов предприятий АПК, для обучения студентов по профильным направлениям в высших учебных заведениях.

На монографию получена рецензия ведущих ученых России: академика РАН В.М. Косолапова, академика РАН А.А. Завалина, член-корреспондента РАН А.И. Прянишникова.

Хисматуллин Марс Мансурович, доктор с.-х. наук, директор (ФГБУ «Управление «Приволжскмелиоводхоз»).

УДК 627.157:002.637 (282.247.41)

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-4-8

ВЛИЯНИЕ ВЫНОСА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОЕМОВ НА КАЧЕСТВО ВОДЫ

Г.Ю. ТОЛКАЧЕВ, Б.И. КОРЖЕНЕВСКИЙ

Ключевые слова: водные объекты, тяжелые металлы, донные отложения, вторичное загрязнение, Ивановское водохранилище.

Keywords: water bodies, heavy metals, sediments, secondary pollution, Ivan'kovo reservoir.

Аннотация. Рассмотрены современные актуальные геоэкологические аспекты изучения загрязнений донных отложений водных объектов тяжелыми металлами и As, а так же возможное вторичное загрязнение водной толщи этими элементами, иммобилизованными из донных отложений. Валовое содержание загрязнителей в толще донных отложений не всегда соответствует реальной их опасности. Объективно вредной является чаще всего десятисантиметровая толща приповерхностных иловатых донных отложений, которая при различных геоэкологических условиях может являться как сорбентом, так и источником вторичного загрязнения. Рассмотрены активные формы отложений, которые при определенных физико-химических условиях заведомо могут являться источниками вторичного загрязнения водной толщи. Даны рекомендации по необходимым действиям, предшествующим использованию вод для хозяйственной деятельности.

Abstract. The article considers modern relevant geoecological aspects of studying pollution of the sediments of water bodies by heavy metals and As, as well as possible secondary pollution of the water column with these elements immobilized from the sediments. The gross content of pollutants in the thickness of sediments does not always correspond to their real danger. Objectively harmful is most often a 10-centimeter thickness of near-surface silty sediments, which under various geoecological conditions can be both a sorbent and a source of secondary pollution. The article considers active forms of sediments, which under certain physical and chemical conditions can obviously be sources of secondary pollution of the water column. Recommendations are given on the necessary actions preceding the use of water for the economic activities.

Введение. Весьма нежелательными и опасными в повышенных концентрациях в водных объектах за-

грязняющими веществами, являются микроэлементы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As. В качестве интегрального показателя техногенной нагрузки на водный объект рассматривается степень загрязнения донных отложений (ДО), которая является информацией об интенсивности и направленности инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, а также показателем работы очистных сооружений или их отсутствия. Изучение загрязнения ДО водных объектов химическими элементами продолжает оставаться одной из важных проблем геоэкологии и охраны окружающей среды. При этом водные объекты являются конечным звеном и потенциальным барьером в природно-техногенной ландшафтно-каскадной системе любой водосборной территории. Использование водных объектов и сопредельных территорий требует изучения их экологического состояния и оценки уровня техногенной нагрузки, при этом отсутствие формальной нормативной базы по содержанию тяжелых металлов (ТМ) в ДО водоемов привело к различным и многообразным подходам и методам оценки техногенной нагрузки.

Режимные наблюдения за состоянием ДО водных объектов – важный, а в большинстве случаев необходимый элемент изучения их геоэкологического состояния, поскольку сами отложения аккумулируют и трансформируют техногенное воздействие, являясь при этом ин-

дикатором его уровня. Наличие и содержание ТМ в ДО определяется гидродинамическими характеристиками потока, физико-химическими процессами, связанными с ТМ, а также их взаимодействием с квазистационарной сорбирующей фазой. Возможны следующие механизмы выноса ТМ из ДО: диффузия в ионной или связанной форме; конвекция вследствие фильтрации по порам ДО вод; взмучивание при изменении гидродинамических условий в придонном слое. Комплексные соединения могут активизировать десорбцию ТМ из взвешенного материала и ДО и негативно влиять на имеющиеся природные адсорбционные процессы, увеличивая концентрацию растворенных металлов в водной массе [1].

Степень накопления либо выноса ТМ из ДО зависит от концентраций комплексных соединений, изменения рН, форм металлов, присутствующих в суспензионном материале и взаимодействия их катионов. Образование прочных растворимых комплексов с органическими лигандами – один из наиболее реальных путей десорбции ТМ из ДО. Устойчивость комплексных соединений с ростом рН увеличивается. Это, вероятно, связано с повышением активности комплексообразующих центров при понижении кислотности.

Активный необратимый восстановитель, взаимодействующий с «ионной» системой ДО – растворенное органическое вещество, образующееся при распаде захороненных органических осадков. Мощность окисленного слоя осадков определяется соотношением интенсивностей диффузионного потока O_2 через границу «вода–ДО» при распаде органического вещества. Чем медленней затухает распад, тем на меньшую глубину в ДО проникает растворенный O_2 [2]. Таким образом, содержание O_2 в верхнем слое ДО и, соответственно, в придонном слое водной массы водоема непосредственно влияет на процессы накопления-выноса ТМ в системе «вода–ДО».

Валовое содержание ТМ является важным показателем, однако оно не указывает на опасность токсических эффектов при вторичном загрязнении водных масс. В большинстве исследований, посвященных частицам металлов в природных водных системах (т. е. металлам, связанных с взвешенными веществами или ДО), рассматривается их общая концентрация. Также необходимо оценивать их содержание и распределение по формам существования в ДО – поскольку именно от форм существования зависит миграция и массообмен в системе «вода–ДО».

Объекты и методы исследования. Отбор проб ДО осуществляется в зависимости от целей исследований. Более трех десятков лет нами используется следующий подход. Водный объект разбивается на серию створов – в каждом створе пробы ДО должны характеризовать водный объект или его часть за определенный промежуток времени, объем проб должен быть достаточным для выполнения запланированных аналитических лабораторных исследований. В каждом створе отбирается несколько проб в зависимости от гидрологических характеристик и их особенностей на данном участке водного объекта. При использовании методики [3, 4] достаточно отбирать пробы весом 300...500 г.

Далее выделяется «сорбирующая фракция» размером менее 0,02 мм – мокрым просеиванием, выпаривается и высушивается, до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре не выше +60 °С. При длительном хранении пробы рекомендуется замораживать до –20 °С [3]. Определение концентраций ТМ в пробах ДО проводится методами ИСП и атомной адсорбции (Сд) – после их разложения в «царской водке».

Обоснование точек отбора не носит унифицированного характера, т. к. участки различных категорий являются в некоторой степени уникальными и требуют индивидуального подхода. В целом необходимо соблюдать следующие принципы [5, 6]:

- на участках I категории при первичных обследованиях необходимо опробовать 2...4 точки по створам водохранилища или реки на участках ниже промышленно-селитебных агломераций и на условно чистых участках; при повторных отборах следует корректировать пункты опробования в соответствии с целями исследования и результатами предыдущих отборов;

- на участках II категории, т. е. в районах промышленно-гражданского освоения территории створы опробования следует размещать выше и ниже объекта обследования на первичной стадии с корректировкой или сохранением предыдущих мест опробования в зависимости от полученных результатов [3];

- на участках III категории рекомендуется отбирать несколько проб в наиболее интересных местах малых рек;

- участки IV категории – индивидуальны и здесь специфика отбора проб зависит от цели исследования [5, 6].

При изучении загрязнения ДО ТМ существует устойчивый подход в виде учета гранулометрического состава отложений [7–9]. В работе приведены уровни содержания в ДО ТМ – Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, Fe и Mn, а так же As. Уровень аккумуляции ТМ в ДО оценивался с помощью «индекса геоаккумуляции» [4], который характеризует кратность загрязнения ДО (относительно природного фона) во фракциях грунта <20 мкм. ДО подразделяются на классы качества по каждому ТМ и As.

При определении распределения ТМ по формам существования, особое внимание уделялось выбору фракций ДО (активные формы), на которые могут повлиять различные условия окружающей среды. Использовался метод [10], позволяющий определить, с какими компонентами ДО связываются те или иные микроэлементы. Применение последовательных экстракций, хотя и требует значительного времени, предоставляет подробную информацию о происхождении, способе появления, биологической и физико-химической доступности, мобилизации и транспорте микроэлементов. Фракция 1 – микроэлементы в обменном комплексе ДО. Изменения ионного состава природных вод влияют на процессы сорбции-десорбции. Фракция 2 – микроэлементы, связанные с карбонатами. Фракция очень восприимчива к изменениям рН среды. Фракция 3 – микроэлементы, связанные с оксидами железа и марганца. Фракция 4 – микроэлементы, связанные с органическим веществом ДО. В усло-

виях окисления в природных водах органическое вещество может разлагаться, что приводит к выделению растворимых микроэлементов.

Обсуждение результатов. Для оценки потенциального выноса ТМ из ДО водоема и его вторичного загрязнения — необходимо определить массу каждого металла, накопленную по площади его отложений. Исследования, проведенные Институтом водных проблем (ИВП) РАН на Куйбышевском и других водохранилищах Волжского каскада, показали, что в пределах одного водохранилища и сезона соотношение различных форм существования элементов в твердой фазе ДО остается постоянным по всей площади водоема и меняется только по сезонам [11–13]. Поэтому для оценки масс ТМ, находящихся в разных формах в твердой фазе ДО в пределах изучаемого водоема (либо его отдельного района), могут быть использованы результаты исследований, проведенных на репрезентативных участках.

Сложность кинематической структуры потока в водоемах не позволяет выполнить моделирование процессов выхода загрязняющих веществ, в частности ТМ, из ДО в воду. Поэтому целью экспериментальных исследований является не моделирование многофакторных процессов выхода загрязняющих веществ из ДО, а постановка опытов, позволяющих непосредственно определить параметры, определяющие поток элементов из ДО. Для определения этих параметров проводился следующий статический эксперимент: в аквариум погружались ДО, затем он заполнялся водой, и в течение продолжительного времени определялась концентрации загрязняющих веществ — Fe, Mn, Cu, Zn в воде. Образцы ДО Ивановского водохранилища закладывались в плексигласовые (химически инертные) цилиндры высотой 40 см, диаметром 20 см. Слой образцов составлял около 10 см. Они заливались дистиллированной водой объемом 8 л, цилиндры и их крышки плотно закрывались темной бумагой. Отборы проб для последующих анализов проводились через 7, 14, 30 сут со дня начала эксперимента. Объем пробы составлял 3 л, после чего в цилиндры доливалось 3 л дистиллированной воды. Перед началом забора проб, в цилиндрах определялась температура. Отобранная проба фильтровалась через мембранные фильтры.

В ДО Fe представлено как нерастворимыми, мало подвижными соединениями, так и формами, доступными для геохимических преобразований на стадии раннего диагенеза. Последнее подвержено диагенетическими изменениями в толще осадка, легко растворимо в разбавленных кислотах и включает в себя гидроксиды двух- и трехвалентного Fe, фосфаты, силикаты и другие соединения [14]. Установлено, что концентрация Fe значительно возрастает при переходе от кислородных к бескислородным условиям. В пробах величина БПК₅ на 7-й день была низкой, т. е. благоприятной для высокого выделения Fe, после чего БПК₅ возросло (низкое выделение Fe). При рассмотрении влияния pH на выделение Fe следует учесть, что процесс зависит от Eh, кислородного насыщения, концентрации Fe и фосфора в воде. При низких значениях pH происходит более интенсивное выделение Fe, чем при высоких. При значе-

нии pH = 9 процесс поступления железа в водную толщу практически прекращается. В исследуемых пробах на 7-е сутки эксперимента значение pH = 7,72, т. е. было достаточно высоким, но надо полагать, что на процесс выделения действовали другие факторы.

При исследовании Mn следует учитывать, что с одной стороны, Mn⁴⁺ в виде оксидов составляет основу структуры донных осадков, с другой — в виде Mn²⁺ может быть сорбирован этими же оксидами, равно как и другими компонентами осадков. Кроме pH на выделение Mn влияет содержание кислорода. На 7 сут БПК₅ было 6 мг/л, но на 14-е сут возросло до 9,3, при снижении выделения Mn. Исследованиями показано, что снижение содержания кислорода еще недостаточно для выделения Mn из ДО. Непременным условием является снижение величины pH.

Установлено, что при поглощении Cu происходит ее аккумуляция в ДО. В отсутствие сильного воздействия на структуру, а также ряда факторов, способных перевести труднорастворимые формы в легко растворимые, выделения в воду поглощенной Cu не наблюдаются в течение длительного времени. Даже в условиях интенсивного ресуспензирования и реокисления осадков, при варьировании температуры от 0 до 20 °С, содержания растворенного кислорода от 0 до 100 % насыщения и величины pH = 7,8...8,8 выделения Cu не происходит. Рассматривая изменения концентрации Zn, следует отметить, что влияющие на десорбцию Zn факторы идентичны факторам, влияющим на десорбцию Cu. Влияние pH на десорбцию незначительно.

На основании ранее проведенных исследований возможно сделать вывод, что именно изменение содержания ТМ в подвижных формах способствует изменению их валового содержания в ДО [14]. Также на основе проведенных исследований можно сделать вывод о высокой изменчивости содержания подвижных форм изученных микроэлементов в верхнем 10-сантиметровом слое ДО водохранилища, который активно вовлекается в процесс массообмена с водной массой водохранилища [2, 15, 16]. Следует отметить, что все подвижные формы 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.

Сравнение массы ТМ в твердой фазе и поровом растворе 10-сантиметрового слоя ДО показывает, что доля запасов ТМ в поровом растворе практически всех элементов в летний период незначительна (по материалам летних опробований). Отмечается, что роль порового раствора в процессах вторичного загрязнения водных масс водохранилища не ограничивается запасами растворенных элементов. Часть ТМ, закрепленная в твердой фазе ДО, в определенных условиях переходит в поровый раствор и далее в водную массу, и переход ТМ из ДО в водную массу осуществляется транзитом через поровый раствор. При этом выполненные для Ивановского водохранилища оценки [15] показыва-

ют, что ни диффузионный вынос, ни фильтрация не могут быть реальными механизмами выноса микроэлементов из ДО в водную массу. Вероятно, основной причиной выноса является макроперенос за счет русловых процессов.

Для расчета масс ТМ в твердой фазе верхнего 10-сантиметрового слоя ДО принимаются средние значения характеристик фракции <0,02 мм: плотность осадков около 1,5 г/см³; пористость верхнего горизонта – 0,6. Следовательно, вес призмы твердой фазы илистых отложений размером 1 × 1 × 0,1 м равен 150 кг. Оценка содержания накопленных масс ТМ в изучаемом слое ДО основана на распределении по классам геоаккумуляции (игео-классам), и позволяет оценить массу *m* каждого ТМ в активном слое ДО на площади 1 м² [4] (таблица). Данный подход позволяет определять районы с относительно равномерным загрязнением ДО, рассчитывать их приблизительную площадь и затем – максимально возможный вынос ТМ в водную толщу.

Таким образом, представляется возможным провести районирование ДО по площади в зависимости от уровня игео-класса накопленной массы (или запасов) ТМ. В результате отбора и анализа проб ДО определяются приблизительные площади содержания ТМ для каждого игео-класса. Затем в соответствии с данными таблицы рассчитывается накопленная масса определенного металла для площади каждого района – далее M_{I-geo} . Далее, путем суммирования массы ТМ для каждого игео-класса возможно оценить общую накопленную массу ТМ для ДО всего водоема:

$$M_{I-geo} = mS_{I-geo}; \quad M_{общ} = \sum M_{I-geo},$$

где M_{I-geo} – накопленная масса ТМ по определенному игео-классу в отдельном районе ДО; *m* – масса каждого ТМ в активном слое ДО на площади 1 м²; S_{I-geo} – площадь содержания ТМ в ДО определенного игео-класса; $M_{общ}$ – суммарная накопленная масса ТМ по всей площади ДО водоема.

В результате районирования и унификации содержания ТМ по игео-классам существенно упрощается оценка количества ТМ в ДО, как для каждого района водоема, так и для всего водоема в целом. В водоеме в период летней межени, при сухой погоде, может практически полностью прекращаться поступление водных масс с осадками с водосборной территории. Вследствие этого может существенно понижаться уровень водоема, и соответственно, уменьшаться его объем. В результате в проточных водоемах снижаются скорости течений, начинается стагнация, эвтрофикация и заморные явления. При этом существенно возрастает объем забираемой воды для сельскохозяйственного водопользования различных прибрежных фермерских хозяйств. Вместе с тем в условиях стагнации водоема, как правило, существенно ухудшается гидрохимическая обстановка – снижается содержание растворенного O₂, особенно в придонном слое, а также показатели рН в придонном

Распределение значений накопленной массы ТМ в призме ДО по игео-классам

Элемент	Фон, г	Накопленная масса по классам геоаккумуляции, г						
		0	1	2	3	4	5	6
Mn	127,5	191	382,5	765	1530	3060	6120	>6120
Cd	0,045	0,07	0,135	0,27	0,54	1,08	2,16	>2,16
Zn	14,25	21,4	42,8	85,6	171,2	342,4	684,8	>684,8
Pb	3	4,5	9	18	36	72	144	>144
Cu	6,75	10,1	20,2	40,4	80,8	161,6	323,2	>323,2
Ni	10,2	15,3	30,6	61,2	122,4	244,8	490	>490
Co	2,85	4,3	8,6	17,2	34,4	68,8	138	>138
Cr	13,5	20,2	40,4	80,8	161,6	323,2	646	>646
As	2	2,9	5,8	11,6	23	46	84	>84
Hg	0,06	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	>3,2

слое воды и в ДО [15], что свидетельствует о подкислении системы «вода–ДО» и переходе от окислительных условий к восстановительным, что в свою очередь приводит к опасности вторичного загрязнения. В таких условиях возможен переход ТМ, находящихся в подвижных формах существования в ДО, в водную массу практически в полном объеме в течение одной-двух недель. Накопленная масса ТМ после выхода из ДО распространяется в водной среде водоема, вследствие чего в воде повышается концентрация металлов. Для оценки максимально возможного влияния выноса масс ТМ из ДО представляется допустимым принять, что из отложений выйдут полностью все изучаемые элементы, содержащиеся в подвижных формах. Также для данной оценки представляется возможным принять утверждение, что в предполагаемых условиях уровень водоема и, следовательно, объем будет минимальный. При этом возможно принять, что вынесенные металлы будут распространяться по всему объему водных масс и рассчитать максимально возможное добавленное содержание металла в воду в результате вторичного загрязнения. Расчет может быть произведен по формуле:

$$C_3 = M_{общ} / V; \quad C_{общ} = C_3 + C_в, \quad (1)$$

где C_3 – концентрация ТМ, добавленная (вынесенная) в водную массу из ДО; $M_{общ}$ – суммарная накопленная масса ТМ по всей площади ДО водоема; *V* – объем водной массы водоема; $C_{общ}$ – общая концентрация ТМ в результате выноса из ДО; $C_в$ – концентрация ТМ в воде перед выносом из ДО.

Далее можно рассчитать общую концентрацию каждого металла в воде – путем сложения концентрации, добавившейся в результате выноса, и уже имеющейся концентрации в водной массе.

Как следует из формулы (1), в засушливые летние меженные периоды, с потенциальным ухудшением качества воды в водоемах, перед водопользованием необходимо измерять содержания ТМ в воде, рассчитывать объем водной массы и давать оценку накопленным массам ТМ в ДО. Данные расчеты можно проводить как на отдельных водоемах, так и на отдельных участках средних и крупных рек, на которых расположены сельхозугодья и предполагается активное водопользование. По результатам расчета $C_{общ}$ ТМ в воде исследуемого водоема, можно принимать решение о целесообразности и правомерности использования его воды в сельскохозяйственных целях.

Выводы

1. Загрязнение ДО водного объекта отражает его современное состояние и несет информацию об инженерно-хозяйственной деятельности на водосборной территории, при этом фракция ДО <20 мкм способна удовлетворять требованиям мониторинга водного объекта, инвентаризации и оценки содержания ТМ. Их аккумуляцию в ДО рекомендуется оценивать с помощью «индекса геоаккумуляции», который характеризует относительную кратность загрязнения ДО во фракциях <20 мкм.

2. Представленное ранжирование территории по иерархическим уровням (таксонам) позволяет достаточно четко определить ранги участков при исследовании загрязнений и определять последовательность действий, необходимых при изучении загрязнений ДО ТМ. Выбор пунктов отбора проб и частота повторяемости отбора позволит минимизировать затраты на эти операции.

3. Представляется возможным провести районирование ДО по площади в зависимости от уровня игео-класса накопленной массы (или запасов) ТМ. В результате отбора и анализа проб ДО определяются приблизительные площади содержания ТМ для каждого игео-класса. В результате районирования и унификации содержания ТМ по игео-классам существенно упрощается оценка количества ТМ в ДО для всего водоема в целом.

4. Для оценки влияния выноса ТМ из ДО на воду изучаемого объекта, необходимо рассчитать добавленное содержание каждого металла в водную массу. Далее рассчитывается общая концентрация каждого металла в воде в результате выноса путем сложения концентрации, добавившейся в результате выноса, и уже имеющейся концентрации в водной массе. По результатам расчета общей концентрации ТМ в воде принимается решение об использовании воды в сельскохозяйственных целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 270 с.
2. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.
3. Исследования загрязненности донных отложений как основа мониторинга состояния водотоков/Н.В. Коломийцев, В.Е. Райнин, Т.А. Ильина, Л.Б. Зимина-Шалдыбина, Г. Мюллер // Мелиорация и водное хозяйство. 2001. № 3. С. 11–15.
4. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. s. 778–783.
5. Основные принципы мониторинга загрязнения большой реки (на примере бассейна реки Волги)/Б.И. Корженевский, Г.Ю. Толкачев, Т.А. Ильина, Н.В. Коломийцев // Строймного. 2017. № 2 (7). С. 1/7–7/7.
6. Мониторинг загрязнения автотранспортом малых рек Московской области тяжелыми металлами/Б.И. Корженевский, Н.В. Коломийцев, Т.А. Ильина, Н.О. Гетьман // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 4 (208). С. 24–29.
7. Коломийцев Н.В., Ильина Т.А. Интегральные критерии для оценки экологического состояния донных отложений водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство. 2009. № 5. С. 39–42.
8. Техногенное загрязнение речных экосистем/В.Н. Новосельцев и др.; под ред. В.Е. Райнина и Г.Н. Виноградовой. М.: Научный мир. 2002. 140 с.
9. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений/Н.В. Коломийцев, Б.И. Корженевский, Т.А. Ильина, Е.Н. Гетьман // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.

10. 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.

11. Современное состояние и проблемы охраны качества воды в бассейне Волги/А.Б. Авакян, Е.В. Венецианов, А.Г. Кочарян, К.И. Сафронова // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 471–479.

12. Кочарян А.Г., Толкачев Г.Ю. Гидроэкология: определение возможности вторичного загрязнения тяжелыми металлами на основании их содержания в донных отложениях // Инженерная экология. 2009. № 1. С. 37–50.

13. Венецианов Е.В. Некоторые особенности сорбции тяжелых металлов слоем донных осадков и почвогрунтов // Водные ресурсы. 1997. № 3.

14. Водохранилище Воткинской ГЭС/Под ред. Ю.М. Матарзина. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1968. 164 с.

15. Толкачев Г.Ю. Тяжелые металлы в системе «вода–донные отложения». LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrucken, 2012. 98 с.

16. Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны/В.А. Абакумов, Н.П. Ахметьева, В.Ф. Бреховских и др. М.: Наука, 2000. 344 с.

REFERENCES

1. Linnik P.N., Nabivanec B.I. Formy migracii metallov v presnykh poverhnostnykh vodah. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 270 s.
2. Brekhovskih V.F. Gidrofizicheskie faktory formirovaniya kislorodnogo rezhima vodoyomov. M.: Nauka, 1988. 168 s.
3. Kolomyitsev N.V., Raynin V.E., Il'ina T.A., Zimina-Shaldybina L.B., Mueller G. Issledovaniya zagryaznenosti donnykh otlozhenij kak osnova monitoringa sostoyaniya vodotokov // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. 2001. № 3. S. 11–15.
4. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. s. 778–783.
5. Korzhenevskiy B.I., Tolkahev G.Yu., Il'ina T.A., Kolomyitsev N.V. Osnovnye principy monitoringa zagryazneniya bol'shoj reki (na primere bassejna reki Volgi) // StroyMnogo. 2017. № 2(7). S. 1/7–7/7.
6. Korzhenevskiy B.I., Kolomyitsev N.V., Il'ina T.A., Get'man N.O. Monitoring zagryazneniya avtotransportom malyh rek Moskovskoj oblasti tyazhelymi metallami // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2018. № 4(208). S. 24–29.
7. Kolomyitsev N.V., Il'ina T.A. Integral'nye kriterii dlya ocenki ekologicheskogo sostoyaniya donnykh otlozhenij vodnykh ob'ektov // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. 2009. № 5. S. 39–42.
8. Tekhnogennoe zagryaznenie rechnykh ekosistem/V.N. Novosel'cev i dr.; pod red. V.E. Raynina i G.N. Vinogradovoj. M.: Nauchnyi mir. 2002. 140 s.
9. Kolomyitsev N.V., Korzhenevskiy B.I., Il'ina T.A., Get'man E.N. Ocenka tekhnogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty po zagryaznenosti donnykh otlozhenij // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. 2015. № 6. S. 15–19.
10. 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.
11. Avakyan A.B., Venecianov E.V., Kocharyan A.G., Safronova K.I. Sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany kachestva vody v bassejne Volgi // Vodnye resursy. 1994. T. 21. № 4. S. 471–479.
12. Kocharyan A.G., Tolkachov G.Yu. Gidroekologiya: opredelenie vozmozhnosti vtorichnogo zagryazneniya tyazhyolymi metallami na osnovanii ih soderzhaniya v donnykh otlozheniyah // Inzhenernaya ekologiya. 2009. № 1. S. 37–50.
13. Venecianov E.V. Nekotorye osobennosti sorbcii tyazhyolykh metallov sloem donnykh osadkov i pochvogruntov // Vodnye resursy. 1997. № 3.
14. Vodokhranilishche Воткинской GES/Под ред. Ю.М. Матарзина. Пермь: Изд-во Перм. Университета, 1968. 164 с.
15. Tolkachov G.Yu. Tyazhyolye metally v sisteme «voda–donnye otlozheniya». LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrucken, 2012. 98 с.
16. Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany/V.A. Abakumov, N.P. Ahmet'eva, V.F. Brekhovskih i dr. M.: Nauka, 2000. 344 с.

Толкачев Глеб Юрьевич, канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник, k-26@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6983-7106, Authors ID 70414; **Корженевский Борис Игоревич**, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ORCID 0000-0001-7663-9677, Scopus 57195526993, Authors ID 350982 (ФГБНУ «ФНЦ гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»).