
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 627.157: 002.637 (282.247.41)

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ

© 2023 г. Г. Ю. Толкачев^{1,*}, Б. И. Корженевский^{1,**}, Н. В. Коломийцев^{1,***}

¹ФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова”,
ул. Большая Академическая, 44, к. 2, Москва, 127434 Россия

*E-mail: k-26@yandex.ru

**E-mail: 542609@list.ru

***E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 23.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Проблема загрязнения водных объектов тяжелыми металлами продолжает оставаться актуальной. Наиболее опасными загрязняющими веществами донных отложений являются металлы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn и As. Для систематизации исследований осуществлено ранжирование объектов, существенно различающихся по площадям, техногенным воздействиям и ландшафтным характеристикам. Объектом I ранга является чаша водохранилища с прилегающей к ней приводо-раздельной территорией с расположенными на ней городами и поселками, различными притоками, более мелкими элементами природного и природно-техногенного рельефа. Меньшими по площади, но не по роли в загрязнении водных объектов являются городские и поселковые агломерации, расположенные на побережьях водохранилищ и незарегулированных участках, на приводораздельных территориях. Определенную лепту в загрязнение/очистку приносят малые реки, которые могут способствовать поступлению как чистого, так и загрязненного иловатого материала в большие водотоки. Для различных по иерархии таксонов предлагаются различные площадные и временные режимы обследований. В представленной работе на основании экспериментальных исследований дана оценка загрязнения тяжелыми металлами донных отложений в пределах Верхневолжской системы: оз. Селигер, Ивановское и Угличское водохранилища и участок Верхней Волги. Приводятся полученные на практике результаты исследований содержания (загрязнения) элементов — Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, Fe и Mn. Описаны или представлены ссылки на методики, использовавшиеся при проведении экспериментов. Представлена общая картина загрязнения и отмечены тенденции ее изменения в пространстве и во времени.

Ключевые слова: мониторинг, тяжелые металлы, загрязнение, таксоны, участки категорий, донные отложения, водные объекты

DOI: 10.31857/S0869780923030116, **EDN:** WNKUCO

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Режимные наблюдения за состоянием донных отложений (ДО) водных объектов — необходимый элемент изучения их экологического состояния, поскольку сами отложения аккумулируют и трансформируют техногенное воздействие [25, 33], являясь при этом индикатором его уровня [8, 15, 28]. Наличие тяжелых металлов (ТМ) в ДО определяется гидродинамическими характеристиками потока [12], физико-химическими процессами, связанными с ТМ, а также их взаимодействием с квазистационарной сорбирующей фазой [1, 2, 4, 5]. Оценка различий проб ДО по

гранулометрическому составу — главный принцип, который позволяет оптимизировать число проб в соответствии с гидрологическими характеристиками объекта. Исследованы участки трех категорий, ранжированные по природно-техногенным признакам, участки IV категории используются для специальных наблюдений [22].

К участкам I категории относятся чаши водохранилищ с сопредельными склонами, на которых расположены промышленные и селитебные зоны, сельхозугодья и прочие техногенные объекты. Само водохранилище характеризуется промывным режимом ниже водопропускных соору-

жений вышерасположенного гидроузла, режимом транзита и локального накопления ТМ в средней части и мощной седиментационной зоной ТМ в приплотинной части. Их минимальное количество откладывается на некотором расстоянии от дамбы сопредельного водохранилища, с постепенным увеличением до сплошного распространения в верхнем бьефе исследуемого водохранилища. Города, промзоны и притоки являются важными факторами как привноса загрязнителей, так и разбавления загрязненных отложений более чистыми наносами. Режим наблюдений для всей чаши водохранилища целесообразно повторять один раз в 5–10 лет при оценке общих тенденций его загрязнения [22]. При рекогносцировочных работах целесообразно опробовать несколько точек по различным наиболее типовым створам. Повторные обследования следует производить с учетом полученных ранее результатов.

На сопредельных городским и поселковым агломерациям территориях (участки II категории) производятся обследования по створам как выше, так ниже агломераций для определения их участия в загрязнении/очищении ДО водного объекта. Эти исследования способствуют пониманию результатов применения природоохранных мероприятий. Повторяемость наблюдений может составлять 2–4 года, в зависимости от динамики загрязнения/очищения ДО.

Малые реки (участки III категории) – более уязвимые водные объекты к поступающим в них загрязнениям [9]. В исключительных случаях, условно чистые наносы таких рек, поступающие в водоприемник, улучшают геоэкологическую ситуацию в последнем. В условно чистых малых реках при отсутствии активной техногенной нагрузки повторение обследований осуществляется один раз в 5–10 лет [19, 21]. В случаях, когда малые реки являются активными аккумуляторами загрязнителей техногенного генезиса, такие участки с промышленными зонами необходимо относить к IV категории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выборе пунктов отбора ДО использованы следующие принципы. Отбор ДО осуществляется на тех участках, где возможно наличие ДО со значительным содержанием иловой фракции. Такие места именуются седиментационными ловушками, так как они энергетически наиболее выгодны для накопления мигрирующих ТМ. Оценка гранулометрического состава отложений, в первую очередь, для отобранных в различных местах водоема, крайне важна, поскольку он определяет, как сорбционную способность отложений, так и их гидрофильность, ионный обмен и другие характеристики. Последние наиболее свойственны глинистым отложениям [13, 18].

Отбор проб ДО осуществлялся из приповерхностного слоя. При использовании методики, описанной в [28, 37, 38], достаточным для исследования считается образец весом около 0.5 кг, из которого впоследствии выделяется “сорбирующая фракция” размером менее 0.020 мм методом мокрого просеивания [34, 38]. Согласно методике, полученный материал выпаривается и высушивается до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре не выше +60°C [28, 37]. Определение концентраций ТМ в пробах ДО проводится методом ИСП, а для кадмия методом атомной адсорбции после разложения пробы в “царской водке” [28]. Подобная методика используется в ряде стран, например, в Чехии [35].

Проведены исследования ряда объектов Верхней Волги: от оз. Селигер до нижнего бьефа Угличского водохранилища. Озеро Селигер является естественным регулятором стока Верхней Волги от истоков до Ивановского водохранилища. В г. Селижарово воды Селигера впадают в Волгу, и далее до с. Городня находится незарегулированный участок реки, который переходит в Ивановское водохранилище. В свою очередь Ивановское водохранилище переходит в Угличское. Таким образом, рассматривается единая водная система.

В работе приведены уровни содержания в ДО Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, а также Fe и Mn. Уровень аккумуляции ТМ в ДО оценивался с помощью “индекса геоаккумуляции” [37], который характеризует относительную кратность загрязнения ДО относительно природного фона во фракциях ДО менее 0.020 мм. Геохимическая фоновая концентрация элемента принималась по [3, 40]. Уровни загрязнения ДО подразделяются на классы качества по каждому ТМ и мышьяку, когда фоновое значение выбирается с полуторакратным запасом (в сторону увеличения) [36]. На основании классификации [37] при необходимости возможно предоставление информации о загрязнении ДО в виде карт-схем, таблиц, графиков по интересующим элементам.

В процессе исследований наибольшее внимание уделялось изучению ДО Ивановского водохранилища – важного и предположительно наиболее загрязненного из перечисленных объектов. При изучении распределения элементов по формам их нахождения в ДО особое внимание уделялось фракциям, на которые могут повлиять различные условия окружающей среды, для чего использовался метод А. Тессье [39]. Использование последовательных экстракций дает детальную информацию о происхождении, биологической и физико-химической доступности, мобилизации и миграции микроэлементов.

Экстракция 1 — ТМ в обменном комплексе. Адсорбция/десорбция элементов на основных компонентах ДО (глинах, гидратированных оксидах железа и марганца, гуминовых кислотах) зависит от изменения ионного состава воды в водных объектах.

Экстракция 2 — ТМ, связанные с карбонатами. Значительные количества металлов могут быть связаны с карбонатными формами донного осадка; эта фракция очень восприимчива к изменению pH.

Экстракция 3 — ТМ, связанные с оксидами железа и марганца. Окси-гидроксиды железа и марганца существуют в виде конкреций, цементных образований в твердой фазе осадка или просто в виде покрытия на ее частицах. Они являются поглотителями микроэлементов и термодинамически нестабильны в анаэробных условиях — при низком Eh.

Экстракция 4 — ТМ, сорбированные 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 элементов в исследуемых образцах осуществлялось на атомно-абсорбционном спектрометре “КВАНТ — Z.ЭТА-Т” (НПО “КОРТЭК”, г. Москва).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Озеро Селигер. В Селигер впадает более 100 малых рек и ручьев. Чаша озера и сопредельные приводораздельные территории отнесены к участку I категории. Город Осташков, согласно приведенным выше принципам районирования, отнесен к участку II категории. Более мелкие таксоны (участки III и IV категории) не обследовались. Важным элементом территории являются болота, которые служат источниками поступления соединений марганца и железа в чашу озера [14, 23, 27].

Пункты отбора ДО — территории озера от пос. Осцы в южной его части до пос. Залучье и руч. Ускоройня на севере. Особое внимание уделено г. Осташков, где с интервалом в 4 года опробовались ДО значительной части озера. Основные результаты приведены в [20]. В каждом образце были определены: Cd, Hg, Pb, Zn — элементы первого класса опасности; Cu, Ni, Cr, Co, Mo — элементы второго класса опасности; V, W и Mn — элементы третьего класса опасности [24].

Наибольшим загрязнителем из ТМ в ДО оз. Селигер является Cr, шлейф от которого отмечается на расстоянии более 10 км от источника за-

грязнения — заводов г. Осташков [10]. Концентрации хрома в ДО достигают наиболее высоких значений 5–6-го Igeo-классов¹ в Городском плесе. Содержание прочих ТМ не превышает 1–2-го Igeo-классов и вызвано, наряду с влиянием предприятий, также некорректным отношением к геоэкологической ситуации в пределах рекреационных и селитебных территорий. Снижение загрязнения Cr в течение десятилетий не исключено при ослаблении существующего антропогенного и техногенного воздействия на экосистему оз. Селигер, соблюдении норм в отношении обращения со стоками и разбавлении концентрации данного ТМ абрадируемыми отложениями.

Перераспределение ТМ в ДО изученного водного объекта обусловлено динамикой водной толщи. Лопастная конфигурация озера предопределяет специфику ветровых течений [32]. Численное моделирование указывает на наличие десятков зон стоково-ветрового характера протяженностью до нескольких километров [26, 31]. Ветры западных румбов определяют в Городском плесе соответствующие течения, которые обуславливают перераспределение хрома в ДО от техногенного источника на значительной площади дна озера. Юго-западные ветры определяют значимую циркуляционную зону, способствуя загрязнению Cr ДО на весьма больших расстояниях от промзоны. Видимой связи между распространением других ТМ и ветровыми течениями (по [31]) не прослеживается вследствие многочисленности их источников, а также их невысоких концентраций (до умеренного загрязнения). Впоследствии большая часть этих ТМ концентрируется в ДО, увеличивая их загрязненность. В районе г. Осташков в двух точках отмечено умеренное загрязнение свинцом, а в одной точке среднее. Также отмечено умеренное загрязнение цинком, остальные ТМ находятся на уровне фоновых или близких к фоновым значениям. Специфическое загрязнение связано с работой таких предприятий, как завод “Луч”, Кожевенный завод и завод “Звезда” [10]. По данным проведенных исследований за период наблюдений ни ухудшения, ни улучшения экологической ситуации не отмечено.

Верхняя Волга. На берегах Верхней Волги от истока до Ивановского водохранилища расположены: города Тверь, Ржев, Zubцов, Торжок, Старица, поселки городского типа и т.д. Продолжают действовать такие отрасли промышленности, как деревообработка, целлюлозно-бумажная, домостроительная, энергетическая, пищевая, торфодобыча [10]. Сточные воды этих предприя-

¹ Igeo — индекс геоаккумуляции; при расчете учитывают концентрации ТМ в ДО тонкозернистых фракций (<20 мкм) (С) и геохимические фоновые значения (Сф) в иловых или глинистых отложениях.

Таблица 1. Соотношение взвешенных и растворенных форм ТМ в водах на речном участке Верхней Волги и в Ивановском водохранилище

	Ржев	Торжок	Тверь	Эммаус	Городня	Слобода	Шош. плес	Свердлово	Приплотинный участок	
									лето	весна
Cr	11.00	1.20	12.7	0.10	0.20	3.40	4.40	0.60	0.18	0.12
Cd	3.40	1.70	7.00	0.50	0.80	—	—	10.90	0.90	0.48
Cu	0.50	0.14	0.40	0.51	0.55	0.05	0.06	0.31	0.40	0.20
Co	2.10	1.00	0.40	0.40	0.28	0.27	0.05	0.16	0.30	0.26
Pb	2.40	2.70	2.90	0.60	1.00	0.35	0.06	1.00	0.88	0.53
Mn	1.30	4.30	6.60	0.03	0.61	3.20	16.50	7.90	0.11	0.10
Fe	0.26	0.27	0.40	0.04	0.05	0.26	0.05	0.27	0.03	—
Ni	35.00	1.60	12.80	0.27	0.60	1.60	1.20	0.23	0.54	0.40
Zn	1.25	1.12	0.40	0.47	0.16	0.37	1.24	0.21	0.32	0.15
Ti	9.70	1.60	9.20	3.80	—	—	—	2.10	2.40	1.90

Таблица 2. Уровни загрязнения ДО Верхней Волги по Igeo-классам

Место отбора проб	Hg	Cu	Zn	Ni	Co	Pb	Cr	Mn	As	Cd
р. Малая Коша	фон	1	0	1	1	1	0	1	1	фон
4 км выше г. Ржев	фон	0	0	0	0	0	0	2	1	0
г. Ржев мост	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0
5 км ниже г. Зубцов	0	0	фон	0	0	0	0	0	0	0
Устье р. Вазуза	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0
г. Старица мост	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
6 км ниже г. Старица	фон	0	0	0	0	0	0	1	0	0
мкр. Мигалово выше г. Тверь	фон	0	фон	0	0	фон	0	фон	0	0
Ниже г. Тверь	1	2	2	1	0	1	1	фон	1	фон
Устье р. Тверца	фон	1	1	0	0	1	1	2	1	2
р. Городня	1	1	1	0	0	0	0	фон	0	фон

тий, содержащие ТМ, попадая в водный объект, как в виде растворов, так и в виде взвесей, способствуют накоплению ТМ в ДО, формируя потоки рассеяния. Уменьшение скорости течения в водохранилище приводит к осаждению тонких и мелких фракций наносов [6, 7, 11].

На речном участке Верхней Волги металлы Cr, Ni, Pb, Co, Cd, Zn и Mn мигрируют преимущественно в виде взвеси, а Cu и Fe преимущественно в растворенной форме. В водохранилище содержание взвешенных форм в летний период существенно превышает их содержание в весенний период. В результате процессов осаждения взвеси равновесие в водной массе резко сдвигается в сто-

рону растворенных форм ТМ, прежде всего для свинца, хрома, кадмия и никеля (табл. 1).

Изучение состава ДО Верхней Волги осуществлялось от истока Волги до Ивановского водохранилища. В качестве фоновых объектов использовались ДО озер Волго и Пено. Наибольшее загрязнение ДО отмечено в устьях рек Тверца и Вазуза. Часто встречающиеся металлы ниже г. Тверь — медь, цинк, ртуть, никель, свинец, хром и мышьяк (табл. 2).

Оценка форм нахождения некоторых ТМ в ДО фонового участка и участка ниже г. Тверь показала, что такие элементы, как Fe, Cu, Zn связаны с гидроксидами Fe и Mn, а также находятся в кристаллической решетке твердой фазы отложений

Таблица 3. Распределение ТМ и мышьяка по формам нахождения в ДО Иваньковского водохранилища, мг/кг

Точка отбора	As	Cd	Se	Pb	Zn	Co	Ni	Cu	Cr	Sb
Сорбированные в обменном комплексе										
33	0.6	1	0.012	29.8	14	0.10	23.8	33.8	0.8	1.16
34	1	0.6	0.020	21.8	10	0.08	21.8	35.8	0.5	0.82
37	0.6	0.6	0.012	16	6	0.06	20	41.8	0.1	0.5
35	0.2	1	0.004	6	6	0.02	23.8	51.8	0.7	0.5
40	1	0.8	0.020	24	12	0.08	22	26	0.6	1
41	1.4	0.2	0.028	22	10	0.08	28	22	0.4	0.84
45	0.2	0.2	0.004	14	8	0.04	28	28	0.4	0.66
48	0.4	0.2	0.008	12	6	0.04	23.8	49.8	0.4	0.5
Сорбированные на карбонатах										
33	—	0.38	0.002	6.0	1.8	1.68	39.6	19.8	—	—
34	—	1.18	—	—	—	1.02	43.8	6.0	—	—
37	—	1.0	—	—	—	0.04	41.8	12.2	—	—
35	0.8	0.8	0.03	23.8	—	1.48	44.0	2.0	—	—
40	—	0.2	0.014	—	—	1.02	40.0	32.0	—	—
41	—	0.4	—	—	—	0.72	49.6	—	—	—
45	—	1.2	0.002	—	—	0.76	34.2	26.2	—	—
48	—	1.6	—	—	2.0	0.36	37.8	—	—	—
Сорбированные на гидроксидах железа и марганца										
33	0.84	—	0.022	46.4	48.6	0.28	1.0	21.6	4.04	1.90
34	1.16	—	0.034	55.6	43.8	0.78	—	37.2	3.54	1.74
37	0.48	0.20	0.016	84.8	55.2	2.42	11.4	28.8	4.50	2.40
35	—	0.72	—	60.2	37.2	0.76	0.6	55.0	2.54	1.56
40	—	1.88	—	47.8	20.4	0.7	—	17.4	1.82	0.54
41	—	—	—	10.4	18.8	—	—	102.4	1.76	0.52
45	0.52	—	0.012	25.4	9.8	0.38	—	20.8	0.94	0.22
48	—	—	—	31.0	9.8	0.68	2.8	36.0	0.94	0.34

(глинистая фракция ДО представлена смектитом, каолинитом, иллитом и хлоритом [18]). На участке, где в ДО прослеживается шлейф загрязняющих ТМ от г. Тверь, поступающих со сточными водами и поверхностным стоком, вышеуказанные элементы находятся в подвижных формах. Переход этих элементов из ДО в водную толщу не исключен, но их малое количество определяет их как малозначимый источник вторичного загрязнения. Исходя из полученных данных, целесообразно отнести Верхнюю Волгу от г. Селижаров до г. Тверь к участку III категории мониторинга, а г. Тверь — как промышленно-селитебную зону и источник диффузного загрязнения — к участку II категории мониторинга с повторением наблюдений каждые 5 лет.

Иваньковское водохранилище. Иваньковское водохранилище используется как для регулирования стока р. Волги, так и водоснабжения

г. Москва, его площадь составляет 327 км², а площадь водосбора 4100 км² [16]. Распределение содержания исследуемых ТМ по формам нахождения в изученных районах водохранилища приведено в табл. 3. Точки отбора № 35, 34, 33 расположены на Волжском плесе напротив с. Городня, д. Мелково и д. Плоски — сверху вниз по течению. Точка № 37 расположена в Шошинском плесе между автомастами; точки 40, 41, 45, 48 — напротив урочища (ур.) Корчева, о. Уходово, Коровинского залива и входа в канал им. Москвы соответственно [30].

Из данных табл. 3 следует, что 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 начале Иваньковского водохранилища, в районе с. Го-

Таблица 4. Суммарное содержание подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка (числитель, мг/кг) и их значения в Igeo-классах (знаменатель) в пунктах отбора проб

Точка отбора	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	4.60/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

родня, подавляющая часть As (80%) представлена формой, сорбированной на карбонатах, что может в частности объясняться активным смывом почв с левого берега и их последующим отложением.

Что касается Cd, его “обменная” составляющая снижается вниз по течению, от начала к концу водохранилища, в то же время “карбонатная” форма в районе дамбы становится превалирующей. В районе ур. Корчева более 60% Cd находится в сорбированной форме на гидроксидах железа и марганца, что может объясняться привнесом этих элементов с болотистых берегов. Металлы Pb и Zn также связаны с “гидроксидными” формами железа и марганца на значительной площади водохранилища, за исключением участка от островов Клиницы и Уходо до Коровинского залива, на котором от 40 до 60% представлены их ионообменными формами.

Основная форма существования в ДО Co и Ni – “карбонатная”, составляет для Co до 80–90% и для Ni 50–60%, за исключением Шошинского плеса и входа в канал им. Москвы, где формы Co и Ni, связанные с гидроксидами, составляют 90% для первого и 60% для второго. Вторая определяющая форма для Ni – “обменная”. Таким образом, подвижная форма Ni практически целиком находится в доступной фазе, наиболее подверженной распаду с последующим выходом (иммобилизацией) металла в водную массу при изменении гидрохимических окислительно-восстановительных условий.

Содержание Cu в большинстве исследованных районов также находится в основном в “обменной” и “карбонатной” формах, но около 30–40% – в “гидроксидной”. Только в районе о. Уходо “гидроксидная” форма составляет 80% всей суммы подвижных соединений. Также на гидроксидах железа и марганца сорбировано 70–90% содержания подвижного Cr.

Для оценки потенциального вторичного загрязнения рассчитаны суммы подвижных соеди-

нений микроэлементов, исходя из возможности их полного выхода из донных отложений, и оценены по системе Igeo-классов; значения приведены в табл. 4.

Наибольший уровень загрязнения ДО отмечен для Cd (3 Igeo-класс) в районе с. Городня на входе в водохранилище и в Ивановском плесе напротив ур. Корчева. В других изученных районах суммарное содержание Cd в подвижных формах ДО соответствует 2 Igeo-классу. Согласно классификации [37], 3-й Igeo-класс соответствует средне загрязненному уровню, 2-й Igeo-класс – умеренно загрязненному уровню. Согласно классификации [19], оба эти класса соответствуют умеренной (умеренно опасной) техногенной нагрузке.

Содержание Pb от с. Городня до ур. Корчева соответствует уровню 2-го Igeo-класса. Далее по течению вплоть до канала им. Москвы содержание Pb снижается до 1-го Igeo-класса, что соответствует “незагрязненному до умеренно загрязненного” уровню загрязнения и слабой (малоопасной) техногенной нагрузке. Содержание Cu по всей площади водохранилища находится на уровне 1-го Igeo-класса. Содержания всех остальных изученных элементов либо в пределах фона, либо не превышают нулевой Igeo-класс (незагрязненный уровень).

Промышленно-селитебной зоной на берегу водохранилища является г. Конаково. В ДО напротив города (под ЛЭП) вблизи правого берега, средне загрязненному уровню, или 2-му Igeo-классу, соответствует только содержание Zn. Содержания Cr и Pb находятся на уровне 1-го Igeo-класса, содержание остальных элементов – на фоновом либо незагрязненном уровне.

В предыдущих исследованиях [29] был сделан вывод, что именно изменение содержания ТМ в подвижных формах способствует изменению их валового содержания в ДО. Возможный вынос элементов из ДО не будет превышать их суммарные концентрации в подвижных соединениях. Исходя из полученных данных, потенциальный

вынос исследуемых ТМ из отложений не является значительным, и о серьезной опасности вторичного загрязнения говорить не приходится. Все пункты отбора проб на формы существования ТМ в ДО относятся к I категории. Поскольку уровни загрязнения металлами и их потенциальный вынос не значительны, целесообразно повторять исследования один раз в 5–10 лет. Район отбора проб ДО в районе г. Конаково следует отнести к II категории. При изучении внутригодовой динамики подвижных форм ТМ (как и точки отбора в районе д. Плоски и на Шошинском плесе [29]) данный район следует отнести к участкам IV категории.

Угличское водохранилище. Водохранилище относится к участку I категории. В ходе первичных исследований было отобрано 30 проб ДО, из которых 6 – в верхнем бьефе плотины, и 9 проб ДО на основных притоках. При повторных работах, спустя пять лет, отобраны 25 проб, из которых 4 – в верхнем бьефе плотины. Максимальная плотность отбора проб ДО была вблизи городов: Дубна, Кимры, Белый Городок, Калязин, Кашин.

Основными загрязнителями ДО водного объекта являются Cd, Zn и Hg. Отмечено, что содержание Zn в последние годы на всей территории уменьшилось по сравнению с началом 2000-х гг. [17], в то время как содержание Cd увеличилось. Наибольшее загрязнение ТМ и мышьяком ДО отмечено на участке между г. Дубна и г. Белый Городок. Значение загрязнений для Zn – 1–3-й Igeo-классы, для Hg – 2-й Igeo-класс и для As – 1-й Igeo-класс. В последние годы отмечается постепенное снижение концентраций Hg и As вниз по течению от Дубны до Углича. В верхнем бьефе плотины содержание металлов и мышьяка в ДО не превышает фоновые значения. В начале века наблюдалась разнородная картина распространения ТМ и мышьяка по пунктам опробования. В настоящее время она существенно изменилась за счет перераспределения ДО по площади водохранилища и выглядит более однородной. Для ДО водохранилища характерно повсеместное повышенное содержание Mn, которое можно сопоставить с 1-м и 2-м Igeo-классами. В целом содержание ТМ и As в ДО водохранилища оценивается как допустимое.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшим загрязнителем ДО оз. Селигер является Cr, шлейф от которого продолжает отмечаться на расстоянии более 10 км от источника загрязнения. Содержание хрома в ДО достигает наиболее высоких значений (5–6 Igeo-классы) в Городском плесе. Другие изученные ТМ в ДО озера не являются опасными при существующей геоэкологической ситуации.

2. Снижение загрязнения Cr в течение десятилетий не исключено при ослаблении существующего антропогенного и техногенного воздействия на экосистему оз. Селигер, соблюдении норм в отношении обращения со стоками и разбавлении концентрации данного ТМ абрадированными отложениями.

3. Соотношения взвешенных и растворенных форм ТМ в Верхней Волге и Иваньковском водохранилище указывают на существенные различия на исследованных участках. На речном участке Cr, Ni, Pb, Co, Cd, Zn и Mn мигрируют преимущественно в виде взвеси, а Cu и Fe преимущественно в растворенной форме. Содержание взвешенных форм в меженный период в водохранилище существенно превышает их содержание в половодье. Осаждение взвеси сдвигает равновесие в сторону растворенных форм ТМ, прежде всего для свинца, хрома, кадмия и никеля.

4. Загрязнение металлами ДО Верхней Волги незначительно превышает фон. Fe, Zn, Cu, Cr связаны с гидроксидами Fe и Mn, а ниже г. Тверь находятся преимущественно в поверхностно-сорбированных формах, что объясняется процессами сорбции ТМ, находящихся в сточных водах. Эти ТМ могут поступать в речную воду, но их незначительное количество ниже города в настоящее время не определяет этот техногенный поток рассеяния элементов в качестве опасного источника вторичного загрязнения водных масс.

5. При изучении ДО Иваньковского водохранилища установлено, что Pb, Zn и Cr находятся в форме, связанной с гидроксидами железа и марганца; Co, Cd, Ni, Cr и Cu находятся в ионообменной и карбонатной формах. Содержание и распределение ТМ по формам существования зависят от меняющегося соотношения приходной и расходной составляющих баланса веществ, гидродинамической обстановки в придонном слое водной толщи, физико-химических условий в верхнем слое ДО.

6. В ДО Иваньковского водохранилища отмечены наибольшие уровни загрязнения суммарными концентрациями подвижных соединений Cd и Pb, которые, однако, не превышают 2-го Igeo-класса, или “умеренно загрязненного” уровня. Возможный вынос металлов из ДО не будет превышать данные концентрации, поэтому о серьезной опасности вторичного загрязнения исследуемыми элементами говорить не приходится.

7. Загрязнение ДО Угличского водохранилища оценено по постоянным пунктам отбора проб в различные годы. Отмечены изменения загрязнения ДО за период наблюдений, во всех точках наблюдается превышение концентраций Cd и Zn над фоновыми значениями. В настоящее время за счет перераспределения ДО по площади водохра-

нилища загрязнение отложений выглядит более однородным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веницианов Е.В., Салтанкин В.П. Мониторинг дна // Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. С. 110–132.
2. Веницианов Е.В. Некоторые особенности сорбции тяжелых металлов слоем донных осадков и почвогрунтов // Водные ресурсы. 1997. № 3. С. 29–35.
3. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.
4. Водохранилище Воткинской ГЭС / Под ред. Ю.М. Матарзина. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1968. 164 с.
5. Данилов-Данильян В.И. Показатели эффективности внедрения концепции по снижению диффузного загрязнения в бассейне Волги в экономической и экологической сферах // Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. М.: Институт водных проблем РАН, 2020. С. 399–405.
6. Данилов-Данильян В.И. Национальный приоритетный проект “Оздоровление Волги”: первый шаг к нормализации экологического состояния бассейна великой реки // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. трудов конференции. М.: Студия Ф1, 2019. С. 12–16.
7. Данилов-Данильян В.И., Полянин В.О., Фащевская Т.Б., Кирпичникова Н.В. и др. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохраных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514.
8. Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наукова думка, 1987. 164 с.
9. Ерина О.Н., Шинкарева Г.Л., Терешина М.А., Соколов Д.И. и др. Накопление химических элементов в микрочастицах речной взвеси // Эколого-экономическая безопасность горнопромышленных регионов. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2022. С. 91–106.
10. Заводы города Осташков Тверской области. URL: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/factories/ostashkov> Дата обращения 02.07.2021.
11. Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада в XXI веке // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Пермь: ПГНИУ, 2021. С. 89–94.
12. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2018. № 81 (84). С. 35–46.
13. Зюзин Б.Ф., Юдин С.А. Обобщенный вариант прочности торфяных структур // Труды Инсторфа. 2014. № 9 (62). С. 25–29.
14. Иванов Г.Н. Динамика загрязнения водных экосистем озера Селигер тяжелыми металлами // Труды Инсторфа. 2014. № 9 (62). С. 16–24.
15. Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Методы оценки загрязнения донных отложений тяжелыми металлами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2021. № 1 (9). С. 79–86.
16. Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны // В.А. Абакумов, Н.П. Ахметьева, В.Ф. Бреховских и др. М.: Наука, 2000. 344 с.
17. Коломийцев Н.В., Ильина Т.А. Распределение тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях Угличского водохранилища // Мелиорация и водное хозяйство. 2008. № 6. С. 10–13.
18. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Аверкина Т.И., Самарин Е.Н. Характеристика состава донных отложений озера Селигер и Иваньковского водохранилища // Сергеевские чтения. Вып. 18. М.: РУДН, 2016. С. 58–62.
19. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Гетьман Е.Н. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.
20. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Толкачев Г.Ю. Миграция тяжелых металлов в донных отложениях озера Селигер // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 6. С. 8–14.
21. Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В., Ильина Т.А., Гетьман Н.О. Мониторинг загрязнения автотранспортом малых рек Московской области тяжелыми металлами // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 4 (208). С. 24–29.
22. Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А., Коломийцев Н.В. Основные принципы мониторинга загрязнения большой реки (на примере бассейна реки Волги) // Строймного. 2017. № 2 (7). С. 1–7.
23. Косов В.И., Иванов Г.Н., Левинский В.В. Исследования загрязнения тяжелыми металлами донных отложений Верхней Волги // Вестник Тверского государственного технического университета. 2002. № 1. С. 5–9.
24. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна // Под ред. А.С. Керженцева, Р. Майснера. М.: Наука, 2006. 223 с.
25. Сает Ю.Е., Янин Е.П. О комплексном составе техногенных гидрохимических аномалий // Водные ресурсы. 1991. № 2. С. 135–140.
26. Силантьева О.А., Бруль Т.Н. Современное геоэкологическое состояние акватории и прибрежных территорий озера Селигер // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ “Грани познания”. № 6 (65). 27 ноября 2019. С. 114–117. URL: www.grani.vspu.ru.

27. Суслова С.Б., Шилькрот Г.С., Кудерина Т.М. Гидро-геохимическая характеристика вод Селигера и Верхневолжских озер (по многолетним данным) // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в европейской России и сопредельных странах. Матер. VI Междунар. науч. конф. / Отв. ред. Голеусов П.В. Белгород: Политерра, 2015. С. 324–328.
28. Техногенное загрязнение речных экосистем / Под ред. В.Е. Райнина и Г.Н. Виноградовой. М.: Научный Мир, 2002. 140 с.
29. Толкачев Г.Ю., Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И. Миграция и трансформация форм тяжелых металлов на водосборной территории и в донных отложениях Иваньковского и Угличского водохранилищ // Мелиорация и водное хозяйство. 2017. № 6. С. 35–39.
30. Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Сравнительная характеристика форм существования тяжелых металлов в донных отложениях Иваньковского водохранилища в 2001–2002 и 2021 годах // Экологические системы и приборы. 2022. № 11. С. 3–12.
31. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 166 с.
32. Цыганов А.А. Морфометрия плесов и островов озера Селигер // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2011. № 1. С. 35–48.
33. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. 52 с.
34. Ackermann F. A Procedure for Correcting the Grain Size Effect in Heavy Metal Analysis // Environmental Technology. 1980. Lett. 1. P. 518–527.
35. Fuchik P., Novak P., Zizhala D. A combined statistical approach for evaluation of the effects of land use, agricultural and urban activities on stream water chemistry in small tile-drained catchments of south Bohemia, Czech Republic // Environmental Earth Sciences. V. 72. № 6. 2014. P. 2195–2216.
36. Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C. Geochemical background – can we calculate it? // Environmental Geology. V. 39. № 9. 2000. P. 990–1000.
37. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. S. 778–783.
38. Mueller G., Ottenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µM or <2 µM? // Fresenius' J. of Analytical Chemistry. 2001. V. 371. № 5. P. 637–642.
39. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // Analytical chemistry. 1979. V. 51. № 7. P. 844–851.
40. 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. V. 72. P. 175–192.

MONITORING OF SEDIMENT POLLUTION FOR VARIOUS WATER BODIES IN THE UPPER VOLGA REGION

G. Yu. Tolkachev^{a,#}, B. I. Korzhenevskiy^{a,##}, and N. V. Kolomiitsev^{a,###}

^aKostyakov All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Amelioration,
B. Akademicheskaya ul. 44, Moscow, 127434 Russia

[#]E-mail: k-26@yandex.ru

^{##}E-mail: 542609@list.ru

^{###}E-mail: kolomiitsev@vniigim.ru

The problem of water body pollution with heavy metals is still relevant. From the viewpoint of technogenic load, the most hazardous pollutants are elements Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, and As. To systematize the research, the objects of different hierarchical levels were identified. Based on many years of experimental work, contamination of sediments with heavy metals was assessed for the Upper Volga system, i.e., Lake Seliger, an unregulated section of the Upper Volga, Ivankovskoe and Uglichskoe reservoirs. The largest taxon is the basin of the reservoir with the adjoining watershed area with cities and towns located on it, tributaries of various orders, smaller elements of natural and natural-technogenic relief. Urban and settlement agglomerations located on the coasts of reservoirs and unregulated areas or within watersheds are smaller in area, but no less significant in their role in water body pollution. Small rivers contribute to pollution/purification, which can contribute to the flow of both clean and polluted silty material into large watercourses. Different areal and temporal survey modes are offered for taxa of different hierarchy. The practical results of studies of the content in sediments of the listed objects of heavy metals – Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, Fe and Mn are presented. Described or provided references to the methods used in the experiments. The general picture of pollution is presented and the tendencies of its change in space and time are noted.

Keywords: monitoring, heavy metals, pollution, taxa, category sites, sediments, water bodies

REFERENCES

1. Venitsianov, E.V., Saltankin, V.P. *Monitoring dna* [Monitoring of the bottom]. *Nauchnye osnovy sozdaniya sistem monitoringa kachestva prirodnikh poverkhnostnykh sistem* [Scientific foundations of the creation of systems for monitoring the quality of natural surface water]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2016, pp. 110–132. (in Russian)
2. Venitsianov, E.V. *Nekotorye osobennosti sorbtzii tyazhelykh metallov sloem donnykh osadkov i pochvogruntov* [Some features of sorption of heavy metals by a layer of sediments and soils]. *Vodnye resursy*, 1997, no. 3, pp. 29–35. (in Russian)
3. Vinogradov, A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered elements in soils]. Moscow, AN SSSR Publ., 1957, 235 p. (in Russian)
4. *Vodokhranilishche Votkinskoi GES* [Reservoir of the Votkinskaya hydroelectric power station] Yu.M. Matarzin, Ed., Perm, Perm university Publ., 1968, 164 p. (in Russian)
5. Danilov-Danilyan, V.I. *Pokazateli effektivnosti vnedreniya kontseptsii po snizheniyu diffuznogo zagryazneniya v basseine Volgi v ekonomicheskoi i ekologicheskoi sferakh* [Indicators of the effective implementation of the concept of reducing diffuse pollution in the Volga basin in the economic and environmental aspects]. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions. Moscow, Institute of Water Problems RAS, 2020, pp. 399–405. (in Russian)
6. Danilov-Danilyan, V.I. *Natsional'nyi prioritetnyi projekt "Ozдорovlenie Volgi": pervyy shag k normalizatsii ekologicheskogo sostoyaniya basseina velikoi reki* [National priority project "Improving the Volga River": the first step to normalizing the ecological state of the great river basin]. Scientific problems of improving Russian rivers and ways to solve them. Moscow, Sudiya F1 Publ., 2019, pp. 12–16. (in Russian)
7. Danilov-Danilyan, V.I., Polyanin, V.O., Fashchevskaya, T.B., Kirpichnikova, N.V., et al. *Problemy snizheniya diffuznogo zagryazneniya vodnykh ob'ektov i povyshenie effektivnosti vodokhranennykh programm* [The problem of reducing diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water conservation programs]. *Vodnye resursy*, 2020, vol. 47, no. 5, pp. 503–514. (in Russian)
8. Denisova, A.I., Nakhshina, E.P., Novikov, B.I., Ryabov, A.K. *Donnye otlozheniya vodokhranilishch i ikh vliyaniye na kachestvo vody* [The sediments of reservoirs and their influence on water quality]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 164 p. (in Russian)
9. Erina, O.N., Shinkareva, G.L., Tereshina, M.A., Sokolov, D.I., et al. *Nakopleniye khimicheskikh elementov v mikrochastitsakh rechnoi vzvesi* [Accumulation of chemical elements in microparticles of river suspension]. *Ekologo-ekonomicheskaya bezopasnost' gornopromyshlennykh regionov* [Ecological and economic security of mining regions]. Yekaterinburg, Institute of Economics, Ural Division RAS, 2022, pp. 91–106. (in Russian)
10. *Zavody goroda Ostashkov Tverskoi oblasti* [Factories in the city of Ostashkov, the Tver region]. URL: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/factories/ostashkov> (Accessed 02.07.2021). (in Russian)
11. Zakonnov, V.V. *Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada v XXI veke* [Sedimentation in reservoirs of the Volga cascade in the XXI century]. *Sovremennyye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov* [Modern problems of reservoirs and their catchment areas]. Proc. of the VIII All-Russia Sci. and Pract. Conf. Perm, PGNIU, 2021, pp. 89–94. (in Russian)
12. Zakonnov, V.V., Zakonnova, A.V., Tsvetkov, A.I., Sherysheva, N.G. *Gidrodinamicheskie protsessy i ikh rol' v formirovaniye donnykh osadkov vodokhranilishch Volzhsko-Kamskogo kaskada* [Hydrodynamic processes and their role in the formation of sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade]. Proc. Papanin Institute of Biology of Inland Waters RAS, 2018, no. 81 (84), pp. 35–46. (in Russian)
13. Zyuzin, B.F., Yudin, S.A. *Obobshchennyi variant prochnosti torfyanykh struktur* [Generalized version of the strength of peat structures]. *Trudy Instorfa*, 2014, no. 9 (62), pp. 25–29. (in Russian)
14. Ivanov, G.N. *Dinamika zagryazneniya vodnykh ekosistem ozera Seliger tyazhelymi metallami* [Dynamics of pollution of aquatic ecosystems of Lake Seliger by heavy metals]. *Trudy Instorfa*, 2014, no. 9 (62), pp. 16–24. (in Russian)
15. Ivanov, G.N., Krivenko, I.V., Smirnova, M.A., Ispiryanyan, S.R. *Metody otsenki zagryazneniya vodnykh otlozhenii tyazhelymi metallami* [Methods for assessing contamination of sediments by heavy metals]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskie tekhnologii*, 2021, no. 1 (9), pp. 79–86. (in Russian)
16. *Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyaniye i problemy okhrany* [Ivan'kovskoe reservoir: Current state and problems of protection]. V.A. Abakumov, N.P. Akhmet'eva, V.F. Brekhovskikh et al. Moscow, Nauka Publ., 2000, 344 p. (in Russian)
17. Kolomiitsev, N.V., Ilyina, T.A. *Raspredeleniye tyazhelykh metallov i mysh'yaka v donnykh otlozheniyakh Uglichskogo vodokhranilishcha* [Distribution of heavy metals and arsenic in the sediments of Uglich reservoir]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2008, no. 6, pp. 10–13. (in Russian)
18. Kolomiitsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Averkina, T.I., Samarin, E.N. *Kharakteristika sostava donnykh otlozhenii ozera Seliger i Ivan'kovskogo vodokhranilishcha* [Characteristics of the composition of sediments of Lake Seliger and Ivankovsky reservoir]. *Sergeev readings*, issue 18, V.I. Osipov, Ed., 2016, pp. 58–62. (in Russian)
19. Kolomiitsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Il'ina, T.A., Get'man, E.N. *Otsenka tekhnogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty po zagryaznennosti donnykh otlozhenii* [Assessment of technogenic load on water bodies by pollution of sediments]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2015, no. 6, pp. 15–19. (in Russian)
20. Kolomiitsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Il'ina, T.A., Tolkachev, G.Yu. *Migratsiya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozera Seliger* [Migration of heavy metals in sediments of Lake Seliger]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2021, no. 6, pp. 8–14. (in Russian)

21. Korzhenevskii, B.I., Kolomiitsev, N.V., Il'ina, T.A., Get'man N.O. *Monitoring zagryazneniya avtotransportom malykh rek Moskovskoi oblasti tyazhelymi metallami* [Monitoring of pollution by motor transport of small rivers of the Moscow region with heavy metals]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2018, no. 4 (208), pp. 24–29. (in Russian)
22. Korzhenevskii, B.I., Tolkachev, G.Yu., Il'ina, T.A., Kolomiitsev, N.V. *Osnovnye printsiipy monitoringa zagryazneniya bol'shoi reki (na primere basseina reki Volgi)* [Basic principles of pollution monitoring of a large river (on the example of the Volga River basin)]. *StroyMnogo*, 2017, no. 2 (7), pp. 1–7. (in Russian)
23. Kosov, V.I., Ivanov, G.N., Levinskii, V.V. *Issledovaniya zagryazneniya tyazhelymi metallami donnykh otlozhenii Verkhnei Volgi* [Studies of bottom sediment pollution with heavy metals of the Upper Volga region]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, no. 1, pp. 5–9. (in Russian)
24. *Modelirovanie erozionnykh protsessov na territorii malogo vodosbornogo basseina* [Modeling of erosion processes in the territory of a small catchment basin]. A.S. Kerzhentsev, R. Meissner, Eds., Moscow, Nauka Publ., 2006, 223 p. (in Russian)
25. Saet, Yu.E., Yanin, E.P. *O kompleksnoy sostave tekhnogennykh gidrokhimicheskikh anomalii* [On the complex composition of technogenic hydrochemical anomalies]. *Vodnye resursy*, 1991, no. 2, pp. 135–140. (in Russian)
26. Silantyeva, O.A., Brul, T.N. *Sovremennoe geoekologicheskoe sostoyanie akvatorii i pribrezhnykh territorii ozera Seliger* [The modern geoecological state of the water area and coastal territories of Lake Seliger]. *Grani poznaniya*, no. 6 (65), November 27, 2019. URL: www.grani.vspu.ru, pp. 114–117. (in Russian)
27. Suslova, S.B., Shilkrot, G.S., Kuderina, T.M. *Gidrogeokhimicheskaya kharakteristika vod Seligera i Verkhnevolzhskikh ozer (po mnogoletnim dannym)* [Hydrogeochemical characteristics of Seliger and Upper Volga lakes waters (according to long-term data)]. *Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v evropeiskoi Rossii i sopredel'nykh stranakh* [Problems of nature management and ecological situation in European Russia and neighboring countries]. Proc. VI Int. Sci. Conf., Goleusov, P.V., Ed., Belgorod, Polyterra Publ., 2015, pp. 324–328. (in Russian)
28. *Tekhnogennoe zagryaznenie rechnykh ekosistem* [Technogenic pollution of river ecosystems]. V.E. Rainin and G.N. Vinogradova, Eds., Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2002, 140 p. (in Russian)
29. Tolkachev, G.Yu., Kolomiitsev, N.V., Korzhenevskii, B.I. *Migratsiya i transformatsiya form tyazhelykh metallov na vodosbornoi territorii i v donnykh otlozheniyakh Ivan'kovskogo i Uglichskogo vodokhranilishch* [Migration and transformation of forms of heavy metals in the catchment area and in the sediments of the Ivan'kovskoe and Uglichskoe reservoirs]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2017, no. 6, pp. 35–39. (in Russian)
30. Tolkachev, G.Yu., Korzhenevskii, B.I., Kolomiitsev, N.V. *Sravnitel'naya kharakteristika form sushchestvovaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh Ivan'kovskogo vodokhranilishcha v 2001–2002 i 2021 godakh* [Comparative characteristics of the forms of existence of heavy metals in the sediments of the Ivan'kovskoe reservoir in 2001–2002 and 2021]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2022, no. 11, pp. 3–12. (in Russian)
31. Filatov, N.N. *Dinamika ozer* [Dynamics of lakes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 166 p. (in Russian)
32. Tsyganov, A.A. *Morfometriya plesov i ostrovov ozera Seliger* [Morphometry of reaches and islands of Lake Seliger]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya i geokologiya*, 2011, no. 1, pp. 35–48. (in Russian)
33. Yanin, E.P. *Tekhnogennye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody otsenki)* [Technogenic geochemical associations in sediments of small rivers (composition, features, and assessment methods)]. Moscow, IMGRE Publ., 2002, 52 p. (in Russian)
34. Ackermann, F.A. Procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analysis. *Environmental Technology*, 1980, Lett.1, pp. 518–527.
35. Fuchik, P., Novak, P., Zizhala, D. A combined statistical approach for evaluation of the effects of land use, agricultural and urban activities on stream water chemistry in small tile-drained catchments of south Bohemia, Czech Republic. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 72, no. 6, pp. 2195–2216.
36. Matschullat, J., Ottenstein, R., Reimann, C. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*, vol. 39, no. 9, 2000, pp. 990–1000.
37. Mueller, G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungenseit 1971. *Umschau* 79, 1979, H. 24, pp. 778–783. (in German).
38. Mueller, G., Ottenstein, R., Yahya, A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µM or <2 µM? // *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, vol. 371, no. 5, pp. 637–642.
39. 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.
40. 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.