

DOI 10.37882/2223-2966.2022.12-2.18

# МИГРАЦИЯ И БИОКОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ВОДА — ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ — РАСТЕНИЯ» КЛЯЗЬМИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

## MIGRATION AND BIOCONCENTRATION OF HEAVY METALS IN THE «WATER — BOTTOM SEDIMENTS — PLANTS» SYSTEM OF THE KLYAZMA RESERVOIR

**S. Kurbatov  
V. Zubkova  
A. Gaponenko**

*Summary.* Based on the monitoring of the water area of the Klyazma reservoir, the quality of water, sediments and macrophytes for heavy metal pollution was analyzed. It has been established that the water of the Klyazma reservoir in all the studied sites has a high degree of contamination according to the total effect of compounds with a toxicological indicator of harmfulness. Bottom sediments contaminated with heavy metals in all storages have an acceptable degree of contamination. Isolated cases of exceeding the approximately permissible concentrations of zinc in the range 1 (3.6 APC) were noted. The high absorption capacity of *Typha latifolia* L. in relation to Mn, Fe, Zn has been established. In relation to Cu and Pb, the absorption capacity of *Lemna minor* L. was higher than *Typha latifolia* L.

*Keywords:* bottom sediments, aquatic plants, monitoring, heavy metals, limiting hazard index, biological absorption coefficient.

**Курбатов Сергей Андреевич**

Аспирант, Российский государственный  
социальный университет Москва  
mo-kurbatov@m-obvu.ru

**Зубкова Валентина Михайловна**

Д.б.н., профессор, Российский государственный  
социальный университет Москва  
vmzubkova@yandex.ru

**Гапоненко Альбина Вячеславовна**

К.п.н., доцент, Российский государственный  
социальный университет Москва  
gaponenkoav@rgsu.net

*Аннотация.* На основе мониторинга акватории Клязьминского водохранилища проанализировано качество воды, донных отложений и макрофитов по загрязнению тяжелыми металлами. Установлено, что вода Клязьминского водохранилища во всех исследуемых створах по суммарному действию соединений с токсикологическим показателем вредности имеет высокую степень загрязнения. Донные отложения по загрязнению ТМ во всех сторах имеют допустимую степень загрязнения. Отмечены единичные случаи превышения ориентировочно допустимых концентраций по цинку в створе 1 (3,6 ОДК). Установлена высокая поглотительная способность *Typha latifolia* L. по отношению к Mn, Fe, Zn. По отношению к Cu и Pb поглотительная способность *Lemna minor* L. была выше, чем *Typha latifolia* L.

*Ключевые слова:* донные отложения, водные растения, мониторинг, тяжелые металлы, лимитирующий показатель вредности, коэффициент биологического поглощения.

**В**одные объекты являются компонентами окружающей среды, на которых в первую очередь проявляется техногеохимическое воздействие человека. Сложившаяся система контроля и мониторинга аквальных экосистем базируется на анализе водной среды, характеризующейся динамичностью, неустойчивостью концентрации и состава химических элементов во времени, что значительно снижает её информативность и индикаторную роль в исследованиях. В настоящее время при эколого-геохимической оценке состояния водных объектов большее значение придается анализу депонирующих сред: высшей водной растительности и донным отложениям [5;8].

Среди широкого спектра загрязнителей водной среды наиболее важное значение имеют тяжелые металлы,

обладающие канцерогенными, мутагенными и патогенными свойствами даже при низких концентрациях, отличающиеся биологической активностью, высокой технофильностью, отсутствием природных процессов деструкции в ландшафте.

Источниками поступления поллютантов в водоемы являются промышленные предприятия, сельскохозяйственные объекты, территории населенных пунктов и объектов рекреации, промышленные площадки и свалки отходов, емкости для хранения нефтепродуктов и химических веществ, системы канализации, объекты коммуникаций (автодороги, стоянки) и другие [6;7].

Способность макрофитов накапливать химические элементы положена в основу мониторинга за со-



Рис. 1. Карта мест отбора проб воды Клязьминского водохранилища

стоянием высших водных растений, а также среды их произрастания. Высшая водная растительность (ВВР, макрофиты) — важнейший компонент экосистем континентальных водоемов. Велико её значение в процессах формирования качества воды и биологического режима водохранилищ. Особенно велика роль высшей водной растительности в водных объектах, испытывающих значительную антропогенную нагрузку, так как она играет главную роль в поддержании биотического баланса, участвуя как непосредственно, так и опосредованно в очистке водоема от загрязнений, поглощая их. Поэтому водные и околководные растения могут служить весьма информативным показателем степени загрязнения экосистемы водного объекта [16;18].

Учитывая избирательную способность макрофитов к поглощению различных веществ, можно использовать водные растения как индикаторы присутствия загрязнителей в водной среде. Растения проявляют значительную устойчивость к кратковременным всплескам загрязнения, однако могут накапливать поллютанты в тканях в больших количествах без видимых функциональных изменений. В наибольшей мере это относится к тяжелым металлам (ТМ), которые в отличие от органических поллютантов не способны разрушаться до безопасных форм. Поэтому содержание ТМ в золе растений — важная характеристика состояния загрязнения экосистемы [6;11].

Целью исследований явилось количественное определение Mn, Fe, Cu, Zn, Pb в воде, донных отложениях и высшей водной растительности Клязьминского водохранилища, относящегося к водохранилищам водораздельного бьефа Канала имени Москвы.

### Методы

Полевые исследования, проведенные в условиях 2022 г., включали отбор проб воды, донных отложений, растений в четырех створах, равномерно распределённых по акватории водохранилища (рис. 1).

Анализы выполнены на базе аккредитованной лаборатории ООО «НПЦ «Промэнерго» с использованием общепринятых методик, внесенных в Реестр количественного химического анализа (КХА) и допущенных для государственного и производственного экологического контроля.

При отборе проб воды руководствовались требованиями ГОСТ 31861 и рекомендациями Р52.24.353 [4;15].

Оценку качества воды осуществляли по лимитирующим показателям вредности, с учетом суммарного действия загрязняющих веществ одной группы ЛПВ и одного класса опасности. Лимитирующие показатели

Таблица 1. Содержание ТМ в воде Клязьминского водохранилища, в долях ПДКрх.

Створ	Элементы				
	Железо общее	Марганец, 2+	Медь	Свинец	Цинк
1	16,70	13,00	5,40	0,33	1,20
2	9,10	12,00	4,90	0,40	1,00
3	6,40	9,00	2,60	0,33	1,40
4	3,60	8,00	2,00	0,33	1,00
ПДК (мг/л)	0,1	0,01	0,001	0,006	0,01

вредности устанавливали в соответствии с приказом Минсельхоза России № 552 [13].

Работы по отбору проб донных отложений проводили в летнюю межень 2022 года в соответствии с ГН 2.1.7.2041–06, ГОСТ 17.1.5.01–80 и М–МВИ-80–2008 [5;9].

Содержание ТМ в анализируемых образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием прибора «Спектр 5–4».

Оценку качества донных отложений проводили в сравнении с ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК) для почв, установленных СанПиНом 1.2.3685–21 [12].

Растения исследовали в летнюю межень 2022 г, когда растительная флора накапливает наибольшую массу. В качестве тест-объектов выбраны растения, отличающиеся степенью контакта их с водной средой,— рогоз широколистный (*Typha latifolia* L), формирующий прибрежную полосу растительности водоема, и ряску малую, (*Lemna minor*). Отбор растений для анализа выполнен на тех же пробных площадках (ПП), что и отбор проб воды и донных отложений. Образцы растений отмывали в воде от взвеси; высушивали и подвергали анализу на содержание тяжелых металлов атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30692–00 и ГОСТ 30178–96[2;3].

Накопление тяжелых металлов оценивали по коэффициентам биологического поглощения, рассчитанным по отношению к воде и донным отложениям по формуле  $KБП = C_p/C_w$  или  $C_d$ , где  $C_p$  — содержание ТМ в сухой массе, мг/кг;  $C_w$  или  $C_d$  — содержание ТМ в воде или донных отложениях, мг/л или мг/кг соответственно [10;11].

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью Microsoft Excel.

## Результаты и обсуждение

Оценку качества воды проводили по комбинированному действию группы токсикантов. Составлен ряд от-

ношений суммы фактических концентраций изучаемых элементов, нормируемых по одинаковому показателю вредности к предельно допустимым концентрациям этих элементов в водоемах рыбохозяйственного значения. Допустимой степенью загрязнения воды являются случаи, когда этот показатель не превышает 1 дозы.

Результаты исследования свидетельствуют о высокой степени загрязнения вод Клязьминского водохранилища по суммарному действию соединений с токсикологическим показателем вредности.

Во всех исследуемых створа содержание Fe, Mn, Cu превышало ПДК, содержание Zn в отдельных створах было равно ПДК (табл. 1).

В порядке убывания загрязненности, исходя из суммарного превышения ПДК соединений с токсикологическим показателем вредности, изучаемые створы Клязьминского водохранилища можно расположить в следующий ряд:

Створ 1 > створ 2 > створ 3 > створ 4

Определение химического состава природных вод, не может быть осуществлено без учета степени загрязненности донных отложений.

Донные отложения ввиду аккумулятивной способности к различным загрязнителям могут служить индикатором экологического состояния водоемов. При этом, ТМ, накапливаясь в донных отложениях переводят последние в потенциальный источник вторичного загрязнения [17].

По отношению к ОДК в почве, определенных в зависимости от гранулометрического состава и величины рН, концентрации тяжелых металлов в донных отложениях не превышали установленные гигиенические нормативы, за исключением створа 1, где содержание цинка составило 3,69 ОДК (табл. 2).

В соответствии со шкалой уровня химического загрязнения почв и грунтов, по суммарному показателю

Таблица 2. Содержание ТМ в донных отложениях

Место отбора	Элементы				
	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
створ 1	197.33± 12.1	697± 51.4	32± 2.1	203± 10.0	10± 1.6
створ 2	194.56± 10.3	563± 32.3	27± 1.9	119± 4.6	менее 10
створ 3	188.45± 11.1	544± 33.6	24± 0.9	97± 3.3	менее 10
створ 4	179.52± 9.4	413± 27.4	10± 0.4	28± 0.6	менее 10

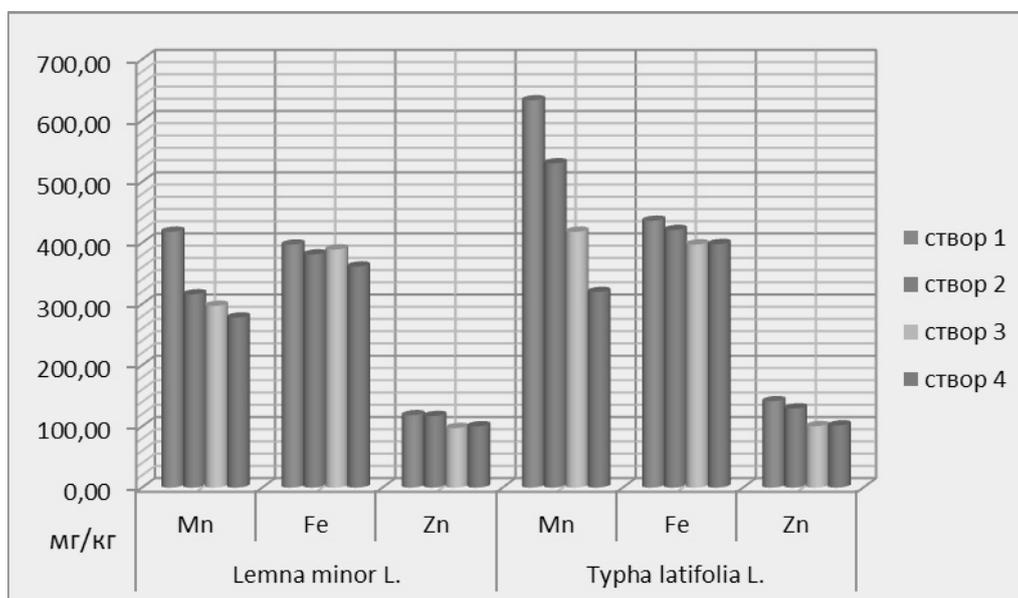


Рис. 2. Содержание Mn, Fe, Zn (мг/кг сухой массы) в Lemna minor L. и Typha latifolia L.

загрязнения, донные отложения во всех исследуемых створах имеют допустимую категорию загрязнения.

Большое значение для оценки состояния окружающей среды с использованием водной растительности является их постоянное присутствие в водной экосистеме и способность комбинировать влияние всех воздействий и отражать состояние окружающей среды в целом.

Анализ результатов исследования содержания ТМ в макрофитах произрастающих в Клязьминском водохранилище, свидетельствует о том, что их концентрация зависела в первую очередь от видовой принадлежности растений, вида загрязнителя и мест произрастания.

Устойчивость макрофитов к избытку ТМ проявляется неодинаково: одни виды способны накапливать

высокие концентрации ТМ без вреда для себя; другие проявляют толерантность путем максимального использования своих барьерных функций

Во всех исследуемых створах растения Typha latifolia L. накапливали большее количество изучаемых элементов по сравнению с Lemna minor L.

Максимальные концентрации Mn, Fe, Zn отмечены у Typha latifolia L. и Lemna minor L. в створе 1. Содержание Mn, Zn у исследуемых растений уменьшалось в ряду: створ 1-> створ 2-> створ 3 —> створ 4. Данная закономерность загрязнения по створам в целом характерна и для железа за исключением его содержания в Lemna minor L. во втором створе, где концентрация элемента несколько ниже по сравнению с третьим створом (рис. 2). Во всех исследуемых створах концентрация Fe, Zn превышала МДУ данных элементов в кормах [1].

Таблица 3. Ряды распределения ТМ в растениях акватории Клязьминского водохранилища

Створы	<i>Lemna minor</i> L	<i>Typha latifolia</i> L.
1	Mn>Fe>Zn>Cu>Pb	Mn>Fe>Zn>Cu>Pb
2	Fe>Mn>Zn>Cu>Pb	Mn>Fe>Zn>Cu>Pb
3	Fe>Mn>Zn>Cu>Pb	Mn>Fe>Zn>Cu>Pb
4	Fe>Mn>Zn>Cu>Pb	Fe>Mn>Zn>Cu>Pb

Таблица 4. Корреляционная зависимость содержания ТМ в *Typha latifolia* L., воде и донных отложениях.

Варианты	Железо	Марганец	Свинец	Цинк	Медь
Вода	0,94	0,99	-0,42	-0,21	0,90
Характер связи	высокая прямая		средняя обратная	слабая обратная	высокая прямая
ДО	0,86	0,97	0,17	0,87	0,57
Характер связи	высокая прямая		слабая прямая	высокая прямая	средняя прямая

Таблица 5. Корреляционная зависимость содержания ТМ в *Lemna minor*, воде и донных отложениях

Варианты	Железо	Марганец	Свинец	Цинк	Медь
Вода	0,81	0,85	0,30	-0,21	0,90
Характер связи	высокая прямая		средняя прямая	слабая обратная	высокая прямая
ДО	0,93	0,83	0,57	0,76	0,98
Характер связи	высокая прямая		средняя прямая	высокая прямая	

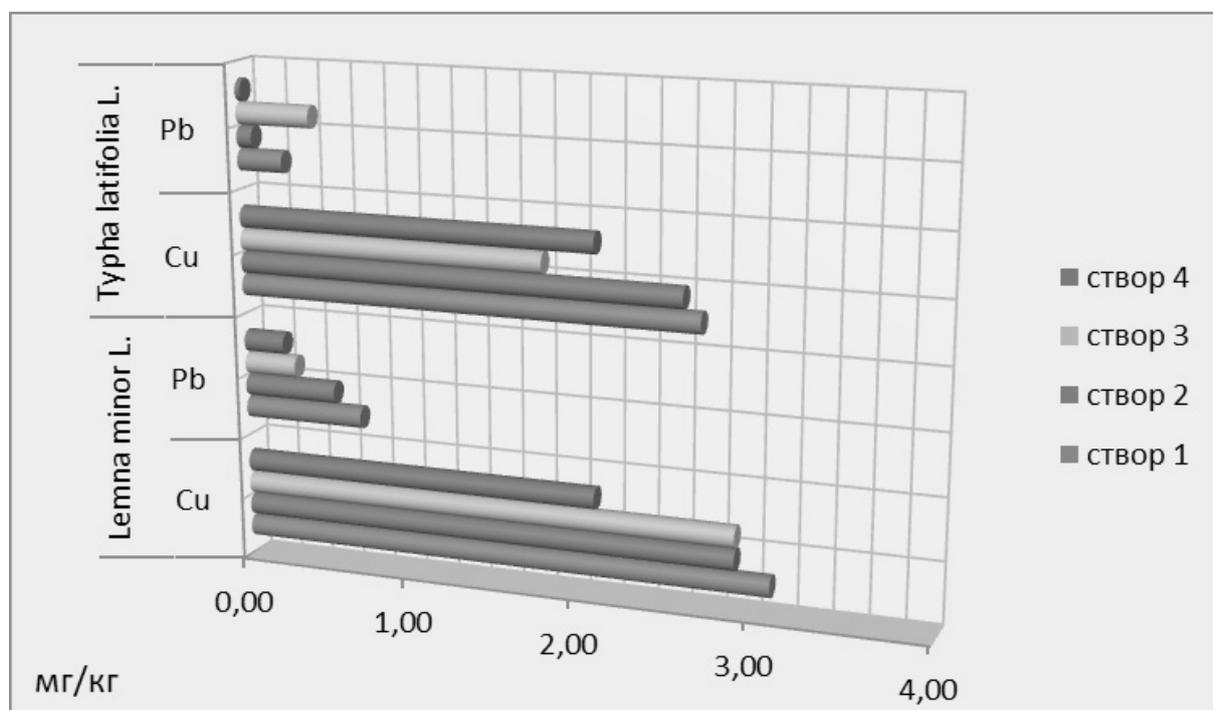


Рис. 3. Содержание Cu, Pb (мг/кг сухой массы) в *Lemna minor* L. и *Typha latifolia* L.

Таблица 6. Коэффициенты биоконцентрирования ТМ ВВР Клязьминского водохранилища.

КК					
Элемент	Створ	<i>Typha latifolia</i> L.		<i>Lemna minor</i>	
		по содержанию в воде	по содержанию в донных отложе	по содержанию в воде	по содержанию в донных отложе
Mn	1.	4870,00	3,21	3217,69	2,12
	2.	4417,50	2,72	2632,50	1,62
	3.	4647,80	2,22	3301,11	1,58
	4.	3996,30	1,78	3473,75	1,55
Pb	1.	135,00	0,03	355,00	0,07
	2.	37,50	0,01	229,17	0,06
	3.	220,00	0,04	155,00	0,03
	4.	15,50	0,00	120,00	0,02
Fe	1.	261,20	0,63	237,84	0,57
	2.	462,70	0,75	418,79	0,68
	3.	620,90	0,73	608,13	0,72
	4.	1105,60	0,96	1003,89	0,88
Zn	1.	11758,30	0,70	9850,83	0,58
	2.	12930,00	1,09	11700,00	0,98
	3.	7171,40	1,04	6950,00	1,00
	4.	10160,00	3,63	10020,00	3,58
Cu	1.	500,00	0,08	574,07	0,10
	2.	530,60	0,10	591,84	0,11
	3.	692,30	0,08	1115,38	0,12
	4.	1050,00	0,21	1050,00	0,21

Отмечено существенно более низкое содержание Pb и Cu в исследуемых растениях по сравнению с Mn, Fe, Zn, при этом закономерность содержания Pb и Cu по створам также изменялась (рис. 3) [].

Во всех исследуемых створах содержание Pb и Cu в *Lemna minor* L. и *Typha latifolia* L. не превышало МДУ для кормов [1]. Однако сравнение с ПДК по Прохоровой указывает на то, что Pb накапливался в *Lemna minor* L. в створах 1 и 2 (рис. 3) [14].

По содержанию ТМ изучаемые ВВР образуют следующие ряды [табл. 3]:

Корреляционный анализ зависимости содержания ТМ в *Typha latifolia* L., от концентрации ТМ в воде и донных отложениях указывает на высокую положительную связь концентрации Fe, Mn, в растениях с их количеством в воде и донных отложениях (табл. 4), а в *Lemna minor* — на высокую положительную связь concentra-

ции Fe, Mn, Zn, Cu в растениях с их количеством в донных отложениях (табл. 5).

Коэффициент концентрирования (КК) или фактор обогащения, учитывающий содержание ТМ в воде и донных отложениях и показывающий степень толерантности растений, определяется физиологическими особенностями *Typha latifolia* L. и *Lemna minor* и видом ТМ.

По способности накапливаться в *Typha latifolia* L. и *Lemna minor* во всех исследуемых створах из воды выделяются такие элементы как Mn, Cu, Zn, Fe. *Typha latifolia* L. из воды в створе 1 в наибольшем количестве накапливала Mn, Zn. Высокая накопительная способность *Lemna minor* по отношению к Mn, Fe, Cu отмечалась в створе 4 (Табл. 6).

К токсическому воздействию на растения Клязьминского водохранилища приводит высокое содержание

в воде Fe и Mn. Постоянное превышение ПДК по этим элементам приводит к биоконцентрированию их в растениях

Выявленная зависимость коэффициентов биологического поглощения тяжелых металлов в растениях от содержания их в воде и донных отложениях носит неоднозначный характер.

Неоднозначность в накоплении элементов по отношению к воде и донным отложениям Клязьминского водохранилища обусловлена изменяющимися концентрациями их в отдельных створах, связанными с рекреацией, сбросами ливневых стоков, а также формой нахождения тяжелых металлов в природных водах [7].

Однозначным является то, что макрофитами тяжелые металлы поглощаются активнее из воды, где коэффициенты биоконцентрирования для системы биота/вода на несколько порядков выше в сравнении с системой биота/донные отложения.

Коэффициент биоконцентрирования служит критерием для разделения гидробионтов на 3 группы по способности концентрировать ТМ — макро-, микро- и де-концентраторы [6].

В соответствии с такой классификацией изучаемые растения по отношению к воде можно отнести к сверхконцентраторам. По отношению к донным отложениям *Typha latifolia* L. и *Lemna minor* являются концентратором всех исследуемых элементов.

Повышенная поглотительная способность исследуемых растений по отношению к тяжелым металлам

отмечалась в створах с большим содержанием данных элементов в воде и донных отложениях.

Потенциальная накопительная способность растений может указывать на зависимость процесса аккумуляции от степени контакта растения с водной средой.

### Заключение

Повышенное содержание тяжелых металлов в воде обусловлено, в основном, рекреационной и хозяйственной деятельностью человека, а также природными факторами, характерными для Московского региона и обуславливающими периодические повышения концентраций отдельных компонентов в природной среде.

В исследуемых видах макрофитов отмечены значительные величины концентраций физиологически необходимых металлов — Mn, Fe, Zn. Незначительные уровни содержания в *Typha latifolia* L. и *Lemna minor* отмечены по Pb — металл, с неустановленной ролью в обменных процессах.

Различия в степени биоаккумуляции тяжелых металлов в исследованных растениях вызваны видоспецифичностью растений (разная физиологическая потребность в элементах), влиянием условий среды, принадлежностью по типу произрастания к разным экологическим нишам.

Выявлены различия в биофильности тяжелых металлов по отношению к содержанию элементов в растениях, воде и донных отложениях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утв. Главным управлением ветеринарии Государственного агропромышленного комитета СССР 7 августа 1987 г.).
2. ГОСТ 30178–96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов / Введ. 1998–01–01. — М.: Стандартинформ, 2010. 10 с.
3. ГОСТ 30692–2000. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия / Введ. 2002–01–01. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 19 с.
4. ГОСТ 31861–2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб = Water. General requirements for sampling: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.11. 2012 г. № 1513-ст: введен впервые: дата введения 2014–01–01/ разработан ООО «Протектор» совместно с ЗАО «Центр исследования и контроля воды». Москва: Стандартинформ, 2019. — 32 с.
5. Зубкова В.М., Арсланбекова Ф.Ф., Макаханюк Ж.С. Накопление тяжелых металлов (ТМ) ряской малой (*Lemna minor*) в условиях антропогенного загрязнения реки Ходца // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2021. № 07. С. 23–28.
6. Зубкова В.М., Болотов Н.Ю., Белозубова Н.Ю. Содержание и миграция тяжелых металлов в компонентах экосистем Волгоградского водохранилища // Аграрная наука. 2015. № 1. С. 14–16.
7. Имантаев А.Б., Чеснокова Н.Ю. Содержание тяжелых металлов в высших водных растениях Северного Каспия // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 87–96.

8. Курбатов С.А., Зубкова В.М., Пономарев А.Я. Сезонная динамика приоритетных загрязнителей воды Клязьминского водохранилища // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2022. № 01/2. С. 5–11
9. М–МВИ-80–2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии / Введ. 2008–06–02. М.: 000 Мониторинг, 2008. 36 с.
10. Никаноров, А.М. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах / А.М. Никаноров, А.В. Жулидов // Л.: Гидрометеиздат, 1991. 312 с.
11. Поваров В.Г., Соколова О.Б., Шигапова К.А., Павлова Н.С. Биоконцентрирование тяжелых металлов водными и прибрежными растениями (на примере Троицкого ручья, старый Петергоф) // Вестник СПбГУ. Серия 4. Физика. Химия. 2007. № 3.
12. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01. 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
13. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрирован 13.01.2017 № 45203).
14. Прохорова Н.В., Матвеев Н.М. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза // Вестн. СамГУ. 1996. № 2. С. 125–144.
15. Р 52.24.353–2012 «Рекомендации. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод». Разработаны ФГБУ «Гидрохимический институт» (ФГБУ «ГХИ»), утверждены Заместителем Руководителя Росгидромета от 02.04.2012.
16. Сокольская Е.А., Бегманова Б.М. Результаты использования высшей водной растительности для доочистки сточных вод и загрязненных водоемов Астраханской области //Биоразнообразии, рациональное использование биологических ресурсов и биотехнологии. 2021. С. 153–155.
17. Emenike E.C., Iwuozor K.O., Anidiobi S.U. Heavy metal pollution in aquaculture: sources, impacts and mitigation techniques //Biological Trace Element Research. 2021. С. 1–17.
18. Yaashikaa P.R. et al. A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants //Environmental Pollution.— 2022. С. 119035.

---

© Курбатов Сергей Андреевич ( mo-kurbatov@m-obvu.ru ),

Зубкова Валентина Михайловна ( vmzubkova@yandex.ru ), Гапоненко Альбина Вячеславовна ( gaponenkoav@rgsu.net ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»