

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2020

Бактыбаева З.Б.¹, Кулагин А.А.², Габидуллина Г.Ф.³, Ларионова Т.К.¹

Эколого-гигиеническая оценка состояния техногенного водоёма золотодобывающего предприятия (Завралье Республики Башкортостан)

¹ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа;

²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы», 450008, Уфа;

³ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», 450076, Уфа

Введение. Использование населением отработанных техногенных водоёмов для целей рекреации и обеспечения хозяйственно-бытовых потребностей может представлять потенциальную опасность для здоровья. Такие загрязнения, как тяжёлые металлы, не подвергаются процессам разложения, а аккумулируются в биотических и абиотических компонентах водоёма. Впоследствии опасные токсиканты по пищевым цепям могут попасть в организм человека. Проведена эколого-гигиеническая оценка состояния оборотного водохранилища Семёновской золотоизвлекательной фабрики.

Материал и методы. Объект исследования находится в Завралье Республики Башкортостан по географическим координатам 52° 30' 20" N, 58° 19' 48" E. Изучено содержание тяжёлых металлов (Zn, Cu, Pb и Cd) в воде, донных отложениях и биомассе водного макрофита (*Potamogeton perfoliatus* L.). Измерения массовых концентраций металлов выполнены методом инверсионной вольтамперометрии. В донных отложениях определены подвижные формы металлов, извлекаемые ацетатно-аммонийным буфером с рН = 4,8.

Результаты. Выявлено, что в воде уровень тяжёлых металлов выше предельно допустимых концентраций для водоёмов рыбохозяйственного значения: по меди в 19–27 раз, по цинку – в 10–24 раза, по свинцу – в 2,7–5,8 раза, по кадмию – в 1–1,4 раза. Превышение нормативов для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования регистрируется по кадмию (в 6 раз) и свинцу (в 2,5 раза). В донных отложениях содержание подвижных форм цинка составляет 372,00 ± 28,51 мг/кг, меди – 144,37 ± 4,08 мг/кг, свинца – 14,09 ± 1,48 мг/кг, кадмия – 0,036 ± 0,002 мг/кг. Суммарный показатель (Z_c), отражающий аддитивное превышение фона, равен 1686, что соответствует чрезвычайно высокому уровню техногенного загрязнения донных отложений. Концентрации тяжёлых металлов в надземных и подземных органах рдеста многократно превышают фоновые уровни.

Заключение. Отработанное оборотное водохранилище Семёновской золотоизвлекательной фабрики представляет потенциальную опасность для здоровья местного населения при его использовании для разведения домашней птицы, водопоя скота, рыбной ловли. Необходимо проведение мероприятий, направленных на улучшение эколого-гигиенической ситуации на территории населённого пункта.

К л ю ч е в ы е с л о в а : тяжёлые металлы; техногенное загрязнение; оборотное водохранилище; донные отложения; водные макрофиты; биоаккумуляция.

Для цитирования: Бактыбаева З.Б., Кулагин А.А., Габидуллина Г.Ф., Ларионова Т.К. Эколого-гигиеническая оценка состояния техногенного водоёма золотодобывающего предприятия (Завралье Республики Башкортостан). Гигиена и санитария. 2020; 99 (9): 911-917. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-911-917>

Для корреспонденции: Бактыбаева Зульфия Булатовна, кандидат биол. наук, ст. науч. сотр. отдела медицинской экологии ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа. E-mail: baktybaeva@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов: концепция и дизайн исследования – Бактыбаева З.Б.; сбор и обработка материала – Бактыбаева З.Б., Габидуллина Г.Ф.; статистическая обработка – Бактыбаева З.Б., Кулагин А.А.; написание текста – Бактыбаева З.Б., Габидуллина Г.Ф.; редактирование – Кулагин А.А., Ларионова Т.К.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все соавторы.

Поступила 30.06.2020

Принята к печати 18.09.2020

Опубликована 20.10.2020

Zulfiya B. Baktybaeva¹, Andrey A. Kulagin², Guzel F. Gabidullina³, Tatiana K. Larionova¹

Ecological and hygienic assessment of the technogenic reservoir state of the gold extraction enterprise (Zauralye of the Republic of Bashkortostan)

¹Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation;

²M. Akmulla Bashkir State Pedagogical University, Ufa, 450008, Russian Federation;

³Bashkir State University, Ufa, 450076, Russian Federation

Introduction. The population using waste man-made water reservoirs for recreation and providing household needs can be at potential health risk. Such pollutants as heavy metals do not undergo decomposition processes. They accumulate in the biotic and abiotic components of the reservoir. Subsequently, hazardous toxicants can enter the human body through food chains. An ecological and hygienic assessment of the state of the waste reverse reservoir of the Semyonov gold recovery plant has been carried out.

Material and methods. The object of the study is located in the Zauralye of the Republic of Bashkortostan at the geographical coordinates 52° 30' 20" N, 58° 19' 48" E. The content of heavy metals (Zn, Cu, Pb, and Cd) in water, bottom sediments and biomass of aquatic macrophyte (*Potamogeton perfoliatus* L.) was studied. In the bottom sediments, mobile forms of metals have been detected. They are extracted by an acetate-ammonium buffer with pH = 4.8

Results. It has been revealed that in water the concentration of heavy metals is higher than the maximum permissible concentrations for fishery reservoirs: 19–27 times for copper, 10–24 times for zinc, 2.7–5.8 times for lead, 1–1.4 times for cadmium. Exceeding the standards for water bodies for drinking, domestic and cultural water use is recorded for cadmium (6 times) and lead (2.5 times). In bottom sediments, the zinc content of mobile forms is 372.00 ± 28.51 mg/kg, copper - 144.37 ± 4.08 mg/kg, lead - 14.09 ± 1.48 mg/kg, cadmium - 0.036 ± 0.002 mg/kg. The total index (Z_c), reflecting the additive excess of the background, is 1686, which corresponds to an extremely high level of man-made pollution of bottom sediments. The concentrations of heavy metals in the aboveground and underground organs of *Potamogeton perfoliatus* L. are much higher than the background levels.

Conclusion. The waste reverse reservoir of the Semenov gold extraction factory is potentially dangerous to the local population health when it is used for breeding poultry, watering cattle, and fishing. The activities aimed at improving the environmental and hygiene situation in the territory of the locality are imperative.

Key words: heavy metals; man-made pollution; reverse water reservoir; bottom sediments; water macrophytes; bioaccumulation.

For citation: Baktybaeva Z.B., Kulagin A.A., Gabidullina G.F., Larionova T.K. Ecological and hygienic assessment of the technogenic reservoir state of the gold extraction enterprise (Zauralye of the Republic of Bashkortostan). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (9): 911-917. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-911-917> (In Russ.)

For correspondence: Zulfya B. Baktybaeva, MD, Ph.D., Senior Researcher of the department of medical ecology of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation. E-mail: baktybaeva@mail.ru

Information about the authors:

Baktybaeva Z.B., <https://orcid.org/0000-0003-1249-7328>; Kulagin A.A., <https://orcid.org/0000-0002-7721-2453>

Gabidullina G.F., <https://orcid.org/0000-0002-7860-511X>; Larionova T.K., <https://orcid.org/0000-0001-9754-4685>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The study had no sponsorship.

Contribution: concept and design of the study – Baktybaeva Z.B.; collection and processing of material – Baktybaeva Z.B., Gabidullina G.F.; statistical processing – Baktybaeva Z.B., Kulagin A.A.; writing the text – Baktybaeva Z.B., Gabidullina G.F.; editing – Kulagin A.A., Larionova T.K.; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all co-authors.

Received: June 30, 2020

Accepted: September 18, 2020

Published: October 20, 2020

Введение

Горнодобывающая промышленность, обеспечивая ресурсами наиболее значимые отрасли производства, выполняет важную роль в поддержании благосостояния населения и функционирования мировой экономики. В то же время производство минерального сырья может иметь негативные экологические и социальные последствия, препятствуя достижению других целей устойчивого развития (чистая вода, чистый воздух, здоровье населения и др.) [1, 2].

Значительная часть сырьевой базы цветной металлургии Российской Федерации сосредоточена на Урале. В результате многолетней деятельности предприятий отрасли в регионе сложилась неблагоприятная эколого-гигиеническая обстановка, связанная с техногенным загрязнением окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) [3–5]. Разработка месторождений и строительство обогатительных фабрик без учёта экологических требований привели к загрязнению и селитебных территорий. Отмечается, что ухудшение качества среды обитания способствует нарастанию частоты отдельных патологических состояний и болезней у жителей техногеннотрансформированных горнорудных провинций [6–8].

ТМ считаются опасными загрязнителями из-за своей токсичности и способности к биоаккумуляции [9, 10]. Характер действия ТМ на живой организм зависит от уровня их концентрации в среде обитания, а также в пищевых продуктах. В условиях превышения безопасных уровней воздействия и постоянного поступления в организм токсичные металлы могут оказывать негативное влияние на основные жизненно важные органы и системы с последующим формированием нарушений или заболеваний [11, 12]. Результаты исследований показывают, что ТМ обладают канцерогенными, мутагенными, тератогенными, иммунотоксическими, гематотоксическими, гепатотоксическими, нефротоксическими и нейротоксическими свойствами [13–17].

Существенная доля ТМ аккумулируется в техногенных водных объектах горнорудной промышленности. Использование населением отработанных водоёмов для рекреации и обеспечения хозяйственно-бытовых потребностей вызывает настороженность [18]. Как известно, ТМ не разлагаются в

водной среде, а лишь перераспределяются по компонентам водоёма, меняя форму своего существования [19, 20]. Из водных систем токсиканты по пищевым цепям могут поступать в организм человека [21, 22]. Исследования показывают, что повышенное содержание ТМ в рыбной продукции представляет опасность для здоровья населения [23, 24].

Важным элементом пищевой цепи в аквальных экосистемах являются водные макрофиты, так как служат пищей для большинства гидробионтов, растительноядных рыб и водоплавающих птиц. Изучение уровней концентрации токсичных металлов не только в воде и донных отложениях (ДО), но и в тканях водных растений позволяет получить более полное представление об эколого-гигиеническом состоянии водоёма.

Одним из населённых пунктов, жители которого на протяжении многих лет подвержены влиянию опасного промышленного объекта, является пос. Семёновский, расположенный в Баймакском районе Республики Башкортостан (РБ). На территории населённого пункта находится отработанное водохранилище Семёновской золотоизвлекательной фабрики (СЗИФ). Рекультивационные работы после закрытия предприятия не проводили. В связи с чем изучение содержания токсикантов в техногенном водоёме является актуальным.

Цель исследования – оценить эколого-гигиеническое состояние отработанного оборотного водохранилища Семёновской золотоизвлекательной фабрики по уровню концентрации тяжёлых металлов в биотических и абиотических компонентах.

Материал и методы

Объект исследования расположен по географическим координатам $52^{\circ}30'20''N$, $58^{\circ}19'48''E$. Площадь водохранилища составляет $142,5$ тыс. m^2 , объём воды колеблется в пределах $60–100$ тыс. m^3 [25].

При строительстве золотоизвлекательной фабрики санитарно-защитную зону не устанавливали, вследствие этого селитебная территория посёлка непосредственно примыкает к промышленной площадке, в том числе и к оборотному

водохранилищу, расположенному всего в 200 м от жилой застройки (см. рисунок). В технологическом процессе СЗИФ использовали токсичные вещества. На первом этапе деятельности (начиная с 1908 г.) для целей извлечения самородного золота применяли технологию амальгамации. С 1943 г. фабрика работала в сезонном режиме с использованием технологии цианирования золотосодержащих руд, которая предусматривала использование больших объёмов различных реагентов: цианида натрия, извести, серной и соляной кислот, металлического цинка, свинцовых солей, полиакриламида. По завершении процесса цианирования токсиканты накапливались в отходах и сточных водах предприятия. Отходы сбрасывали в хвостохранилище, а осветлённые технологические растворы – в оборотное водохранилище, которое сезонно заполнялось водой из р. Таналык [25].

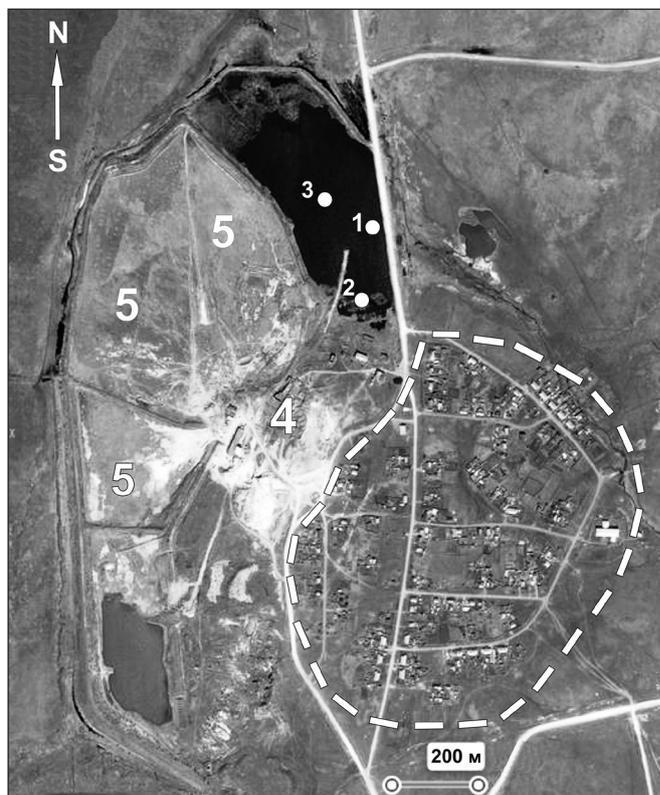
Остановка работы фабрики (в 1997 г.) и ежегодное пополнение паводковыми стоками привели к постепенному осветлению воды в техногенном водоёме. Вода, которая была насыщенного зеленовато-голубого цвета, через несколько лет стала прозрачной, а акватория стала зарастать водной и прибрежно-водной растительностью. Всё это способствовало тому, что жители посёлка начали использовать водный объект для разведения домашней птицы, водопоя скота, рыбной ловли.

Для оценки эколого-гигиенического состояния техногенного водоёма изучено содержание тяжёлых металлов (Zn, Cu, Pb и Cd) в воде, донных отложениях, наземных и подземных органах доминирующего макрофита. При выборе вида растения в качестве биообъекта учитывали такие признаки, как биомасса, представительность и частота встречаемости вида в пределах акватории. Выполненные авторами в 2011 и 2014 гг. геоботанические исследования водохранилища СЗИФ показали, что водная растительность в основном представлена рдестом пронзеннолистным (*Potamogeton perfoliatus* L.) – погружённым в воду, укороенным многолетним растением. Идентификацию видов проводили по «Определителю высших растений Башкирской АССР» [26].

Пробы для химического анализа отбирали в августе 2014 и 2017 гг. на 3 участках водоёма. Участок № 1 расположен у восточного берега рядом с зарослями розога Лаксмана (*Typha laxmannii* Lerech.) и тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), участок № 2 – у южного берега водоёма, и участок № 3 – с юго-западной стороны, ближе к центру водоёма. На каждом участке отбор проб производили в 5 повторностях.

ДО отбирали согласно ГОСТ 17.1.5.01–80¹ и РД 52.24.609–2013². Верхний слой ила мощностью до 20 см отбирали одновременно с растительными образцами. Впоследствии ДО высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через капроновое сито с диаметром ячеек 1 мм. Для извлечения подвижных форм металлов использовали ацетатно-аммонийный буферный раствор (рН 4,8). Отношение почвы к раствору составляло 1:10. Пробу перемешивали на ротаторе в течение 1 ч при комнатной температуре. В дальнейшем вытяжку фильтровали через сухой складчатый фильтр «белая лента». Растительные пробы в лабораторных условиях промывали и высушивали до воздушно-сухого состояния.

Подготовку к анализу проб воды, почвенной вытяжки и растительных образцов проводили с сочетанием «мокрого» (с HNO₃ и H₂O₂) и «сухого» озоления в комплексе пробоподготовки «Темос-Экспресс». Измерения массовых



Карта-схема района исследования.

Пунктиром обозначена жилая зона; 1–3 – участки отбора проб; 4 – золотоизвлекающая фабрика; 5 – хвостохранилище.

концентраций металлов выполняли методом инверсионной вольтамперометрии на приборе СТА^{3,4,5}. Кроме того, в пробах воды определяли показатели общей минерализации и рН; в ДО – рН солевой вытяжки (КС). Для измерения рН использовали иономер И-160МИ. В воде солесодержание в перерасчёте на хлористый натрий определяли с помощью кондуктометра МАРК-603.

Данные по воде сравнивали с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования⁶ и с ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения⁷.

В связи с тем, что в Российской Федерации отсутствуют нормативы, регламентирующие содержание в ДО токсичных поллютантов, для оценки загрязнения ДО авторы рассчитывали коэффициент концентрации химического элемента (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c) [27].

³ МУ 08-47/152. Почва. Методика выполнения измерений массовых концентраций кадмия, свинца, цинка и меди методом инверсионной вольтамперометрии. Томск; 2004.

⁴ МУ 08-47/136. Продукты пищевые и продовольственное сырьё. Инверсионно-вольтамперометрические методы определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка). Томск; 2005.

⁵ МУ 08-47/163. Вода природная, питьевая, технологически чистая, очищенная сточная. Методика выполнения измерений массовых концентраций кадмия, свинца, цинка и меди методом инверсионной вольтамперометрии. Томск; 2007.

⁶ ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (с изменениями на 13 июля 2017 года). М.; 2003.

⁷ Приказ Минсельхоза РФ от 13 декабря 2016 года № 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» (с изменениями на 12 октября 2018 года № 454). М.; 2017.

¹ ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость (с Изменением № 1). М.; 1980.

² РД 52.24.609–2013. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов (утв. заместителем руководителя Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 7 августа 2013 г.). М.; 2013.

Таблица 1

Содержание тяжёлых металлов в воде и донных отложениях водохранилища Семёновской золотоизвлекательной фабрики

Показатель	Элемент			
	Zn	Cu	Pb	Cd
ПДК в воде водных объектов:				
хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования	1,0	1,0	0,01	0,001
рыбохозяйственного значения	0,01	0,001	0,006	0,005
<i>В воде, мг/дм³ (n = 30)</i>				
<i>M ± SD</i>	0,162 ± 0,043	0,023 ± 0,002	0,025 ± 0,007	0,006 ± 0,0004
<i>min-max</i>	0,100–0,240	0,019–0,027	0,016–0,035	0,005–0,007
<i>В донных отложениях, мг/кг (n = 30)</i>				
<i>M ± SD</i>	372,00 ± 28,51	144,37 ± 4,08	14,09 ± 1,48	0,036 ± 0,002
<i>min-max</i>	340,00–412,00	138,00–151,00	10,00–16,00	0,032–0,039

Примечание. Здесь и в табл. 2: n – число проб; $M \pm SD$ – среднее значение \pm стандартное отклонение; $min-max$ – минимальное значение – максимальное значение.

K_c характеризует уровень (интенсивность) концентрирования элемента в зоне загрязнения относительно его фонового содержания и рассчитывается по формуле:

$$K_c = C_i / C_\phi \quad (1),$$

где C_i – концентрация i -го химического элемента в зоне загрязнения, C_ϕ – фоновое содержание этого элемента. При этом, согласно РД 52.24.609–2013, необходимым условием является идентичность типов ДО. В качестве фоновых показателей авторы использовали данные по р. Таналык, на водосборной территории которой расположено оборотное водохранилище. Участок, принятый за условный фон, не подвержен прямому техногенному воздействию и находится в верховье реки, в 30 км к северу от пос. Семёновский. Так как исследованные участки на р. Таналык закладывали в заводах, где течение отсутствует, или на отрезках реки со скоростью течения не более 0,01 м/с, по гидрологическому режиму сравниваемые участки практически не отличались.

Суммарный показатель загрязнения Z_c используется для оценки аддитивного превышения фонового уровня группой элементов и рассчитывается по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1) \quad (2),$$

где K_c – коэффициент концентрации i -го химического элемента; n – число, равное количеству элементов, входящих в ассоциацию.

Статистическую обработку полученных результатов осуществляли общепринятыми методами с использованием пакета программы Microsoft Office Excel версии 2016. Для каждого среднего арифметического значения определяли стандартное отклонение ($M \pm SD$). Для выявления различий между показателями с разных участков, а также показателями 2014 и 2017 гг. проводили однофакторный дисперсионный анализ. Достоверность различия между двумя выборочными средними оценивали с помощью критерия Стьюдента (t) при $p < 0,05$.

Результаты

Результаты

Результаты исследования показали, что в воде и ДО водохранилища СЗИФ наиболее высока концентрация цинка. Максимальное содержание металла в воде достигает 0,24 мг/дм³, в ДО – 412 мг/кг (табл. 1). Меньше всего в абиотических компонентах техногенного водоёма содержится кадмия. Изученные металлы по их концентрации в воде образуют следующий убывающий ряд: Zn > Pb > Cu > Cd. При этом уровни содержания ионов свинца и меди сильно не различаются. В донных отложениях концентрация меди в 10 раз выше, чем свинца; содержание элементов убывает в ряду Zn > Cu > Pb > Cd. При сравнении показателей по воде и ДО можно видеть, что в донных осадках уровень ТМ намного выше: меди – в 6200 раз, цинка – в 2300 раз, свинца – в 560 раз, кадмия – в 6 раз.

Расчёты K_c показали, что концентрации подвижных форм цинка в донных отложениях водохранилища СЗИФ превышают фоновый уровень в 92–111 раз, содержание меди – в 164–180 раз, содержание свинца – в 1000–1600 раз, кадмия – в 6–8 раз. Убывающий ряд средних значений K_c выглядит следующим образом: Pb (1409) > Cu (172) > Zn (101) > Cd (7). Полученные значения коэффициента концентрации свидетельствуют, что техногенное загрязнение донных осадков оборотного водохранилища в первую очередь обусловлено увеличением уровня свинца. Показатель Z_c донных отложений равен 1686, что соответствует чрезвычайно высокому уровню техногенного загрязнения (в описываемом случае использованы значения подвижных форм металлов).

Миграционная способность ТМ в аквальных экосистемах в значительной степени зависит от рН среды и минерализации воды, а также от гранулометрического состава донных осадков [28]. ДО в точках отбора представлены илстой и песчано-илстой фракцией. Водородный показатель донных осадков составляет 6,6–7,0 ед. рН, воды – 6,5–7,0 ед. рН. Минерализация воды достаточно высокая – 780–810 мг/дм³.

В высокоминерализованных водах высшие водные растения способны накапливать ТМ до уровней, намного превышающих их физиологические потребности. В условиях оборотного водохранилища Семёновской золотоизвлекательной фабрики концентрация цинка в наземной биомассе рдеста пронзённостного достигает 210 мг/кг воздушно-сухого веса (табл. 2). Содержание меди и свинца в наземных органах макрофита в 10 раз, а кадмия в 1000 раз

Таблица 2

Содержание тяжёлых металлов в наземных и подземных органах рдеста пронзённостного

Показатель	Элемент			
	Zn	Cu	Pb	Cd
<i>В наземных органах, мг/кг воздушно-сухого веса (n = 30)</i>				
<i>M ± SD</i>	187,57 ± 11,69	21,39 ± 3,33	12,72 ± 1,05	0,18 ± 0,02
<i>min-max</i>	170,00–210,00	16,30–26,90	10,30–14,40	0,15–0,21
<i>В подземных органах, мг/кг воздушно-сухого веса (n = 30)</i>				
<i>M ± SD</i>	172,13 ± 5,68	19,20 ± 1,58	11,10 ± 1,47	0,18 ± 0,01
<i>min-max</i>	159,00–180,00	16,70–22,10	8,40–13,20	0,16–0,20

меньше, чем цинка. Степень накопления ТМ в подземных органах несколько ниже по сравнению с надземными.

На акватории оборотного водохранилища, кроме рдеста пронзённолистного, авторами были идентифицированы еще 2 вида погружённых макрофитов: рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.) и рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.) [29]. Заросли рдеста гребенчатого встречались довольно редко, а их площадь не превышала 5 м². Рдест блестящий встречался лишь единично в составе других сообществ. Основная часть биомассы погружённой растительности состояла из рдеста пронзённолистного. Площадь его зарослей варьировала от 6 до 15 м². При этом общее проективное покрытие достигало 80%, а обилие доминанта на площадке составляло 60–75%. Учитывая то, что в тканях рдеста за вегетативный сезон аккумулируется значительное количество ТМ, можно предположить о переходе токсикантов по пищевой цепи при поедании макрофитов домашними водоплавающими птицами и растительноядными рыбами.

Интенсивность аккумуляции ТМ водными растениями зависит от уровня концентрации элементов в воде и донных отложениях. Кроме того, решающее значение имеют формы нахождения ТМ, гидродинамические условия, сезонная физиологическая активность макрофитов, а также принадлежность к той или иной экологической группе растений [30]. Для оценки интенсивности поглощения химического элемента растениями используют коэффициент биологического поглощения (КБП), который рассчитывают как отношение концентрации металла в золе растительного организма к его концентрации в среде обитания [31]. В описываемом случае КБП для надземных органов рдеста рассчитывали по отношению к воде, а для подземных органов – по отношению к ДО. Расчёты показали, что наиболее высокими значениями КБП характеризуются надземные органы рдеста (табл. 3). Среди рассматриваемых ТМ из воды более активно поглощаются цинк (КБП варьирует в пределах 875–1700), медь (858–996) и свинец (411–644). Значения КБП для подземных органов не превышают 5,1. Наиболее интенсивно из ДО поглощаются кадмий и свинец.

Проведённый однофакторный дисперсионный анализ выявил, что в пространственном распределении некоторых ТМ наблюдается неравномерность. Так, на участке № 2, наиболее близко расположенном к обогатительной фабрике и хвостохранилищам, содержание цинка в воде, ДО и надземной биомассе достоверно выше по сравнению с другими участками. Кроме того, данный участок выделяется более высоким уровнем меди в пробах воды. В надземной биомассе рдеста меди больше содержится на участке № 3. По аккумуляции цинка и меди в подземных органах макрофита значимых различий между участками не выявлено. Участок № 1, заложённый у берега, вдоль которого проходит трасса, характеризуется более интенсивным накоплением свинца в ДО и подземных органах рдеста. Уровень кадмия выше в водных пробах участка № 3. Результаты химического анализа проб 2014 и 2017 гг. между собой достоверно не различаются, что может указывать на то, что интенсивных процессов самоочищения (загрязнения) в водоёме не происходит.

Таблица 3

Средние значения коэффициента биологического поглощения тяжёлых металлов для рдеста пронзённолистного

Отношение компонентов	Элемент			
	Zn	Cu	Pb	Cd
надземные органы вода	1158	930	508	30
подземные органы донные отложения	0,46	0,13	0,79	5,00

Обсуждение

Сопоставление данных по водохранилищу СЗИФ с ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования показало превышение норматива по кадмию в 6 раз, по свинцу – в 2,5 раза. Рыбохозяйственный норматив разработан для определения пригодности воды для обитающих в ней живых организмов, а также обеспечения безопасности продукции из них. Сопоставление результатов химического анализа с ПДК вредных веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения выявило, что содержание меди повышено в 19–27 раз, цинка – в 10–24 раза. Концентрация свинца варьируется в пределах 2,7–5,8 ПДК, по кадмию наблюдается превышение допустимого уровня в 1–1,4 раза.

Свинец и кадмий являются высокоопасными по степени воздействия на организм человека (2-й класс опасности). Цинк и медь относятся к 3-му классу опасности – умеренно опасные по степени воздействия на организм. Учитывая способность ТМ накапливаться по трофической цепи, возрастающую на более высоких трофических уровнях, выявленные превышения санитарно-гигиенического и рыбохозяйственного нормативов говорят о потенциальной опасности техногенного водоёма для здоровья населения.

Важнейшей составляющей водных объектов являются ДО, которые в значительной степени определяют качество водоёма. В связи с чем при проведении прикладных эколого-геохимических и санитарно-гигиенических исследований широко применяется изучение химического состава не только воды, но и донных осадков. В ДО происходит аккумуляция большей части загрязняющих веществ, которые при определённых условиях (ветровое взмучивание, изменение рН, минерализации, водности и т. д.) могут переходить в водную толщу, вызывая её вторичное загрязнение. В техногенных илах процесс вторичного загрязнения может продолжаться даже после полного прекращения поступления сточных вод [27]. Определение в ДО уровня подвижных (биологически доступных) форм ТМ даёт представление о потенциальной опасности осадков как загрязнителя сопредельных сред [28].

Ранее авторами проведены исследования по изучению содержания ТМ в ДО и водных макрофитах водоёмов региона. В табл. 4 представлены результаты собственных

Таблица 4

Содержание подвижных форм тяжёлых металлов в донных отложениях водных объектов Баймакского района Республики Башкортостан

Водный объект	Элемент, мг/кг			
	Zn	Cu	Pb	Cd
Оборотное водохранилище Семёновской золотоизвлекательной фабрики	372,00	144,37	14,09	0,036
Озеро Култубан [32]	14,30	2,61	6,20	0,210
Река Таналык у карьера Куль-Юрт-Гау	12,97	3,10	0,52	0,020
Река Таналык, условный фон	3,70	0,84	0,01	0,005

Примечание. [32] – ссылка на литературный источник.

Содержание тяжёлых металлов (мг/кг воздушно-сухого веса) в биомассе макрофитов в водных объектах Баймакского района Республики Башкортостан

Водный объект	Вид растения	Элемент			
		Zn	Cu	Pb	Cd
Оборотное водохранилище Семёновской золотоизвлекательной фабрики	Рдест пронзённолистный	187,57	21,39	12,72	0,18
		172,13	19,20	11,10	0,18
Пруд на реке Камыш-Узяк	Рдест пронзённолистный	45,73	7,85	0,56	0,23
		37,50	8,41	1,55	0,07
Озеро Култубан	Рдест блестящий	40,50	6,45	2,40	0,30
		22,35	2,10	1,30	0,21
Река Таналык у карьера Куль-Юрт-Тау	Рдест блестящий	55,84	4,56	0,61	0,36
		49,20	1,84	2,20	0,62
Река Таналык, условный фон	Рдест блестящий	31,40	1,76	0,35	н.о.
		24,52	0,49	0,73	н.о.

Примечание. В числителе – в надземных органах; в знаменателе – в подземных органах; н.о. – не определяется.

исследований, а также данные М. Орекупова и соавт. [32] по содержанию металлов в донных отложениях. На р. Таналык ДО с участка, загрязняемого высокоминерализованными подотвальными водами карьера Куль-Юрт-Тау, характеризуются более высокими концентрациями ТМ по сравнению с условным фоном. В ДО озера Култубан, расположенного в 25 км к северу-востоку от пос. Семёновский и в 10 км к югу от Сибайского горнорудного комплекса, содержание ТМ также выше показателей условного фона. В условиях оборотного водохранилища СЗИФ концентрация цинка, меди и свинца значительно выше, чем в других водоёмах.

Усреднённые данные по накоплению металлов в широколистных рдестах водных объектов Баймакского района РБ приведены в табл. 5. Концентрация Zn, Cu и Pb в надземных и подземных органах рдеста, произрастающего в водохранилище СЗИФ, намного выше, чем в других водоёмах. Способность рдеста пронзённолистного аккумулировать высокие концентрации ТМ, с одной стороны, способствует очищению водной среды, с другой стороны, может являться причиной вторичного загрязнения воды в результате ежегодного отмирания однолетних частей и выщелачивания ионов металлов из разлагающейся биомассы [33]. Помимо этого высокие уровни ТМ в макрофитах приводят к более высокому концентрированию загрязняющих веществ в последующих звеньях пищевой цепи, что подтверждается данными ряда исследований [34, 35].

В сложившейся ситуации не следует исключать и возможность загрязнения тяжёлыми металлами подземных вод в результате просачивания воды из техногенного водоёма. Работа СЗИФ в своё время была приостановлена по причине обнаружения в подземных питьевых источниках посёлка опасных концентраций ртути и других тяжёлых металлов. Несмотря на разработанный в 2012 г. проект по рекульти-

зации промплощадки СЗИФ, мероприятия по санации территории до сих пор не проведены. Более того, в последнее время заинтересованными горнодобывающими компаниями поднимается вопрос о строительстве в пос. Семёновский обогатительной фабрики по переработке медно-цинковых и золотосодержащих руд.

Заключение

Проведённое исследование выявило присутствие высоких концентраций тяжёлых металлов в компонентах оборотного водохранилища СЗИФ. Превышение санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных нормативов по воде, а также чрезвычайно высокий суммарный показатель загрязнения ДО говорят о потенциальной опасности водного объекта для местного населения.

Биоаккумуляция опасных по степени воздействия на организм человека токсичных металлов может привести к развитию патологии органов и систем, повышению уровня детской и взрослой заболеваемости. В связи с чем недопустимо использование отработанного техногенного водоёма СЗИФ для разведения домашней птицы, водопоя скота и рыбной ловли.

С целью профилактических мероприятий необходимо информировать население о возможных последствиях для здоровья при использовании водного объекта. Кроме того, для обеспечения эколого-гигиенической безопасности жителей посёлка требуется проведение рекультивационных работ на всей площади СЗИФ.

Учитывая, что планируется строительство обогатительной фабрики, необходимо принятие управленческих решений по обеспечению экологически безопасного производства.

Литература

(п.п. 1, 2, 9, 10, 12, 15–20, 22–24, 32, 34, 35 см. References)

- Макаров А.Б., Талалай А.Г. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль. *Литосфера*. 2012; (1): 172–6.
- Масленников В.В., Мелекесцева И.Ю., Масленникова С.П., Масленникова А.В., Третьяков Г.А., Аюпова Н.Р. и соавт. *Дифференциация токсичных элементов в условиях литогенеза и техногенеза колчеданных месторождений*. Екатеринбург; 2016.
- Тельцова Л.З., Бактыбаева З.Б., Габидуллина Г.Ф., Гуламанова Г.А. Геоэкологические проблемы на территориях с развитой горнорудной промышленностью (Республика Башкортостан). *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2018; (12): 48–51.
- Фархутдинов И.М., Фархутдинова Л.М., Суфияров Р.С. Региональные геологические факторы и сахарный диабет. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016; 327(3): 38–46.
- Бакиров А.Б., Валеев Т.К., Сулейманов Р.А., Бактыбаева З.Б., Рахматуллин Н.Р., Аллаярова Г.Р. и соавт. Санитарно-гигиеническая характеристика горнорудных территорий и оценка риска здоровью населения от воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды. *Медицина труда и экология человека*. 2018; (1): 5–12.
- Карамова Л.М., Башарова Г.Р., Гайнуллина М.К., Власова Н.В. Врождённые пороки развития в различных промышленных регионах Республики Башкортостан. *Медицина труда и промышленная экология*. 2019; (1): 20–4. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-1-20-24>

11. Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Землянова М.А. *Гигиеническая индикация последствий для здоровья при внешнесредовой экспозиции химических факторов*. Пермь: Книжный формат; 2011.
13. Рыбкин В.С., Богданов Н.А., Чуйков Ю.С., Теплая Г.А. Тяжёлые металлы как фактор возможных экологических обусловленных заболеваний в Астраханском регионе. *Гигиена и санитария*. 2014; 93(2): 27–31.
14. Май И.В., Клейн С.В., Веквшинина С.А., Ханхарева С.С., Мадеева Е.В., Землянова М.А. и соавт. Гигиеническая оценка канцерогенного риска и онкологической заболеваемости населения, проживающего в зоне влияния мест складирования отходов горнорудного комбината. *Здоровье населения и среда обитания*. 2018; 5(302): 40–7. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-302-5-40-47>
21. Теплая Г.А. Тяжёлые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы). *Астраханский вестник экологического образования*. 2013; (1): 182–92.
25. Абдрахманов Р.Ф., Ахметов Р.М. Геохимия пород и подземных вод в зоне влияния Семёновской ЗИФ. *Геологический сборник*. 2013; (10): 211–21.
26. Определитель высших растений Башкирской АССР. Часть 1. М.: Наука; 1988.
27. Янин Е.П. *Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки)*. М.; 2002.
28. Даувалятер В.А. *Геоэкология донных отложений озёр*. Мурманск; 2012.
29. Голованов Я.М., Ямалов С.М., Бактыбаева З.Б., Петров С.С. Водная растительность Южного Урала (Республика Башкортостан). П. Класс *Potamogetea*. *Растительность России*. 2015; (27): 40–77. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2015.27.40>
30. Жуковская Н.В., Власов Б.П., Ковальчик Н.В. Содержание тяжелых металлов в высшей водной растительности водоёмов и водотоков Беларуси: пространственные и видовые особенности. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019; (1): 22–34. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-1-22-34>
31. Перельман А.И. *Геохимия*. М.: Высшая школа; 1989.
33. Капитонова О.А., Шалавина В.С., Алтынцев А.В. Содержание тяжёлых металлов в макрофитах рыбохозяйственных прудов СГУП «Рыбхоз «Пиктовка» (Удмуртская Республика). *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014; 16(1): 255–60.

References

1. Kivinen S., Vartiainen K., Kumpula T. People and post-mining environments: PPGIS mapping of landscape values, knowledge needs, and future perspectives in northern Finland. *Land*. 2018; 7(4): 151. <https://doi.org/10.3390/land7040151>
2. Mancini L., Sala S. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resour. Policy*. 2018; 57: 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>
3. Makarov A.B., Talalay A.G. Technogenic mineral deposits and their ecological role. *Lithosphere*. 2012; 1: 172–6. (in Russian)
4. Maslennikov V.V., Melekestseva I.Yu., Maslennikova S.P., Maslennikova A.V., Tret'yakov G.A., Ayupova N.R., et al. *Differentiation of Toxic Elements During Lithogenesis and Technogenesis of Massive Sulfide Deposits [Differentsiatsiya toksichnykh elementov v usloviyakh litogeneza i tekhnogeneza kolchedannykh mestorozhdeniy]*. Ekaterinburg; 2016. (in Russian)
5. Tel'tsova L.Z., Baktybaeva Z.B., Gabidullina G.F., Gulamanova G.A. Geoecological problems in territories with the development of mining industry (Republic of Bashkortostan). *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2018; (12): 48–51. (in Russian)
6. Farkhutdinov I.M., Farkhutdinova L.M., Sufiyarov R.S. Regional geological factors and diabetes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2016; 327(3): 38–46. (in Russian)
7. Bakirov A.B., Valeev T.K., Suleymanov R.A., Baktybaeva Z.B., Rakhmatullin N.R., Allayarova G.R., et al. Sanitary-hygienic characteristics of the mining areas and evaluation of the health risk from exposure to adverse environmental factors. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2018; (1): 5–12. (in Russian)
8. Karamova L.M., Basharova G.R., Gaynullina M.K., Vlasova N.V. Congenital anomalies in various industrial regions of Bashkortostan Republic. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2019; (1): 20–4. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-1-20-24> (in Russian)
9. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy metal toxicity and the environment. *Mol. Clin. Environ. Toxicol*. 2012; 101: 133–64. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
10. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip. Toxicol*. 2014; 7(2): 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
11. Onishchenko G.G., Zaytseva N.V., Zemlyanova M.A. *Hygienic Indication of Health Effects During Environmental Exposure of Chemical Factors [Gigienicheskaya indikatsiya posledstviy dlya zdorov'ya pri vneshnesredovoy ekspozitsii khimicheskikh faktorov]*. Perm': Knizhnyy format; 2011. (in Russian)
12. Kakkor P., Jaffery F.N. Biological markers for metal toxicity. *Environ. Toxicol. Pharmacol*. 2005; 19(2): 335–49. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2004.09.003>
13. Rybkin V.S., Bogdanov N.A., Chuykov Yu.S., Teplaya G.A. Heavy metals as a factor of possible environmentally caused illnesses in the Astrakhan region. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2014; 93(2): 27–31. (in Russian)
14. Май И.В., Клейн С.В., Веквшинина С.А., Ханхарева С.С., Мадеева Е.В., Землянова М.А., et al. Hygienic assessment of carcinogenic risk and oncologic morbidity of population living on territories where industrial wastes from an ore mining and processing enterprise were stored. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2018; 5(302): 40–7. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-302-5-40-47> (in Russian)
15. Colombo M., Hamelin C., Kouassi E., Fournier M., Bernier J. Differential effects of mercury, lead, and cadmium on IL-2 production by Jurkat T cells. *Clin. Immunol*. 2004; 111(3): 311–22. <https://doi.org/10.1016/j.clim.2004.02.005>
16. Morais S., Costa F.G., Pereira M.L. Heavy metals and human health. In: Oosthuizen J., ed. *Environmental Health – Emerging Issues and Practice*. Rijeka, Croatia: InTech; 2012: 227–46. <https://doi.org/10.5772/29869>
17. Lentini P., Zanolli L., Granata A., Signorelli S.S., Castellino P., Dell'Aquila R. Kidney and heavy metals – The role of environmental exposure (review). *Mol. Med. Rep*. 2017; 15(5): 3413–19. <https://doi.org/10.3892/mmr.2017.6389>
18. Compaore W.F., Dumoulin A., Rousseau D.P.L. Metals and metalloid in gold mine pit lakes and fish intake risk assessment, Burkina Faso. *Environ. Geochem. Health*. 2020; 42(2): 563–77. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00390-8>
19. Linnik P.M., Zubenko I.B. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes Reserv. Res. Manag.* 2002; 5(1): 11–21. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00094.x>
20. Pavlova A.S., Kashulin N.A., Denisov D.B., Terentev P.M., Kashulina T.G., Dauval'ter V.A. Distribution of chemical elements between the components of the ecosystem of arctic lake Bolshoy Vudayvr (Khibiny, Murmansk oblast). *Contemp. Probl. Ecol*. 2019; (12): 280–97. <https://doi.org/10.1134/S1995425519030090>
21. Teplaya G.A. Heavy metals as a factor of environmental pollution (review). *Astrakhan Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2013; (1): 182–92. (in Russian)
22. Anishchenko O.V., Kravchuk E.S., Gribovskaya I.V., Gladyshev M.I., Sushchik N.N. Distribution and migration of metals in trophic chains of the Yenisei ecosystem near Krasnoyarsk City. *Water Resour*. 2009; 36(5): 594–603. <https://doi.org/10.1134/S0097807809050121>
23. Mataba G.R., Verhaert V., Bervoets L. Distribution of trace elements in the aquatic ecosystem of the Thigithe river and the fish Labeo victorinus in Tanzania and possible risks for human consumption. *Sci. Total Environ*. 2018; (628–629): 621–30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.005>
24. Cheney C.L., Eccles K.M., Kimpe L.E., Thienpont J.R., Korosi J.B., Blais J.M. Determining the effects of past gold mining using a sediment palaeotoxicity model. *Sci. Total Environ*. 2020; 718: 137308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137308>
25. Abdrakhmanov R.F., Akhmetov R.M. Geochemistry of rocks and groundwater in the zone of influence of Semenovskaya GRF. *Geologicheskii sbornik*. 2013; (10): 211–21. (in Russian)
26. *The identification manual of higher plants of the Bashkir SSR*. Part 1. Moscow: Nauka; 1988. (in Russian)
27. Янин Е.П. *Техногенные Геохимические Ассоциации в Донных Седиментах Малых Рек (Composition, Features, Assessment Methods) [Tekhnogennyye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody otsenki)]*. Moscow; 2002. (in Russian)
28. Даувалятер В.А. *Geoecology of Lakes Bottom Sediments [Geoekologiya donnykh otlozheniy ozer]*. Murmansk; 2012. (in Russian)
29. Golovanov Ya.M., Yamalov S.M., Baktybaeva Z.B., Petrov S.S. Aquatic vegetation of the South Urals (Bashkortostan Republic). II. Class Potamogetea. *Rastitel'nost' Rossii*. 2015; (27): 40–77. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2015.27.40> (in Russian)
30. Zhukovskaya N.V., Vlasov B.P., Koval'chik N.V. Heavy metals contents in higher aquatic plants of Belarusian reservoirs and rivers: spatial and species features. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya*. 2019; (1): 22–34. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-1-22-34> (in Russian)
31. Perel'man A.I. *Geochemistry [Geokhimiya]*. Moscow: Vysshaya shkola; 1989. (in Russian)
32. Opekunova M., Opekunov A., Somov V., Kukushkin S., Papyan E. Transformation of metals migration and biogeochemical cycling under the influence of copper mining production (the Southern Urals). *Catena*. 2020; 189: 104512. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104512>
33. Kapitonova O.A., Shalavina V.S., Altyntsev A.V. The content of heavy metals in macrophytes of the fishery ponds ASUE «Rybkhoz «Pikhtovka» (Udmurt Republic). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo isentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2014; 16(1): 255–60. (in Russian)
34. Taiwo A.M., Awomeso J.A. Assessment of trace metal concentration and health risk of artisanal gold mining activities in Ijeshaland, Osun State Nigeria – Part 1. *J. Geochem. Explor*. 2017; 177: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.009>
35. Song J., Liu Q., Sheng Y. Distribution and risk assessment of trace metals in riverine surface sediments in gold mining area. *Environ. Monit. Assess*. 2019; 191(3): 191. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7311-9>