

УДК 614.7:614.445

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ БИОТЕСТИРОВАНИЯ  
В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ**

Иванов Д.Е.<sup>1,3</sup>, Сулейманов Р.А.<sup>2</sup>, Косарев А.В.<sup>1</sup>, Микеров А.Н.<sup>1,4</sup>, Кошелева И.С.<sup>1</sup>,  
Валеев Т.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский медицинский научный центр гигиены ФБУН «Федеральный научный центр  
медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»  
Роспотребнадзора, Саратов, Россия

<sup>2</sup>ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» Роспотребнадзора,  
Уфа, Россия

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Саратовская государственная юридическая академия», Саратов, Россия

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И.  
Разумовского», Саратов, Россия

*Цель работы заключалась в оценке возможности применения методов биотестирования в интегральной оценке качества воды поверхностных источников водоснабжения населения. **Объект исследования:** поверхностные источники водоснабжения населения. **В результате исследования** были изучены возможности применения методов биотестирования в оценке гигиенической безопасности поверхностных водисточников, предложена система биотестов, включающая такие тест-объекты, как дафнии, хлореллу, половые клетки быка, клетки человека и рыбы. Разработаны принципы интегральной санитарно-гигиенической оценки безопасности воды. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов в деятельности органов Роспотребнадзора, в администрации муниципальных образований, водохозяйственных организациях, в исследовательской работе.*

**Ключевые слова:** биотестирование, качество воды, источники водоснабжения, хлорелла, дафнии, клетки млекопитающих, рыбы.

**Для цитирования:** Иванов Д.Е., Сулейманов Р.А., Косарев А.В., Микеров А.Н., Кошелева И.С., Валеев Т.К. Возможности применения методов биотестирования в интегральной оценке качества поверхностных источников водоснабжения населения. Медицина труда и экология человека. 2022; 1:159-176.

**Для корреспонденции:** Иванов Дмитрий Евгеньевич, докт. биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела гигиены окружающей среды Саратовского медицинского научного центра гигиены ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, e-mail: ivanov@smncg.ru

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов:** авторы данной статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2022-10111>

## THE POSSIBILITIES OF APPLYING BIOTESTING METHODS IN THE INTEGRATED ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SURFACE WATER SUPPLY SOURCES OF THE POPULATION

Ivanov D.E.<sup>1,3</sup>, Suleymanov R.A.<sup>2</sup>, Kosarev A.V.<sup>1</sup>, Mikerov A.N.<sup>1,4</sup>, Kosheleva I.S.<sup>1</sup>, Valeev T.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Saratov, Russia

<sup>2</sup>Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

<sup>3</sup>Saratov State Law Academy, Saratov, Russia

<sup>4</sup>Saratov Razumovskiy State Medical University, Saratov, Russia

*The purpose of the work was to assess the possibility of using biotesting methods in the integrated assessment of water quality of surface water supply sources of the population. Object of research: surface sources of water supply of the population. As a result of the study, the possibilities of using biotesting methods in assessing the hygienic safety of surface water sources were studied, a system of biotests was proposed, including such test objects as daphnia, chlorella, ox germ cells, human and fish cells. The principles of integrated sanitary and hygienic assessment of water safety have been developed. The practical significance of the study lies in the possibility of using its results in the activities of regulatory organizations to ensure the sanitary and epidemiological welfare of the population, in the administration of municipalities, water management organizations, in research work.*

**Keywords:** biotesting, water quality, water supply sources, chlorella, daphnia, mammalian cells, fish.

**Citation:** Ivanov D.E., Suleymanov R.A., Kosarev A.V., Mikerov A.N., Kosheleva I.S., Valeev T.K. The possibilities of applying biotesting methods in the integrated assessment of the quality of surface water supply sources of the population. *Occupational health and human ecology.* 2022;1:159-176.

**For correspondence:** Ivanov Dmitry Evgenievich, Dr. biol. Sci., Leading Researcher, Department of Environmental Health, Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies; e-mail: [ivanov@smncg.ru](mailto:ivanov@smncg.ru)

**Financing:** The study had no financial support.

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

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2022-10111>

Высокий уровень загрязнения поверхностных вод, являющихся источниками хозяйственно-питьевого водоснабжения, представляет серьезную опасность для здоровья населения. Это относится к территориям бассейнов рек Волги, Урала, Камы, Белой, где поверхностные водоемы характеризуются значительным загрязнением компонентами химической и биологической природы.

Существующие приемы оценки качества поверхностных источников водоснабжения не всегда отражают реальный характер и уровень неблагоприятного воздействия на организм человека. Это обусловлено тем, что, как правило, исследователями учитывается только изолированное воздействие отдельных поллютантов, не берутся в расчеты их комплексное действие, процессы трансформации химических соединений, а также микробиологические и паразитологические показатели, характеризующие неканцерогенные, канцерогенные и эпидемиологические риски для здоровья населения.

С нашей точки зрения, наиболее полное представление о безопасности водоисточников можно получить только при комплексном исследовании, которое включает в себя изучение санитарно-химических, микробиологических, радиационных, органолептических и паразитологических показателей в соответствии с действующими гигиеническими требованиями. Важное значение имеет совершенствование принципов интегральной оценки качества водоисточников, базирующейся на использовании существующих методов биотестирования [1]. При этом комплексная оценка качества водной среды с применением систем биоиндикации и методов биотестирования позволяет определить реакцию водной биоты на загрязнение по различным тестовым организмам, охватывающим все группы биологического сообщества.

**Цель работы:** оценить возможности применения методов биотестирования в интегральной оценке качества воды поверхностных источников водоснабжения населения.

**Задачи,** решаемые для достижения цели:

1. Провести информационный поиск по вопросам применения методов биотестирования для оценки качества водоисточников.
2. Разработать принципы интегральной санитарно-гигиенической оценки безопасности воды поверхностных водоисточников.
3. Выбрать наиболее оптимальные тест-объекты для эффективной системы биотестирования источников водоснабжения населения.

**Материалы, объекты и методы исследования.**

В исследовании использован библиографический метод (анализ литературы по проблеме исследования). Проведено обобщение, сравнение, анализ и систематизация эмпирических и теоретических данных. Материалы сайтов <https://www.sciencedirect.com> и <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>, [cyberleninka.ru](http://cyberleninka.ru), e-library. Объекты исследования: поверхностные источники водоснабжения населения.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ библиографических материалов позволил определить основные подходы и принципы, необходимые для включения в интегральную оценку качества поверхностных источников водоснабжения.

Основными принципами оценки гигиенической безопасности водоисточников являются следующие:

*1). Системность (комплексность исследования).*

Существующие микробиологические, токсикологические, санитарно-химические, радиационные, органолептические и паразитологические методы, применяемые по отдельности, естественно, дадут неполные представления о гигиенической безопасности воды для человека. Химические методы, например, позволяют определить превышения ПДК контролируемых веществ, но не всегда возможно с их помощью оценить синергические эффекты веществ на организм человека. С помощью методов биотестирования на различных живых тест-объектах сложно определить какое вещество оказало токсическое воздействие, так как тест-организм реагирует на комплекс веществ, находящихся в исследуемой воде. Поэтому необходимо применять и рассматривать группы методов как интегральную систему оценки водоисточников, позволяющую провести наиболее подробную экспертизу и сделать вывод о их пригодности для использования населением.

*2). Оптимизация.*

При проведении санитарно-гигиенического мониторинга источников водоснабжения населения важно получить достоверную информацию о качестве воды, которая гарантирует гигиеническую безопасность при минимальном количестве исследований и небольших финансовых затратах.

*3). Экспрессность.*

Необходимо использовать методики санитарно-гигиенического анализа и биотестирования, которые дают возможность быстро и достоверно оценить состояние водоисточника. Быстрота получения данных о качестве воды имеет принципиальное значение в случаях аварий и чрезвычайных ситуаций. Для оперативной оценки источника водоснабжения предложена система из нескольких тест-объектов, относящихся к различным группам организмов: семена кресс-салата, люминесцентные бактерии, инфузории, цериодафнии, дафнии и хлорелла [2].

Авторами статьи (Иванов Д.Е. и соавт. (2012) получен патент на полезную модель для экспресс-оценки качества природных сред. В устройстве используются два основных тест-объекта: сперматозоиды быка и инфузории[3]. При определении с помощью данных биотестов токсичности воды можно говорить о загрязнении водоема, который непригоден для обитания инфузорий. Характер токсичных веществ определяется в дальнейшем методами количественного и качественного химического анализа.

*4). Применение надежных и современных методов исследования.*

Для получения качественных результатов необходимо проведение исследования проб воды в специализированных аккредитованных лабораториях с помощью

аттестованных методик, допущенных для санитарно-гигиенического и государственного экологического контроля в соответствии с СанПиН 2.1.3684-21 и методическими рекомендациями [4, 5]. С помощью методов биотестирования изучают токсические эффекты загрязняющих веществ по различным тест-реакциям: выживаемости, плодовитости тест-организмов и др. Определяют индекс токсичности, являющийся критерием безопасности воды.

К использованию методов биотестирования в гигиене воды некоторые ученые относятся критически [6]. Основная проблема, которая возникает при биотестировании воды – это перенос результатов определения токсичности с биологического тест-объекта (дафнии, водоросли, бактерии и др.) на человека по причине не одинаковой чувствительности к токсикантам различных организмов. Специфические и отдаленные эффекты загрязнителей также в большинстве случаев невозможно изучить с помощью простейших организмов, используемых при биотестировании. Г.Н. Красовский и соавт. (2009) считают, что необходимо сравнивать концентрации реагирования тест-объектов с гигиеническими нормативами как с эталоном оценки безвредности питьевой воды для человека по соотношению LC50 (EC50)/ПДК.

В настоящее время основными методами оценки качества воды являются химические. Однако они значительно дороже методов биотестирования и с каждым годом возрастает количество загрязняющих веществ, подлежащих санитарно-гигиеническому контролю, что значительно усложняет процесс гигиенической экспертизы. Методы химического анализа более длительные и не учитывают возможных синергических эффектов химических веществ. Возможна трансформация в воде некоторых загрязнителей и это может привести к образованию более стабильных и трудно идентифицируемых соединений, токсическое действие которых на живые организмы практически не изучено. Использование методов биотестирования в гигиенической оценке воды не отрицается, но их применение не может полностью заменить химические методы контроля загрязняющих веществ [7-9].

Рядом авторов отмечена перспективность применения биотестов для экотоксикологического анализа воды [10]. Так, для биотестирования воды, загрязненной продуктами переработки (экстракции) нефти рекомендуют использовать несколько тест-объектов: бактерии (*Vibrio fischeri*), водоросль хлореллу, дафний, рыб (*Danio rerio*), клевер (*Trifolium repens*) и пшеницу (*Triticum aestivum*) [11]. Для изучения нейротоксичности проб воды предлагают использовать в качестве тест-объекта стволовые нервные клетки [12].

Методы биомониторинга можно применять для изучения качества воды и состояния водных экосистем. Например, при повышении концентрации солей в водоеме гибнут одноклеточные организмы (хлорелла, инфузории и др.); затем исчезают животные и рыбы, для которых они являются пищей. Таким образом, нарушается водная экосистема. Накопление в водных организмах тяжелых металлов и пестицидов приводит к их вымиранию. Поэтому, при обнаружении методами биомониторинга подобных изменений, целесообразно проведение количественного и качественного химического анализа воды

для идентификации токсикантов, которые вызвали данные нарушения. Таким образом, с помощью биоиндикаторов можно обнаружить как начальный этап загрязнения водоисточника, даже когда концентрация токсиканта может и не превышать ПДК, так и наличие острой и хронической токсичности при значительном загрязнении и опасности для человека.

Наиболее полно оценить качество водоисточников, используя только химические методы анализа, в настоящее время невозможно. В реальной практике гигиенических лабораторий Российской Федерации (РФ), как правило, определяют 20-40 показателей в соответствии с гигиеническими нормативами. Это может не отражать реальной опасности воды для человека, так как в данном случае мы можем судить только о ПДК данных показателей не учитывая, например, возможные токсические эффекты продуктов трансформации некоторых химических веществ в водной среде, синергические эффекты и др. Так, в РФ не нормируются в воде токсины цианобактерий (сине-зеленых водорослей), которые представляют опасность для здоровья человека.

Аттестованные методики биотестирования могут быть пригодны для первоначального изучения состояния водоисточника. Если будет обнаружена токсичность проб воды в отношении применяемых при биотестировании тест-объектов, то необходимо определить загрязнитель и его концентрацию химическими методами. Биотестирование целесообразно проводить на тест-объектах, относящихся к различным классам живых организмов (беспозвоночные, половые клетки млекопитающих, низшие растения, клетки человека, рыбы). Это даст возможность повысить качество анализа токсичности воды, но необходимо знать чувствительность и специфичность тест-объектов к загрязняющим воду химическим веществам (при какой концентрации и какие вещества оказывают острое или хроническое токсическое действие). Далее нужно сравнивать с ПДК.

Методы биотестирования можно использовать и при исследовании влияния различных загрязнителей на водную биоту, изучении путей распространения токсикантов в водных объектах, оценке превращений химических веществ в воде в процессе водоподготовки, изучении безопасности водоемов и питьевой воды при различных авариях.

5). *Учет возрастных и гендерных особенностей реагирования на токсиканты при оценке гигиенической безопасности воды.*

Еще одна проблема, с которой приходится сталкиваться при оценке гигиенической безопасности воды – это недостаточная надежность ПДК некоторых химических веществ. Так, установлена недостаточная надежность ПДК свинца, перхлоратов, молибдена, мышьяка, акрилонитрила, мышьяка для репродуктивного здоровья женщин и ПДК по молибдену, сурьме, перхлоратам, нитратам, фтору, цианидам, диметиламину и фталатам для детей [13]. В настоящее время возникла необходимость корректировки ряда гигиенических нормативов для данной категории населения с учетом возрастных и гендерных особенностей реагирования организма на токсиканты, содержащиеся в питьевой воде.



б). *Учет региональных особенностей при выборе методов оценки качества водоисточников.*

При разработке системы методов оценки качества воды необходимо учитывать особенности конкретного региона (аридность, геохимические аномалии, влияние антропогенных факторов и др.). В первую очередь проводится анализ приоритетных загрязнителей, характерных для данной местности. Так, поверхностные и подземные водоисточники аридных территорий характеризуются, как правило, высоким содержанием солей определяющих жесткость, а также железа и марганца. Поэтому в данном случае целесообразно, в первую очередь, проводить оценку содержания в воде данных химических веществ.

Таким образом, принципы системности, экспрессности, оптимизации и применения современных методов исследования являются основными для оценки водоисточников. Интегральная система мониторинга предполагает исследование качества водоисточника как санитарно-химическими, так и биологическими методами с учетом региональных особенностей. Полученные в ходе мониторинга данные о качестве водоисточника будут учитываться в процессе дальнейшей водоподготовки.

Анализ библиографических данных показал, что для эффективной системы биотестирования состояния источников водоснабжения населения в качестве основных тест-объектов применяются водоросли рода хлорелла, дафнии, рыбы, клетки млекопитающих.

*Возможность применения хлореллы как тест-объекта для биотестирования водоисточников*

Одноклеточная зеленая водоросль Хлорелла (*Chlorella vulgaris*) обитает в водоемах, почве, древесных стволах. Входит в состав лишайников. Ее размер колеблется от 2 до 5 мкм. Имеет тонкую целлюлозную оболочку без жгутиков. Размножение бесполое. Споры неподвижные. Питание авто- и гетеротрофное. При недостаточном освещении хлорелла переходит на гетеротрофный тип питания.

С помощью хлореллы проводилась оценка токсичности водоема-охладителя Балаковской АЭС [14,15]. Результаты проведенных исследований показали, что вода из охладителя АЭС оказывает более выраженное острое токсическое действие на хлореллу. Это связано с высокой концентрацией солей в водоеме-охладителе Балаковской АЭС. Данные о гидрохимическом составе водоема-охладителя свидетельствуют о том, что общая жесткость воды и солесодержание значительно выше, чем в реке Волге. Общая жесткость воды в водоеме-охладителе составляла 6,63 мг экв /дм<sup>3</sup>, а в реке Волге (выше Балаковской АЭС) – 3,18 мг экв /дм<sup>3</sup>.

Марченко Т. А. и соавт. (2016) изучали качество воды в притоках р.Волга в акватории Горьковского водохранилища с использованием тест-культуры водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. В притоках реки Волга в акватории Горьковского водохранилища были обнаружены превышения ПДК по показателям медь, железо, марганец. Биотестирование на данном тест-

объекте определило пробы воды из двух притоков Волги (р. Мера и р. Сунжа в Ивановской области) как слаботоксичные, что коррелирует с результатами санитарно-химических анализов [16].

В работе Р.Р. Муфтиевой и соавт. (2020) была произведена оценка чувствительности хлореллы к сульфатам железа, марганца, меди, цинка, никеля в лабораторных условиях методом микроскопии. Установлено, что воздействие растворов солей вызывало плазмолиз клеток водоросли. Наиболее токсичное действие отмечено для солей меди, железа и цинка [17].

Установлено, что металлы в небольших концентрациях оказывают благоприятное влияние на рост культуры клеток. Лучшие показатели роста хлореллы отмечаются в среде, включающей в свой состав такие макроэлементы как кальций, магний, калий и микроэлементы кобальт, медь, цинк, марганец, бор [18].

В.Н. Чупис и соавт. (2008) изучали влияние на хлореллу соединений мышьяка (арсенита натрия и люизита). Концентрации раствора арсенита 0,1 и 0,2 г/л оказывали токсическое воздействие. Гипертоксичным для хлореллы являлся раствор реакционной массы люизита с кратностью разведения 200 [19,20].

Хлорелла проявляет также чувствительность к растворимым формам свинца. Исследователи воздействовали на клетки культуры водоросли, взятой из водоема, растворами Pb (1000, 0,1 и 0,01 мг/л). Подсчет клеток проводили один раз в три дня с помощью счетной камеры методом световой микроскопии. Затем культуру анализировали на pH, удельную вязкость и растворенный кислород с помощью портативного многопараметрического измерителя (Handylab 680 FK, SI Analytics). Клетки *Chlorella vulgaris* способны обеспечить обнаружение Pb в воде за счет изменения pH, электропроводности и растворенного кислорода, при котором все три параметра показали положительные изменения. Тяжелый металл, такой как Pb, положительно заряжен и, следовательно, способствует повышению проводимости водного объекта. Представленные исследования подтвердили пагубное воздействие Pb на рост хлореллы и содержание хлорофилла в *C. vulgaris* [21].

Другие штаммы водоросли хлорелла также проявляют чувствительность к свинцу. Чуфицким С.В. и Ляшовой А.С. (2019) исследован штамм водоросли *Chlorella sorokiniana*. Использование модельного токсиканта ацетата свинца показывало прямую взаимосвязь гибели клеток с увеличением концентрации вещества [22].

Нефтедобыча является одним из источников загрязнения вод из-за большого объема воды, используемого для извлечения нефти путем закачки под высоким давлением. В работе Calderón-Delgado I.C, Mora-Solarte D.A., Velasco-Santamaría (2019) изучалось влияние нефтепродуктов межпластовых вод на тест-объект *Chlorella Vulgaris*. Результаты исследования выявили изменение роста, цвета, размера клеток и ферментативной активности у *Chlorella vulgaris*. Усиление окраски в культуре или увеличение плотности



клеток являются реакцией на некоторую степень адаптации к этому промышленному сбросу; хотя наблюдалась токсичность и изменение ферментативной активности [23]. Проводились исследования влияния нефтепродуктов на хлореллу помощью флуората «Фотон-10», изучая реакцию интенсивности ее флюоресценции. Присутствие нефти в культуральной среде в концентрации 1000 мг/л вызывало снижение замедленной флуоресценции *Chlorella vulgaris* [24].

Одним из положительных качеств водоросли *Chlorella vulgaris* как тест-объекта является вариативность штаммов данного вида. Интегральная оценка качества воды озера Коба (Казахстан), находящегося под сильным антропогенным загрязнением, включала в себя химический анализ вод и биотестирование с применением "дикого" штамма *Chlorella vulgaris* sp-3K [25]. Индекс загрязнения воды озера позволял относить его к 4 классу качества (грязное). Вода обследованного водоисточника высокоминерализованная, очень жесткая, что характерно для водоемов аридных территорий Согласно данным, представленным авторами, превышения ПДК для нитратов составили (5 ПДК), хлориды, железо общее и сульфаты – в размере 3 ПДК, фториды – 1 ПДК, что оказывало прямое воздействие на тест-культуру, угнетая её рост. Это означает, что данный штамм дикого типа хлореллы может быть рекомендован к использованию как модельный объект для исследования загрязненных водоемов.

Установлена чувствительность хлореллы также к поверхностно-активным веществам [26].

На основании анализа представленных литературных данных можно сделать вывод, что зеленые протококковые водоросли рода *Chlorella* являются перспективными биотест-объектами ввиду удобства культивирования, высокой скорости роста и короткого жизненного цикла, благодаря чему возможно проведение экспресс-анализа. Такие функциональные показатели фотосинтетического аппарата как квантовый выход фотосинтеза (для хлореллы он достигает максимального значения при одновременном воздействии 13 световых волн длиной 680 и 700 нм.), флуоресценция хлорофилла и её изменение под действием внешних факторов способны отражать степень загрязненности среды.

#### *Дафнии как тест-объект для биотестирования водоисточников*

Дафнии довольно часто применяют как тест-объект в водной токсикологии, но использование разных клонов может приводить к значительному разбросу результатов [27].

RodriguesS. etal. (2021) считают, что дополнительное изучение ряда биохимических показателей у дафний (продуктов перекисного окисления липидов) повышает чувствительность данного биотеста при определении токсичности водоисточников [28]. Дафнии использовались для изучения токсичности речной воды, загрязненной битумом [29].

Показано, что тест-объект *Daphnia magna* можно использовать в качестве биоиндикатора для оценки загрязнения источников водоснабжения населения ионами марганца.

Для оценки загрязнения водоисточников ионами марганца вполне подходят такие тест-функции дафний как плодовитость, фильтрационная активность и выживаемость. Показано, что хроническое токсическое действие проб воды проявляется при концентрации 0,1 мг/л и выше. Плодовитость дафний достоверно снижается при концентрациях  $Mn^{2+}$  0,1-10 мг/л [30].

Ольковой А.С. (2015) при изучении хронической токсичности установлено, что *Daphnia magna* и *Ceriodaphnia affinis* чувствительны к хлориду и сульфату алюминия (5 и 10 ПДК). Наблюдалось также снижение плодовитости. Цериодафнии более чувствительны к хлориду алюминия, а дафнии к сульфату алюминия [31].

Ольковой А.С. (2017) проводилось исследование чувствительность дафний и цериодафний к минеральным формам азота. Установлено, что цериодафнии более чувствительны к нитрат-ионам [32]. Дафнии и цериодафнии обладают низкой чувствительностью к ряду гербицидов (имидазолиноны и производные пиридина). Гибель тест-объектов наступала при 300 и 350 ПДК, соответственно [33].

Nagel A. H. et al. (2021) установили, что таллий оказывает острое токсическое действие на дафний в концентрации 0,702 мг/л, а хроническое токсическое действие в дозе 0,0016 мг/л [34]. Следовательно, изучение на дафниях острой и хронической токсичности воды, загрязненной таллием, не позволяет оценить гигиеническую безопасность водоисточников, так как ПДК таллия для воды 0,0001 мг/дм<sup>3</sup>.

*Рыбы как тест-объекты для биотестирования источников водоснабжения населения*

Существуют биотесты, основанные на использовании биохимических и физиологических реакций рыб. Marinsk. et al. (2019) найдено изменение активности ацетилхолинэстеразы в мышцах при нахождении рыб (*Danio rerio*) в воде с концентрацией марганца 0,2-0,4 мг/л в течение 30 суток [35]. Исследование активности ацетилхолинэстеразы в мышцах рыб может быть полезно при оценке загрязнений марганцем источников водоснабжения населения (ПДК 0,1 мг/л).

В настоящее время в РФ биотестирование воды проводят в соответствии с методическими рекомендациями [36,37]. Критерием острого и хронического токсического действия воды является выживание рыб гуппи или данио.

*Биотестирование токсичности с помощью клеток млекопитающих*

Еськовым А.П. и соавт. (2009) разработана методика измерения индекса токсичности вод по изменению подвижности половых клеток млекопитающих *in vitro* [38]. Результаты исследований, полученные с использованием суспензионной культуры клеток – спермы быка, показали сопоставимость с результатами оценки токсического действия на организм млекопитающих. Токсичность проб воды оценивается на основании изменения подвижности сперматозоидов.

С помощью данной методики проведена оценка токсичности компонента ракетного топлива несимметричного диметилгидразина и продуктов его трансформации [39].

Данный метод может быть применен для экспресс-диагностики качества воды. Однако известно, что параметры, отражающие концентрацию, подвижность и морфологию сперматозоидов, не позволяют прогнозировать поведение сперматозоидов при оплодотворении. В настоящее время патологическое повышение фрагментации хроматина в сперматозоидах рассматривается как один из главных факторов, лимитирующих фертильность. Фрагментация ДНК сперматозоидов включает двухцепочечные и одноцепочечные разрывы молекулы. Следовательно, метод биотестирования, основанный только на изучении изменения подвижности сперматозоидов быка, имеет ряд ограничений и не позволяет выявлять полный спектр нарушений в половых клетках под влиянием токсических химических веществ. Более полную информацию о целостности ДНК сперматозоидов может дать метод «ДНК-комет», который в настоящее время перспективно внедрять в практику лабораторий биотестирования.

Для токсиколого-гигиенической оценки природных сред возможно применение методов биотестирования с использованием клеток человека [40]. Наиболее перспективно проводить биотестирование воды с помощью культуры диплоидных эмбриональных клеток. Также, как и в случаях применения других тест-объектов, имеются проблемы переноса результатов биотестирования на целостный организм.

**Заключение.** Методы биотестирования являются перспективными для применения в комплексной оценке гигиенической безопасности источников водоснабжения населения. Имеющиеся в настоящее время данные свидетельствуют о том, что методы биотестирования широко применяются как у нас в стране, так и за рубежом.

Провести качественную оценку водоисточников можно только руководствуясь принципами системности, экспрессности, оптимизации, учета региональных особенностей и применения надежных современных методов исследования. Исследования водоисточников должны носить интегральный характер с использованием как санитарно-химических, так и биологических методов.

Предложенные принципы интегральной санитарно-гигиенической оценки качества источников водоснабжения населения позволят в будущем успешно решать проблемы, связанные с глобальным потеплением климата и возрастанием количества загрязняющих химических веществ.

Эффективность биотестирования качества воды зависит от степени генетической однородности тест-культур и их чувствительности к загрязняющим веществам. В системе биотестирования должны быть тест-объекты, являющиеся наиболее характерными представителями водной биоты и относящиеся к различным классам живых организмов (прокариоты, эукариоты, автотрофы, гетеротрофы). Экспресс-оценка источников водоснабжения населения методами биотестирования может проводиться до проведения подробного химического анализа.

Основываясь на разработанных принципах оценки гигиенической безопасности воды, мы считаем наиболее оптимальной для комплексного эколого-гигиенического исследования

поверхностных источников водоснабжения населения систему биотестов, включающую дафнии, водоросль хлореллу, рыб, клетки человека и высших млекопитающих.

#### Список литературы:

1. Красовский Г.Н., Рахманин Ю.А., Егорова Н.А. Гигиеническое обоснование оптимизации интегральной оценки питьевой воды по индексу качества воды. Гигиена и санитария. 2015; 94(5): С. 5-6.
2. Чупис В.Н., Луцкай Е.А., Ларин И.Н., Загреков А.А, Ильина Е.В. Иванов Д.Е. Система биотестов для экологического мониторинга. Экология и промышленность России. 2008; 1: 44-2.
3. Иванов Д.Е., Рейтер А.В., Чупис В.Н., Журавлева Л.Л., Луцкай Е.А., изобретатели. Устройство для экспресс-оценки качества природных сред. Патент на полезную модель RU 120101 U1.10 сентября 2012.
4. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28 января 2021 г. (с изменениями и дополнениями).
5. Методические рекомендации МР 2.1.4.0032-11. Интегральная оценка питьевой воды централизованных систем водоснабжения по показателям химической безвредности. Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 31 июля 2011 г.
6. Красовский Г.Н., Рахманин Ю.А., Егорова Н.А. Экстраполяция токсикологических данных с животных на человека. М.: Медицина. 2009: 208.
7. Тулакин А.В. Биотестирование как критерий гигиенической оценки качества вод. Санитарный врач. 2018; 9:44-6.
8. Häder D., Erzinger G. Bioassays: Advanced Methods and Applications. [Электронный ресурс] // URL: [https://www.researchgate.net/publication/322386394\\_Bioassays\\_Advanced\\_Methods\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/322386394_Bioassays_Advanced_Methods_and_Applications) (дата обращения: 11.01.2022).
9. Bioassays for Evaluating Water Quality. [Электронный ресурс] URL: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-03/documents/bioassays\\_technical\\_brief\\_28mar18\\_final\\_0.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-03/documents/bioassays_technical_brief_28mar18_final_0.pdf) (дата обращения: 30.12.2021).
10. Xu J., Wei D., Wang F., Bai C., Du Y. Bioassay: A useful tool for evaluating reclaimed water safety. J. Environ. Sci. 2020; 88: 165-12 [Электронный ресурс] // URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31862058/> (дата обращения: 30.12.2021).
11. Babić S., Malev O., Pflieger M., Lebedev A. T., Mazur D. M., Kužić A., Čož-Rakovac R., Trebše P. Toxicity evaluation of olive oil mill wastewater and its polar fraction using multiple

- whole-organism bioassays. Science of The Total Environment.2019; 686: 903-12. PMID: 31412527 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.046
12. Masood M. I., Hauke N. T., Nasim M. J., Sarfraz M., Naseem M., Schäfer K. H. Neural stem cell-based *in vitro* bioassay for the assessment of neurotoxic potential of water samples. Environ. Sci. 2021; 101: 72-15. PMID: 33334539 DOI: 10.1016/j.jes.2020.07.028
  13. Плитман С.И., Сивочалова О.В., Тулакин А.В., Амплеева Г.П., Гильденскиольд О.А., Пивнева О.С. и др. Риск для здоровья женщин и детей при воздействии химических веществ, содержащихся в питьевой воде. Санитарный врач. 2019; 9: 73-6.
  14. Чупис В.Н., Журавлёва Л.Л., Жирнов В.А., Ларин И.Н., Луцкай Е.А., Емельянова Н.В. и др. Оценка качества воды водоёма охладителя Балаковской атомной электростанции методами биомониторинга. Теоретическая и прикладная экология. 2008; 2: 43-8.
  15. ПНД ФТ 14.1:2:3:4.10-04 (Т 16.1:2:2.3:3.7-04). Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. М.: Стандартинформ, 2014: 38.
  16. Марченко Т. А., Извекова Т. В., Гущин А. А., Гриневиц В.И., Головкина Е.А. Качество воды в притоках Р. Волга в акватории Горьковского водохранилища. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2016; 59(5): 89-6.
  17. Муфтиева Р.Р., Мусифуллина Г.А., Валиева Ч.З. Оценка токсичности солей тяжелых металлов на рост и развитие *Chlorella Vulgaris*. Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. 2020; 2(50): 112-6.
  18. Богданова А.А., Флёрова Е.А., Паюта А.А. Влияние условий культивирования на качественные и количественные показатели *Chlorella vulgaris*. Химия растительного сырья. 2019; 4: 293-12.
  19. Чупис В.Н., Луцкай Е.А., Ларин И.Н., Загреков А.А., Ильина Е.В., Иванов Д.Е. Чувствительность к арсениту натрия тест-организмов, используемых в многокомпонентной системе биотестирования качества природных сред. Теоретическая и прикладная экология. 2007; 1: 69-5.
  20. Чупис В.Н., Луцкай Е.А., Ларин И.Н., Загреков А.А., Ильина Е.В., Иванов Д.Е. Токсикологическая оценка реакционной массы, образующейся при детоксикации люизита. Токсикологический вестник. 2008; 1: 8-6.
  21. Hee C.W., Shing W. L., Chi C. K. Effect of Lead (Pb) exposure towards green microalgae (*Chlorella vulgaris*) on the changes of physicochemical parameters in water. South African Journal of Chemical Engineering. 2021; 34(2): 252-4. DOI:10.1016/j.sajce.2021.04.002.
  22. Чуфицкий С.В., Ляшова А.С. Влияние солей тяжелых металлов на флуоресценцию клеток *Chlorella sorokiniana* и *Pleurochloris magna*. Вестник Донецкого национального университета. 2019; 1: 129-8.

23. Calderón-Delgado I.C., Mora-Solarte D.A., Velasco-Santamaría Y.M. Physiological and enzymatic responses of *Chlorella vulgaris* exposed to produced water and its potential for bioremediation. *Environ. Monit. Assess.* 191(6): 399. DOI: 10.1007/s10661-019-7519-8.
24. Бородулина Т.С., Полонский В.И., Власова Е.С., Шашкова Т.Л., Григорьев Ю.С. Влияние загрязнения воды нефтью на замедленную флуоресценцию водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer и выживаемость рачков *Daphnia magna* Str. *Сибирский экологический журнал*. 2011; 1: 107-5.
25. Onerkhan G., Durmekbaeva Sh.N., Akhmetova N.P. Biotesting of Lake Copa pollution with *Chlorella* sp-3K cells. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2019;72 (18): 25-4.
26. Маркина Ж.В. Действие детергентов и поверхностно-активных веществ на рост, физиологические и биохимические показатели одноклеточных водорослей (обзор). *Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра*. 2009; 156: 125-10.
27. Munzinger A., Monicelli F. A comparison of the sensitivity of three *Daphnia magna* populations under chronic heavy metall stress. *Ecol. and Environ. Safety*. 1991; 22: 24-8.
28. Rodrigues S., Pinto I., Martins F., Formigo N., Antunes S.C. Can biochemical endpoints improve the sensitivity of the biomonitoring strategy using bioassays with standard species, for water quality evaluation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021; 215: 112151. PMID: 33743402 DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112151.
29. Cardoso D.N., Soares A. M.V.M., Wrona F. J., Loureiro S. Assessing the acute and chronic toxicity of exposure to naturally occurring oil sands deposits to aquatic organisms using *Daphnia magna*. *Science of The Total Environment*. 2020; 729: 138805. PMID: 32380325 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138805.
30. Каменец А.Ф., Иванов Д.Е. Возможности применения методов биотестирования для оценки загрязнения марганцем источников водоснабжения населения. *Санитарный врач*. 2019; 3: 68-6.
31. Олькова А.С. Сравнение чувствительности тест-организмов *Daphnia magna* и *Ceriodaphnia affinis* к соединениям алюминия. *Успехи современного естествознания*. 2015; 11: 203-3.
32. Олькова А.С. Чувствительность тест-организмов к минеральным формам азота. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2017; 167(6): 103-6.
33. Олькова А.С., Березин Г.И. Исследование чувствительности аттестованных биотестов к загрязнению вод современными гербицидами: модельные эксперименты. *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019; 78(2): 111-9.
34. Nagel A.H., Cuss C.W., Goss G.G., Shotyk W., Glover C.N. Chronic toxicity of waterborne thallium to *Daphnia magna*. *Environmental Pollution*. 2021; 268: 115776. PMID: 33069041 DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115776.
35. Marins K., Marcos L., Lazzarotto V., Boschetti G., Bertoncetto K. T., Sacht A., et al. Iron and manganese present in underground water promote biochemical, genotoxic, and behavioral



- alterations in zebrafish (*Danio rerio*). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019; 26(23): 23555-26. DOI: 10.1007/s11356-019-05621-0.
36. Рахманин Ю.А., Ческис А.Б., Еськов А.П., Кирьянова Л.А., Михайлова Р.И., Плитман С.И. и др. Методические рекомендации по применению методов биотестирования для оценки качества воды в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения. М. Госстандарт России 1995: 51.
37. Biotestirovanie zagryaznenny`x vod. Rukovodstvo po opredeleniyu metodom biotestirovaniya toksichnosti vod, donny`x otlozhenij, zagryaznyayushhix veshhestv i burovy`x rastvorov. М. RE`FIA, NIA-Priroda. 2002: 118.
38. Еськов А.П., Тимофеев М.А., Каюмов Р.И., Терехова В.А. Методика выполнения измерений индекса токсичности почв, почвогрунтов, вод и отходов по изменению подвижности половых клеток млекопитающих *in vitro*. М. МГУ.2009: 30. ФР.1.31.2009.06301; ПНД Ф 14.1:2:4:15-09; 16.1:2:2.3:3.13-09.
39. Смоленков А.Д., Попутникова Т.О., Смирнов Р.С., Родин И.А., Шпигун О.А. Сравнительная оценка токсичности несимметричного диметилгидразина и продуктов его трансформации методами биотестирования. *Теоретическая и прикладная экология.* 2013; 2: 85-6.
40. Чупис В.Н., Журавлева Л.Л., Иванов Д.Е. Применение в экологических исследованиях методов биотестирования на культурах клеток человека и животных. *Теоретическая и прикладная экология.* 2008; 4: 71-6.

#### References:

1. Krasovskiy G.N., Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A. Hygienic substantiation of optimization of the integral assessment of drinking water according to the water quality index. *Gigiena i sanitariya.* 2015; 94(5): S. 5-6.
2. Chupis V.N., Lushhaj E.A., Larin I.N., Zagrekov A.A, Ilina E.V. Ivanov D.E. The biotest system for ecological monitoring. *Ekologiya i promy`shlennost` Rossii.* 2008; 1: 44-2.
3. Ivanov D.E., Rejter A.V., Chupis V.N., Zhuravleva L.L., Lushhaj E.A., Inventors. Device for rapid assessment of the quality of natural environments. Utility model patent RU 120101 U1. September 10, 2012.
4. SanPiN 2.1.3684-21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures. Approved Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation January 28, 2021 (as amended).
5. Guidelines MP 2.1.4.0032-11. Integral assessment of drinking water of centralized water supply systems in terms of chemical safety. Approved. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation July 31, 2011.

6. Krasovskiy G.N., Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A. Extrapolation of toxicological data from animals to humans. *Meditcina*. 2009: 208.
7. Tulakin A.V. Biotestirovanie kak kriterij gigienicheskoj ocenki kachestva vod. *Sanitarny`j vrach*. 2018; 9: 44-6. Häder D., Erzinger G. *Bioassays: Advanced Methods and Applications*. - 2018.- Izdatel: Elsevier. - 464 P. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01695-9>. ISBN 978-0-12-811861-0.
9. *Bioassays for Evaluating Water Quality*. [bioassays-technical\\_brief\\_28mar18\\_final\\_0.pdf](https://www.epa.gov/research/bioassays-technical-brief-28mar18-final-0.pdf) Available from [https:// www.epa.gov/research](https://www.epa.gov/research).
10. Xu J., Wei D., Wang F., Bai C., Du Y. Bioassay: A useful tool for evaluating reclaimed water safety // *J. Environ. Sci*. 2020: v.88:165-176. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.08.014>.
11. Babić S., Malev O., Pflieger M., Lebedev A. T., Mazur D. M., Kužić A., Čož-Rakovac R., Trebše P. Toxicity evaluation of olive oil mill wastewater and its polar fraction using multiple whole-organism bioassays. *Science of The Total Environment*.2019; v. 686: 903-914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.046>.
12. Masood M. I., Hauke N. T., Nasim M. J., Sarfraz M., Naseem M., Schäfer K. H. Neural stem cell-based in vitro bioassay for the assessment of neurotoxic potential of water samples. *J. Environ. Sci*. 2021; v.101: 72-86. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.028>.
13. Plitman S.I., Sivochalova O.V., Tulakin A.V., Ampleeva G.P., Gildenskiold O.A., Pivneva O.S. et al. The risk to the health of women and children under the influence of chemicals contained in drinking water. *Sanitarny vrach*. 2019; 9:73-6.
14. Chupis V.N., Zhuravleva L.L., Zhirnov V.A., Larin I.N., Lushchai E.A., Emelyanova N.V. Evaluation of the water quality of the cooling reservoir of the Balakovo nuclear power plant using biomonitoring methods. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2008; 2:43-8.
15. PND FT 14.1:2:3:4.10-04 (T 16.1:2:2.3:3.7-04). Toxicological methods of control. Method for measuring the optical density of a culture of algae chlorella (*Chlorella vulgaris* Beijer) to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste water, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste. M.: Standart in form, 2014: 38.
16. Marchenko T. A., Izvekova T. V., Gushhin A. A., Grinevich V.I., Golovkina E.A. The quality of the reservoir in the tributaries of the Volga River in the water area of the Gorekovsky reservoir. *Izvestiya vy`sshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya texnologiya*. 2016; 59(5): 89-6.
17. Muftieva R.R., Musifullina G.A., Valieva Ch.Z. Evaluation of the toxicity of salts of heavy metals on the growth and development of *Chlorella vulgaris*. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. M. Akmully`*. 2020; 2(50): 112-6.
18. Bogdanova A.A., Flyorova E.A., Payuta A.A. Influence of cultivation conditions on the qualitative and quantitative indicators of *Chlorella vulgaris*. *Khimiya rastitelnogo syrya*. 2019; 4: 293-12.
19. Chupis V.N., Lushchai E.A., Larin I.N., Zagrekov A.A., Ilyina E.V., Ivanov D.E. Sensitivity to sodium arsenite of test organisms used in a multicomponent system for biotesting the quality of natural environments. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2007; 1: 69-5.

20. Chupis V.N., Lushchai E.A., Larin I.N., Zagrekov A.A., Ilyina E.V., Ivanov D.E. Toxicological assessment of the reaction mass formed during the detoxification of lewisite. *Toksikologicheskii vestnik*. 2008; 1: 8-6.
21. Hee C.W., Shing W. L., Chi C. K. Effect of Lead (Pb) exposure towards green microalgae (*Chlorella vulgaris*) on the changes of physicochemical parameters in water // *South African Journal of Chemical Engineering*. 2021; 34 (2): 252-255. DOI: 10.1016/j.sajce.2021.04.002.
22. Chufitsky S.V., Lyashova A.S. Effect of heavy metal salts on the fluorescence of *Chlorella sorokiniana* and *Pleurochloris magna* cells. *Vestnik Doneczkogo natsionalnogo universiteta*. 2019; 1: 129-8.
23. Calderón-Delgado I.C., Mora-Solarte D.A., Velasco-Santamaría Y.M. Physiological and enzymatic responses of *Chlorella vulgaris* exposed to produced water and its potential for bioremediation. *Environ. Monit. Assess.* 2019; Vol. 191 (6): 399. DOI: 10.1007/s10661-019-7519-8.
24. Borodulina T.S., Polonsky V.I., Vlasova E.S., Shashkova T.L., Grigoriev Yu.S. The effect of water pollution with oil on the delayed fluorescence of the algae *Chlorella vulgaris* Beijer and the survival rate of crustaceans *Daphnia magna* Str. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*. 2011; 1: 107-5.
25. Onerkhan G., Durmekbaeva Sh.N., Akhmetova N.P. Biotesting of Lake Copa pollution with *Chlorella* sp-3K cells. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2019;72 (18): 25-4.
26. Markina Zh.V. The effect of detergents and surfactants on the growth, physiological and biochemical parameters of unicellular algae (review). *Izvestiya Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo ryboxozyaystvennogo tsentra*. 2009; 156: 125-10.
27. Munzinger A., Monicelli F. A comparison of the sensitivity of three *Daphnia magna* populations under chronic heavy metall stress. *Ecol. and Environ. Safety*. 1991; v.22: 24-31.
28. Rodrigues S., Pinto I., Martins F., Formigo N., Antunes S.C. Can biochemical endpoints improve the sensitivity of the biomonitoring strategy using bioassays with standard species, for water quality evaluation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021; v. 215: 112151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112151>.
29. Cardoso D. N., Soares A. M.V.M., Wrona F. J., Loureiro S.. Assessing the acute and chronic toxicity of exposure to naturally occurring oil sands deposits to aquatic organisms using *Daphnia magna*. *Science of TheTotal Environment*. 2020; v. 729: 138805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138805>.
30. Kamenets A.F., Ivanov D.E. Possibilities of using biotesting methods to assess manganese contamination of water supply sources. *Sanitarny vrach*. 2019; 3: 68-6.
31. Olkova A.S. Comparison of the sensitivity of test organisms *Daphnia magna* and *Ceriodaphnia affinis* to aluminum compounds. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2015; 11: 203-3.
32. Olkova A.S. Sensitivity of test organisms to mineral forms of nitrogen. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017; 167(6): 103-6.

33. Olkova A.S., Berezin G.I. Investigation of the sensitivity of certified bioassays to water pollution by modern herbicides: model experiments. *Water and ecology: problems and solutions*. 2019; 78(2): 111-9. *Voda i ekologiya: problemy` i resheniya*. 2019; 78(2): 111-9.
34. Nagel A. H., Cuss C. W., Goss G. G., Shotyk W., Glover C. N. Chronic toxicity of waterborne thallium to *Daphnia magna*. *Environmental Pollution*. 2021; v.268 (Pt B): 115776. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115776>.
35. Marins K., Marcos L., Lazzarotto V. , Boschetti G., Bertoncetto K. T., Sachett A., Schindler M. S. Z., Chitolina R., Regginato A., Zanatta A. P., Siebel A. M., Magro J. D., Zanatta L. Iron and manganese present in underground water promote biochemical, genotoxic, and behavioral alterations in zebrafish (*Danio rerio*). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019; v.26(23): 23555-23570. doi: 10.1007/s11356-019-05621-0.
36. Rakhmanin Yu.A., Cheskis A.B., Eskov A.P., Kiryanova L.A., Mikhailova R.I., Plitman S.I. et al. Guidelines for the use of biotesting methods for assessing water quality in domestic and drinking water supply systems. *M. Gosstandart of Russia* 1995: 51.
37. Biotesting of polluted waters. Guidelines for the determination of the toxicity of water, bottom sediments, pollutants and drilling fluids by biotesting. *M. REFIA, NIA-Priroda*. 2002: 118.
38. Eskov A.P., Timofeev M.A., Kayumov R.I., Terekhova V.A. Methodology for measuring the toxicity index of soils, soils, waters and wastes by changing the mobility of germ cells of mammals in vitro. *M. MGU*. 2009: 30. FR.1.31.2009.06301; PND F 14.1:2:4:15-09; 16.1:2:2.3:3.13-09.
39. Smolenkov A.D., Poputnikova T.O., Smirnov R.S., Rodin I.A., Shpigun O.A. Comparative assessment of the toxicity of asymmetric dimethylhydrazine and its transformation products by biotesting methods. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2013; 2: 85-6.
40. Chupis V.N., Zhuravleva L.L., Ivanov D.E. Application in ecological research of biotesting methods on cultures of human and animal cells. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2008; 4: 71-6.

Поступила/Received: 20.01.2022

Принята в печать/Accepted: 01.03.2022