

ДИАГНОСТИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМА: СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА, БИОТЕСТИРОВАНИЯ И БИОИНДИКАЦИИ

Маханова Е. В.

DIAGNOSTICS OF THE WATER BODY ECOLOGICAL STATE: COMPARING RESULTS OF CHEMICAL ANALYSIS, BIOASSAY AND BIOINDICATION

Mahanova E. V.

Аннотация

Введение: в Европейском Союзе Водная рамочная директива (Water Framework Directive — WFD) дает законодательную возможность для комплексного подхода к диагностике экологического состояния водных объектов, включающего химический контроль, проведение биотестирования воды, биондикацию загрязнения по характеристикам водных сообществ и биомаркеров у отдельных видов. В Российской Федерации при проведении государственного экологического мониторинга водных объектов также используется комплексный подход. Однако далеко не все водные объекты охвачены пунктами государственного мониторинга. Информация о многих водных объектах поступает от водопользователей, проводящих производственный экологический контроль, не включающий оценку состояния биоты используемого водоема или водотока. В работе мы показываем, что в ряде случаев многолетние наблюдения за химическим составом сбрасываемых сточных вод и принимающих их природных вод не информативны с экологической точки зрения. Сопоставление результатов производственного контроля и научно-исследовательских работ по биодиагностике водоема позволит выявить экологический статус водного объекта и, в перспективе, — тенденцию его трансформации. **Методы и материалы:** исследовано озеро Ивановское старичного типа (Россия, Кировская область), принимающее сточные воды от теплоэлектростанции (ТЭЦ) и одновременно сообщаемое с рекой Вятка — источником питьевого водоснабжения. Анализировали химический состав сточных вод ТЭЦ и поверхностных вод озера. Сопоставляли результаты с данными биотестирования по ответным реакциям *Daphnia magna*, *Scenedesmus quadricauda*, *Paramecium caudatum*, *Escherichia coli* и биоиндикации по видовому составу прибрежно-водной растительности. **Результаты:** приоритетными загрязняющими веществами оказались ионы аммония и органические вещества (по биохимическому потреблению кислорода за 20 суток). Максимальная концентрация ионов аммония достигала 3,17 мг/дм³, что больше российской нормы в 6 раз. В одном из источников сточных вод вода имеет щелочную реакцию (рН до 9,01). В биотесте по гибели *D. magna* токсичности не установлено. Большинство проб не оказывали действия на тест-организмы или были умеренно токсичны. Пробы воды из озера оказывали

Abstract

Introduction: In the European Union, the Water Framework Directive (WFD) provides a legislative opportunity for an integrated approach to diagnosing the ecological state of water bodies, including chemical control, water bioassay, bioindication of pollution in terms of characteristics of aquatic communities and biomarkers in individual species. In the Russian Federation, we also use an integrated approach to conduct state environmental monitoring of water bodies. However, not all water bodies are covered by state monitoring points. Information on most of them comes from water users conducting industrial environmental monitoring, which does not include assessment of biota condition in the water body used. In this paper, we show that in some instances perennial observations of the chemical composition of wastewater (and natural waters it is discharged into) are not informative from an environmental point of view. Comparison of the results of industrial monitoring and researches in the field of reservoir bio-diagnostics will allow defining the ecological state of the water body and, in future, its transformation trend. **Methods and materials:** We examined Ivanovskoye Lake (Russia, Kirov Region) of bayou type, receiving wastewater from a thermal power plant (TPP) and simultaneously communicating with the Vyatka River — a source of drinking-water supply. The chemical composition of wastewater from the TTP and surface waters of the lake was analyzed. The results were compared with the bioassay data regarding response of *Daphnia magna*, *Scenedesmus quadricauda*, *Paramecium caudatum*, *Escherichia coli* and bioindication data regarding the species composition of the coastal aquatic vegetation. **Results:** Ammonium ions and organic substances (according to biochemical oxygen consumption for 20 days) turned out to be priority pollutants. The maximum concentration of ammonium ions reached 3.17 mg/dm³, which is 6 times higher than the standard value in Russia. In one of the wastewater sources, water is alkaline (pH — up to 9.01). In the bioassay for the mortality of *D. magna*, toxicity was not established. Most samples had no effect on test organisms or were moderately toxic. The water samples from the lake had a stimulating effect on *S. quadricauda*, *P. caudatum*, *E. coli*, which indicates eutrophication of the reservoir. According to the analysis of coastal aquatic vegetation indicator species, Ivanovskoye Lake is of mesotrophic type.

стимулирующее воздействие на *S. quadricauda*, *P. caudatum*, *E. coli*, что говорит об эвтрофикации водоема. Учет индикаторных видов прибрежно-водной растительности показал, что озеро Ивановское мезотрофного типа. Количество видов-индикаторов загрязнения возрастает при приближении к источникам сточных вод. **Заключение:** в целом результаты биоиндикации свидетельствуют о более глубоких антропогенных изменениях, чем это удалось выявить с помощью химических методов и биотестирования. Такие данные говорят как о целесообразности совмещения производственного контроля с научными исследованиями, так и о коррекции перечня наблюдаемых химических и физико-химических показателей.

Ключевые слова: загрязнение водной среды, биотестирование, биоиндикация, химический анализ, ионы аммония, прибрежно-водная растительность.

Введение

В России государственный экологический мониторинг водных объектов проводится Росгидрометом по программам, включающим гидрохимические, гидрологические и гидробиологические показатели, различающиеся полнотой работ на пунктах наблюдений различных категорий [12, 13]. В Европейском Союзе через принятие Водной рамочной директивы (Water Framework Directive — WFD) также предоставлена важная законодательная возможность для продвижения и реализации комплексного подхода к диагностике и дальнейшей защите водных объектов [17, 24]. Таким образом, позиция одновременного использования методов химического анализа, биоиндикации и биотестирования для объективной характеристики экологического состояния водных объектов является общепризнанной, декларируется научной общественностью и поддерживается законодательно [3, 12, 13, 24].

Наблюдательная сеть государственного мониторинга водных объектов России охватывает не все водоемы и водотоки, что, безусловно, невозможно. Часть водных объектов охвачены регулярными наблюдениями за счет организации производственного контроля и мониторинга за их состоянием силами тех водопользователей, которые имеют забор воды или выпуски сточных вод в данные природные объекты [11, 13]. Программы таких наблюдений согласовываются с региональными уполномоченными службами и гидробиологическими показателями не содержат, поскольку нацелены на расчет нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты

The number of pollution indicator species increases when approaching wastewater sources. **Conclusion:** In general, the bioindication results show deeper anthropogenic changes than those revealed using chemical methods and bioassay. Such data demonstrate both feasibility of combining industrial monitoring with scientific research, and changes in the list of the chemical as well as physical and chemical parameters observed.

Keywords: aquatic pollution, bioassay, bioindication, chemical analysis, ammonium ions, coastal aquatic vegetation.

[11, 13]. Следовательно, огромное количество водных объектов, подвергающихся антропогенному воздействию, остаются не охваченными биоиндикаторными работами.

Кроме обозначенной проблемы, в научных кругах с разных точек зрения обсуждается вопрос несогласованности результатов химических данных и биодиагностики. Например, в работе М. Schintu с соавторами реализован комплексный подход к оценке качества прибрежных отложений (Западное Средиземноморье, Италия). Их исследования показали, что биоиндикация по морским фораминиферам дает сведения о загрязнении, аналогичные показаниям химического анализа, тогда как результаты тестов на эмбриотоксичность не коррелируют с концентрацией металлов и полициклических ароматических углеводородов [23]. В работе [8] при биотестировании поверхностных вод со сложным составом загрязняющих веществ строгой зависимости между концентрациями каких-либо элементов и результатами биотестов также не выявлено, но сделан вывод, что во всех пробах воды, содержащих элементы 1-го класса опасности в концентрациях, близких к предельно допустимым, отмечается гибель рачков *D. magna*. В то же время известно, что встречаются ситуации, когда аборигенная биота не реагирует на довольно высокие уровни загрязнения, что затрудняет интерпретацию данных биоиндикации [6].

Такие результаты комплексного скрининга состояния водных объектов не ставят под сомнение важность и информативность методов биоиндикации и биотестирования, но поднимают вопро-

сы, касающиеся биодоступности загрязняющих веществ [5, 16]. На получение объективных результатов биодиагностики направлены работы, оценивающие информативность биотестов [9], а также предлагающие биологические системы раннего предупреждения [20, 21].

Таким образом, вопрос интерпретации результатов комплексных исследований качества воды поверхностных водных объектов остается актуальным. В ряде случаев, например, для водоемов, являющихся источниками питьевого водоснабжения или сообщающихся с ними, этот вопрос обостряется отсутствием в их пределах пунктов государственного экологического мониторинга. Этот факт делает результаты научных натурных исследований таких объектов ценными с экологической и социально-гигиенической точек зрения.

Цель данной работы — сопоставление результатов химического анализа, биотестирования и биоиндикации на примере пойменного озерастарицы, принимающего сточные воды одного из наиболее распространенных предприятий урбосистем — теплоэлектростанции.

Методы и материалы

Объектом исследования было выбрано озеро старичного типа — Ивановское, расположенное в пойме р. Вятки. Основные характеристики водоема приведены в табл. 1. Озеро принимает сточные воды от тепловой электростанции г. Кирово-Чепецка (Россия, Кировская область) ТЭЦ-3, которая вырабатывает тепловую (в качестве пара и горячей воды) и электрическую энергию. Установленная тепловая мощность 813 Гкал/ч; установленная электрическая мощность 160 МВт.

В озеро Ивановское ТЭЦ-3 сбрасывает сточные воды через два выпуска. Выпуск № 1 отводит сточные воды без очистки после охлаждения агрегатов, промливневые стоки с территории ТЭЦ-3, стоки химической водоподготовки подпиточной воды. Расход воды на первом выпуске составляет 4220,43–10321,67 м³/ч. В выпуск № 1 нагретая вода попадает через сбросный канал (0,5 км), где вода охлаждается и насыщается кислородом воздуха. Выпуск № 2 организован для продувочных вод системы гидрозолоудаления, которые отводятся без механической очистки. Их расход 23,52–55,11 м³/ч. Из озера вода попадает в р. Вятку через искусственно созданную Иванов-

скую протоку. В период весеннего разлива озеро может соединяться с рекой.

Количественный химический анализ сточных вод, попадающих в оз. Ивановское, и воды в канале, соединяющем водоем с р. Вятки (Ивановская протока), проводит аккредитованная лаборатория ТЭЦ-3 ежемесячно. В работе проанализированы данные за 2007–2017 гг. Также авторами летом 2017 г. проводился отбор воды из озера из поверхностного слоя однократно. Сточная и природная вода анализировалась по следующим показателям: рН, жесткость, биологическое потребление кислорода полное (БПК_{полн.}), массовая концентрация сухого остатка, содержание хлорид-ионов, ионов аммония, сульфат-ионов, кальция, растворенного кислорода, алюминия, фторид-ионов, общего железа.

Для достижения цели работы в 2017 г. пробы воды подвергали биотестированию. Использовали аттестованные методики по учету смертности дафний *Daphnia magna* Straus (1820) [1], по нарастанию биомассы *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. методом прямого счета в камере Горяева [2], по изменению хемотаксиса *Paramecium caudatum* Ehrenberg (1838) [10] и по биолюминесценции бактериального препарата «Эколюм» на основе условно непатогенного штамма *Escherichia coli* Migula (1895) [4].

Биоиндикацию антропогенного воздействия на водоем также проводили в 2017 г. по индикаторным видам прибрежно-водной растительности. Применяли метод, разработанный научной школой Московского государственного университета, снабженный классификационными шкалами для определения трофности и степени загрязненности водоема по индикаторным макрофитам и частоте их встречаемости [3]. Принцип метода основан на различной степени адаптиро-

Таблица 1
Морфометрическая и гидрологическая характеристики озера Ивановское

Показатели	Значение
Объем озера	21,8 тыс. м ³
Площадь водного зеркала озера	5,74 га
Протяженность озера	3,8 км
Средняя глубина озера	4 м
Колебания уровня воды	Менее 1 м
Коэффициент интенсивности водообмена	Более 50 Интенсивный

ванности индикаторных растений к комплексному уровню загрязнения водоема.

В случае присутствия в водоеме нескольких индикаторных растений подсчитывали сумму всех частот встречаемости, находили произведение степени загрязнения, затем суммировали эти произведения для всех видов, обнаруженных в данном водоеме. Полученную сумму произведений делили на сумму частот: этот коэффициент указывает на общую степень загрязнения [3].

Результаты и обсуждение

Химический анализ. Результаты химического анализа сточных и природных вод за десятилетний период показали, что из перечня анализируемых компонентов основным загрязняющим веществом, превышения ПДК которого отмечаются ежегодно, является ион аммония. Диапазон его концентраций в протоке из оз. Ивановское в р. Вятку варьировал от 0,79 до 3,17 мг/дм³, что выше рыбохозяйственного норматива в 1,6–6,3 раза. При этом в сточных водах норматив по иону аммония не нарушается, хотя часто достигает уровня 0,5 ПДК. Такой результат свидетельствует о вероятном наличии неучтенных выпусков сточных вод от близлежащих предприятий и/или о поступлении аммонийной формы азота от разложения отмерших органических остатков. В любом случае повышение уровня ионов аммония говорит о недавнем загрязнении, чаще всего связанном со сбросом сточных вод [19].

Через выпуск № 2 отводятся продувочные воды системы гидрозолоудаления, что закономерно приводит к повышению показателя рН до 8,41–9,01 единиц при норме 6,5–8,5. Также регулярно отмечались незначительные превышения норматива по показателю полного биологического потребления кислорода до 1,4 ПДК в сточ-

ных водах обоих выпусков, кроме 2007 года (выпуск № 2). Установлен единичный случай превышения содержания нефти и нефтепродуктов в выпуске № 2 в 1,24 раза.

В целом сточные воды выпуска № 2 более загрязненные, чем воды выпуска № 1. Для сточных вод на ТЭЦ предусмотрена только механическая очистка, которая не позволяет довести сбрасываемые воды до нормативного качества.

Отбор пробы воды из оз. Ивановское проводился авторами из срединной части однократно в 2017 году для сопоставления результатов с данными биоиндикации и биотестирования. Установлено содержание ионов аммония 1,8±0,3 мг/л и БПК_{полн.} 9,1±0,4 мг О₂/л, что превышает ПДК_{рх} в 3,5 и 3 раза соответственно. Также два имеющихся выпуска сточных вод ТЭЦ создают на оз. Ивановское локальное тепловое загрязнение в зимний период. Температура выпускаемых вод варьирует в пределах 7–15 °С при нормативе для предприятия 16–23 °С.

Таким образом, высокие уровни содержания аммонийной формы азота и повышенный показатель БПК_{полн.} позволяет предположить наличие в оз. Ивановском загрязнение органическими веществами антропогенного происхождения. Регулярное поступление такого рода загрязнения создает опасность эвтрофикации водного объекта.

Биотестирование. При проведении биотестирования был реализован принцип «батареи биотестов», то есть не ограничивались минимально необходимыми двумя методами, а применили 4 различных способа определения токсичности проб, что уже принято за рубежом [22, 25]. Результаты представлены в табл. 2.

Результаты биотестирования согласуются с данными химического анализа в том, что макси-

Таблица 2

Биотестирование сточных вод ТЭЦ-3 и природных вод оз. Ивановское

Место отбора пробы воды	Результат биотестирования по реакции разных тест-организмов			
	Смертность <i>D. magna</i> , %	Нарастание биомассы <i>S. quadricauda</i> , % к контролю	Индекс токсичности по <i>P. caudatum</i> , у.е.	Индекс токсичности по Эколном, у.е.
СВ, выпуск № 1	0	7±0,7	0,15±0,08	12,5±1,6
СВ, выпуск № 2	0	8±1,1	0,36±0,06	26,6±5,1
ППВ, 500 м от выпуска	0	21±1,9	-0,18±0,06	-40,5±11,6
ППВ, 3000 м от выпуска	0	15±0,9	-0,22±0,9	-36,7±9,5
Ивановская протока	0	14±0,9	-0,25±0,07	-15,4±5,4

Примечание: СВ — сточная вода, ППВ — природная поверхностная вода.

мальные уровни токсичности выявлены для проб из второго выпуска. По тест-системе «Эколюм» индекс токсичности соответствует 2-й группе токсичности из трех возможных (средняя токсичность), показатель токсичности в биотесте по *P. caudatum* также приближается ко 2-й группе. При этом водоросли *S. quadricauda* и низшие ракообразные *D. magna* реакции на загрязнение не показали.

Остальные пробы в соответствии с используемыми методиками биотестирования следует признать безопасными. Низкая информативность биотестов по гибели организмов вполне объяснима и понятна с токсикологической точки зрения. Можно согласиться с методологическим подходом, предлагаемым в работе [7], где дафниевые тесты не критикуются, а предлагается перечень тест-функций, благодаря которому можно уловить невысокие дозы загрязнений.

Наращение биомассы протококковых водорослей несколько выше в природных водах по сравнению с показателями, полученными для сточных вод. Этот факт связываем с наличием в природных водах спектра биогенных элементов, необходимых автотрофам для их роста и размножения. Вероятно, эта же причина привела к отрицательным индексам токсичности (стимуляции) в опытах с *P. caudatum* и бактериальным препаратом на основе *E. coli*. Известно, что явления гормезиса, стимуляции жизненных функций, можно рассматривать и как токсический эффект [18]. В нашем случае стимуляция тест-организмов, вероятно, связана с поступлением в озеро органических веществ, о чем косвенно свидетельствуют ежеквартальные значения БПКполн. по данным лаборатории ТЭЦ-3, близкие к установленному нормативу, и обнаруженное нами превышение ПДК_{рх} по данному показателю в 3 раза (см. выше).

Таким образом, при сопоставлении результатов химического анализа и биотестирования строгой корреляции не установлено, но ряд логических закономерностей прослеживается: уровень загрязнения не достигает летального, но наблюдаются эффекты стимуляции как первые проявления токсического стресса.

Биоиндикация. Прежде чем осуществить оценку экологического состояния водоема по выбранной методике, проводили геоботаническое

описание на учетных площадках. По берегам оз. Ивановское бордюрный равномерный тип зарастания, надводная растительность составляет 70 % и подводная 30 %. В сообществе нет растений, которые могли бы образовать ярко выраженный ярус. На учетных площадках нами было собрано 20 видов растений из 12 семейств. Преобладали виды семейства Злаковые, обнаружены 2 вида из семейства Частуховые и Рдестовые.

Учет индикаторных видов прибрежно-водной растительности оз. Ивановское, принимающего сточные воды от ТЭЦ, проводился на двух площадках (10×10 м). Первая находилась на расстоянии 500 м от места выпуска продувочных вод системы гидрозолаудаления, вторая — на расстоянии 1000 м от сброса этих сточных вод. В соответствии с используемой методикой обнаруженным видам-индикаторам присваивался определенный балл, по которому в зависимости от их частоты встречаемости рассчитывалась трофность водоема (табл. 3).

Результаты биоиндикации на учетных площадках свидетельствует о возрастании трофности оз. Ивановское при приближении к месту выпуска сточных вод. Происходит обогащение видового состава прибрежно-водной растительности индикаторными видами, которые, с одной стороны, устойчивы к загрязнению некоторыми элементами, а с другой — приспособлены использовать повышенное содержание биогенов для реализации своего биологического потенциала. Исчезновение индикаторных мезотрофов на максимальном отдалении от места сброса СВ (3000 м) говорит об антропогенном характере повышения трофности водоема за счет загрязнения органическими веществами и биогенными элементами.

Далее на выбранных учетных площадках для индикации качества воды в оз. Ивановском использовали рассмотренную выше методику, в которой степень загрязнения определяется по наличию на учетных площадках индикаторных видов, обладающих разной устойчивостью к сложившемуся уровню загрязнения. Каждому обнаруженному виду макрофита соответствует балл для определения уровня загрязнения, корректирующийся в зависимости от частоты их встречаемости. В итоге рассчитывается уровень загрязнения (табл. 4).

Таблица 3

Определение трофности водоема по индикаторным видам прибрежно-водной растительности

Индикаторный вид	Балл для определения трофности (1)	Частота встречаемости (2)	Трофность водоема по видам (1)×(2)=(3)
Учетная площадка № 1: 500 м ниже по течению от точки сброса продувочных вод системы гидрозолоудаления			
Сабельник болотный (<i>Comarum palustre</i>)	1	3	3
Осока пузырчатая (<i>Carex vesicaria</i>)	3	7	21
Кубышка желтая (<i>Nuphar lutea</i>)	1	1	1
Частуха подорожниковая (<i>Alisma plantago-aquatica</i>)	3	7	21
Сумма	—	18	46
Индекс трофности водоема	46:18 = 2,6 Мезотрофный тип		
Учетная площадка № 2: 1000 м ниже по течению от точки сброса продувочных вод системы гидрозолоудаления			
Кубышка желтая (<i>Nuphar lutea</i>)	1	1	1
Частуха подорожниковая (<i>Alisma plantagoaquatica</i>)	3	5	15
Сумма	—	6	16
Индекс трофности водоема	16:6 = 2,6, Мезотрофный тип		
Фоновая учетная площадка: противоположный от места впуска сточных вод берег, на максимальном удалении от сброса			
Не встречено			

Примечание: для определения частоты встречаемости обнаруженных макрофитов применяли шкалу со следующими обозначениями: 1 — очень редко, 2 — редко, 3 — нередко, 5 — часто, 7 — очень часто, 9 — масса.

При продвижении от фоновой площадки к месту выпуска сточных вод количество видов-индикаторов загрязнения, а также частота их встречаемости постепенно нарастает, хотя и не экстремально, что отразилось на результатах обследования учетных площадок. Полученные данные подтверждают, что загрязнение сточными водами ТЭЦ влияет на экосистему озера. Однако наблюдается и позитивный факт: процесс не захватил весь водоем. За счет биоты происходит частичное самоочищение водоема с постепенным повышением уровня его трофности.

Таким образом, по основному химическому воздействию на водный объект можно было прогнозировать его эвтрофикацию. Результаты биоиндикации подтвердили эту гипотезу. Диагностировано умеренное загрязнение озера, экологический тип водоема — мезотрофный. В литературе имеются сведения о высокой информативности характеристик прибрежных растительных сообществ с показателями водной среды, включая растворенный кислород, температуру воды, мутность, общее содержание взвешенных отложений, нитраты и ортофосфаты [14, 15].

Таблица 4

Определение уровня загрязнения оз. Ивановское по индикаторным видам макрофитов

Индикаторные виды растений макрофитов	Балл для определения загрязнения	Частота встречаемости индикаторных видов	Индекс и уровень загрязнения
Учетная площадка № 1: 500 м ниже по течению от точки сброса продувочных вод системы гидрозолоудаления			
Рдест пронзеннолистный (<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	3	3	3,5 пограничный уровень загрязнения сильный/умеренный
Роголистник погруженный (<i>Ceratophyllum demersum</i>)	5	1	
Учетная площадка № 2: 1000 м ниже по течению от точки сброса продувочных вод системы гидрозолоудаления			
Рдест пронзеннолистный (<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	3	5	15 умеренный уровень загрязнения
Фоновая учетная площадка: противоположный от места впуска сточных вод берег, на максимальном удалении от сброса			
Не встречено			
	—	—	слабый уровень загрязнения

Следовательно, продолжение сотрудничества производственной лаборатории ТЭЦ-3 и ученых для наблюдения за экологическим состоянием оз. Ивановское целесообразно.

Заключение. Множество водоемов, которые могли бы быть ценными как рыбохозяйственные и рекреационные объекты, становятся приемниками сточных вод. Нами рассмотрена комплексная диагностика экологического состояния оз. Ивановское, сообщаемого с р. Вяткой — главной водной артерией Кировской области и источником питьевого водоснабжения многих населенных пунктов. Результаты химического анализа сточных вод от теплоэлектростанции, попадающих в озеро, выявили аммиачный азот и органические вещества (по БПК_{полн.}) в качестве приоритетных загрязняющих веществ. Такой тип загрязнения обычно приводит к процессам эвтрофикации в различной степени. Это было подтверждено с помощью учета индикаторных макрофитов, некоторые из которых одновременно свидетельствовали об умеренном уровне загрязнения водоема. Выбранная «батарея биотестов» закономерно подтвердила повышенную опасность сточных вод по сравнению с поверхностными водами оз. Ивановское. Однако умеренный уровень загрязнения озера, выявленный при биоиндикации, установлен не был. В заключение отметим, что комплексное исследование водоема всегда имеет большую диагностическую ценность, чем какая-либо группа методов, взятая отдельно.

Литература

1. Акварос (2007). ФР 1.39.2007.03222. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. М.: Акварос, 51 с.
2. Акварос (2007). ФР 1.39.2007.03223. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. М.: Акварос, 47 с.
3. Мелехова, О. П. и Сарапульцева, Е. И. (ред.) (2010). Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование. 3-е изд. М.: Академия, 288 с.
4. Министерство природных ресурсов Российской Федерации (2010). ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04. Т.16.1:2:3:3.8-04. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм». М.: Нера-С, 30 с.
5. Моисеенко, Т. И., Даувальтер, В. А. и Родюшкин, И. В. (1998). Механизмы круговорота природных и антропогенных металлов в поверхностных водах Субарктики. Водные ресурсы, т. 25, № 2. сс. 231–243.
6. Никаноров, А. М. и Жулидов А. В. (1991). Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоиздат, 312 с.
7. Олькова, А. С. (2017). Условия культивирования и многообразие тест-функций *Daphnia magna Straus* при биотестировании. Вода и экология: проблемы и решения, № 1, сс. 63–82. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.19.1.63-82.
8. Олькова, А. С. и Дабах, Е. В. (2014). Опыт интерпретации результатов биотестирования поверхностных вод при химическом и радиоактивном загрязнении. Теоретическая и прикладная экология, № 3, сс. 21–28. DOI: 10.25750/1995-4301-2014-3-021-028.
9. Олькова, А. С. и Маханова, Е. В. (2018). Выбор биотестов для экологических исследований вод, загрязненных минеральными формами азота. Вода и экология: проблемы и решения, № 4, сс. 70–81. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.4.70-81.
10. Спектр-М (2015). ФР 1.39.2015.19242. ПНД Ф Т 16.2:2.2-98. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». СПб.: ООО «СПЕКТР-М», 21 с.
11. Электронный фонд правовой и научно-технической документации (2014). Приказ Министерства Природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 2 июня 2014 года № 246 «Об утверждении Административного регламента Федерального агентства водных ресурсов по предоставлению государственной услуги по утверждению нормативов допустимых сбросов веществ (за исключением радиоактивных веществ) и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей по согласованию с Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Федеральным агентством по рыболовству и Федеральной службой по надзору в сфере природопользования» [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/420201732> [Дата обращения: 02.05.2019].
12. Электронный фонд правовой и научно-технической документации (2016). РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/495872993> [Дата обращения: 30.04.2019].
13. Электронный фонд правовой и научно-технической документации (2018). Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 27 декабря 2018 года) [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/901982862> [Дата обращения: 02.05.2019].
14. Aguiar, F. C., Ferreira, M. T., Albuquerque, A., Rodriguez-González, P. and Segurado, P. (2009). Structural and functional responses of riparian vegetation to human disturbance: performance and spatial scale-dependence.

Fundamental and Applied Limnology, vol. 175, No. 3, pp. 249–267. DOI: 10.1127/1863-9135/2009/0175-0249.

15. Alemu, T., Bahrndorff, S., Pertoldi, C., Hundera, K., Alemayehu, E. and Ambelu, A. (2018). Development of a plant based riparian index of biotic integrity (RIBI) for assessing the ecological condition of highland streams in East Africa. *Ecological Indicators*, vol. 87, pp. 77–85. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.12.032.

16. Benedetti, M. F., Miln, C. J., Kinniburgh, D. G., Van Riemsdijk, W. H. and Koopal, L. K. (1995). Metal ion binding to humic substances: application of the non-ideal competitive adsorption model. *Environmental Science and Technology*, vol. 29, issue 2, pp. 446–457. DOI: 10.1021/es00002a022.

17. Capela, R., Raimundo, J., Santos, M. M., Caetano, M., Micaelo, C., Vale, C., Guimarães, L. and Reis-Henriques, M. A. (2016). The use of biomarkers as integrative tools for transitional water bodies monitoring in the Water Framework Directive context — A holistic approach in Minho river transitional waters. *Science of the Total Environment*, vol. 539, pp. 85–96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.113.

18. Erofeeva, E. A. (2014). Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose-Response*, vol. 12 (1), pp. 121–135. DOI: 10.2203/dose-response.13-017.Erofeeva.

19. Karri, R. R., Sahu, J. N. and Chimmiri, V. (2018). Critical review of abatement of ammonia from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, vol. 261, pp. 21–31. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.03.120.

20. Mikol, Y. B., Richardson, W. R., Van der Schalie, W. H., Shedd, T. R. and Widder, M. W. (2007). An online real-time biomonitor for contaminant surveillance in water supplies. *Journal – American Water Works Association*, vol. 99 (2), pp. 107–115. DOI: 0.1002/j.1551-8833.2007.tb07873.x.

21. Ostfeld, A. and Salomons, E. (2004). Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130 (5), pp. 377–385. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(377).

22. Pandard, P., Devillers, J., Charissou, A. M., Poulsen, V., Jourdain, M.-J., Féraud, J.-F., Grand, C. and Bispo, A. (2006). Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes. *Science of the Total Environment*, vol. 363, issues 1–3, pp. 114–125. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.12.016.

23. Schintu, M., Buosi, C., Galgani, F., Marrucci, A., Marras, B., Ibba, A. and Cherchi, A. (2015). Interpretation of coastal sediment quality based on trace metal and PAH analysis, benthic foraminifera, and toxicity tests (Sardinia, Western Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, vol. 94, issues 1–2, pp. 72–83. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.03.007.

24. Solimini, A. G., Ptacnik, R. and Cardoso, A. C. (2009). Towards holistic assessment of the functioning of ecosystems under the Water Framework Directive. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 28, issue 2, pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.trac.2008.10.015

25. Zovko, M., Vidaković-Cifrek, Ž., Cvetković, Ž., Bošnjir, J. and Šikić, S. (2015). Assessment of acrylamide toxicity using a battery of standardised bioassays. *Archives of*

Industrial Hygiene and Toxicology, vol. 66 (4), pp. 315–321. DOI: 10.1515/aiht-2015-66-2715.

References

1. Akvaros (2007). *Federal Register FR 1.39.2007.03222. Biological control methods. Methodology for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, and waste by mortality and changes in fertility of daphnias*. Moscow: Akvaros. 51 p.

2. Akvaros (2007). *Federal Register FR 1.39.2007.03223. Biological control methods. Methodology for determining the toxicity of water, water extracts from soils, sewage sludge, and waste by changes in the level of chlorophyll fluorescence and abundance of algae cells*. Moscow: Akvaros, 47 p.

3. Melekhova, O. P. and Sarapultseva, E. I. (eds.) (2010). *Biological control of the environment: bioindication and bioassay*. 3rd edition. Moscow: Academia, 288 p.

4. Ministry of Mineral Resources and Environment of the Russian Federation (2010). *Environmental Regulatory Document PND F T 14.1:2:3:4.11-04. T.16.1:2:3:3.8-04. Method for determining the integrated toxicity of surface waters, including marine, ground, drinking, waste waters, water extracts from soils, waste, sewage sludge by changes in bacterial bioluminescence using the Ecolum test-system*. Moscow: Nera-S, 30 p.

5. Moiseenko, T. I., Dauvalter, V. A. and Rodushkin, I. V. (1998). Mechanisms of the cycle of natural and human-introduced metals in surface waters of the Arctic basin. *Water Resources*, vol. 25, issue 2, pp. 231–243.

6. Nikanorov, A. M. and Zhulidov, A. V. (1991). *Metal biomonitoring in freshwater ecosystems*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 312 p.

7. Olkova, A. S. (2017). The conditions of cultivation and the variety of test functions of *Daphnia magna* Straus in bioassay. *Water and Ecology*, vol. 1, pp. 63–82. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.19.1.63-82.

8. Olkova, A. S. and Dabakh, E. V. (2014). On some experience of interpreting results of bioassay of surface water contaminated with chemicals and radioactivity. *Theoretical and Applied Ecology*, issue 3, pp. 21–28. DOI: 10.25750/1995-4301-2014-3-021-028.

9. Olkova, A. S. and Mahanova, E. V. (2018). Selection of bioassay for ecological research of water polluted by mineral nitrogen forms]. *Water and Ecology*, vol. 4, pp. 70–81. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.4.70-81.

10. Spektr-M (2015). *Federal Register FR 1.39.2015.19242. Environmental Regulatory Document PND F T 16.2:2.2–98. Methodology for determining the toxicity of samples of natural, drinking, domestic and drinking, household waste, treated sewage, waste, thawed, technological water by the express method using the Biotester device*. Saint Petersburg: SPEKTR-M, 21 p.

11. Repository for legal documents, standards, regulations and specifications (2014). *Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 246 dd. June 2, 2014 “On approval of the Administrative Regulations of the Federal Agency for Water Resources to provide public services for the approval of standards for permissible discharges of substances (except radioactive substances) and microorganisms into water bodies for water users in*

coordination with the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Federal Agency for Fisheries and Federal Service for Supervision of Nature Resources". [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420201732> [Date accessed 02.05.2019].

12. Repository for legal documents, standards, regulations and specifications (2016). *Regulatory Document 52.24.309–2016. Organization and implementation of monitoring observations of the state and pollution of land surface waters.* [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/495872993> [Date accessed 30.04.2019].

13. Repository for legal documents, standards, regulations and specifications (2018). *Water Code of the Russian Federation (as amended on December 27, 2018).* [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901982862> [Date accessed 02.05.2019].

14. Aguiar, F. C., Ferreira, M. T., Albuquerque, A., Rodríguez-González, P. and Segurado, P. (2009). Structural and functional responses of riparian vegetation to human disturbance: performance and spatial scale-dependence. *Fundamental and Applied Limnology*, vol. 175, No. 3, pp. 249–267. DOI: 10.1127/1863-9135/2009/0175-0249.

15. Alemu, T., Bahrndorff, S., Pertoldi, C., Hundera, K., Alemayehu, E. and Ambelu, A. (2018). Development of a plant based riparian index of biotic integrity (RIBI) for assessing the ecological condition of highland streams in East Africa. *Ecological Indicators*, vol. 87, pp. 77–85. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.12.032.

16. Benedetti, M. F., Miln, C. J., Kinniburgh, D. G., Van Riemsdijk, W. H. and Koopal, L. K. (1995). Metal ion binding to humic substances: application of the non-ideal competitive adsorption model. *Environmental Science and Technology*, vol. 29, issue 2, pp. 446–457. DOI: 10.1021/es00002a022.

17. Capela, R., Raimundo, J., Santos, M. M., Caetano, M., Micaelo, C., Vale, C., Guimarães, L. and Reis-Henriques, M. A. (2016). The use of biomarkers as integrative tools for transitional water bodies monitoring in the Water Framework Directive context — A holistic approach in Minho river transitional waters. *Science of the Total Environment*, vol. 539, pp. 85–96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.113.

18. Erofeeva, E. A. (2014). Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose-Response*, vol. 12 (1), pp. 121–135. DOI: 10.2203/dose-response.13-017.Erofeeva.

19. Karri, R. R., Sahu, J. N. and Chimmiri, V. (2018). Critical review of abatement of ammonia from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, vol. 261, pp. 21–31/ DOI: 10.1016/j.molliq.2018.03.120.

20. Mikol, Y. B., Richardson, W. R., Van der Schalie, W. H., Shedd, T. R. and Widder, M. W. (2007). An online real-time biomonitor for contaminant surveillance in water supplies. *Journal – American Water Works Association*, vol. 99 (2), pp. 107–115. DOI: 0.1002/j.1551-8833.2007.tb07873.x.

21. Ostfeld, A. and Salomons, E. (2004). Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130 (5), pp. 377–385. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(377).

22. Pandard, P., Devillers, J., Charissou, A.-M., Poulsen, V., Jourdain, M.-J., Féraud, J.-F., Grand, C. and Bispo, A. (2006). Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes. *Science of the Total Environment*, vol. 363, issues 1–3, pp. 114–125. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.12.016.

23. Schintu, M., Buosi, C., Galgani, F., Marrucci, A., Marras, B., Ibba, A. and Cherchi, A. (2015). Interpretation of coastal sediment quality based on trace metal and PAH analysis, benthic foraminifera, and toxicity tests (Sardinia, Western Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, vol. 94, issues 1–2, pp. 72–83. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.03.007.

24. Solimini, A. G., Ptacnik, R. and Cardoso, A. C. (2009). Towards holistic assessment of the functioning of ecosystems under the Water Framework Directive. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 28, issue 2, pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.trac.2008.10.015

25. Zovko, M., Vidaković-Cifrek, Ž., Cvetković, Ž., Bošnjir, J. and Šikić, S. (2015). Assessment of acrylamide toxicity using a battery of standardised bioassays. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. 66 (4), pp. 315–321. DOI: 10.1515/aiht-2015-66-2715.

Автор

Маханова Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент, декан

Биологический факультет, кафедра зоогигиены, физиологии и биохимии, Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров, Россия

E-mail: elena-makhanova@yandex.ru

Author

Mahanova Elena Vladimirovna, Dr. of Engineering, Associate Professor, Dean

Biological faculty, Department of zoohygiene, physiology and biochemistry, Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia

E-mail: elena-makhanova@yandex.ru