

УДК 574.5.64

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ*

© 2015 г. Е.Н. Бакаева, А.М. Никаноров

Бакаева Елена Николаевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, гидрохимический отдел, Институт водных проблем РАН, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090; заведующая, филиал кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090; ведущий научный сотрудник, Гидрохимический институт, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: rotaria@mail.ru

Никаноров Анатолий Максимович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий, гидрохимический отдел, Институт водных проблем РАН, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090; главный научный сотрудник, Гидрохимический институт, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090; профессор, филиал кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090.

Bakaeva Elena Nikolaevna – Doctor of Biological Science, Leading Researcher, Hydrochemical Department, Institute of Water Problems RAS, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Head, Branch of the Department of Environmental Geoscience and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Leading Researcher, Hydrochemical Institute, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: rotaria@mail.ru

Nikanorov Anatolii Maksimovich – Doctor of Geological and Mineralogical Science, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head, Department of Hydrochemical Department, Institute of Water Problems RAS, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Main Researcher, Hydrochemical Institute, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Professor, Branch of the Department of Environmental Geoscience and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, Russia, 344090.

Проведён обзор современного состояния методологической базы биологических методов (биоиндикация, биотестирование) для оценки токсичности вод, донных отложений и подходов к оценке экотоксикологического состояния водных экосистем. Обсуждён прикладной аспект применения методик биотестирования, закреплённых в нормативно-методических документах.

Ключевые слова: биотестирование, биоиндикация, токсичность, водные экосистемы, поверхностные воды, донные отложения, методики, нормативно-методические документы

The review of the current state of the methodological basis of biological methods (bioindication, bioassay) to assess the toxicity of water, sediment and ecotoxicological approaches to assessing the status of aquatic ecosystems. Applied discussed aspect of the application of the bioassay, enshrined in the regulatory and procedural documents.

Keywords: bioassay, bioindication, toxicity, aquatic ecosystems, surface water, sediment, techniques, regulatory and procedural documents.

Согласно Водному кодексу РФ 2006 г. [1], «воды являются важнейшим компонентом окружающей природной среды, возобновляемым, ограниченным и уязвимым природным ресурсом, они используются и охраняются в Российской Федерации как основа жизни и деятельности народов, проживающих на ее территории, обеспечивают экономическое, социальное, экологическое благополучие населения, существование животного и растительного мира». Однако в последние годы в биосфере сформировался комплекс проблем, в первую очередь трудно решаемых – эко-

логических. Особенно актуальна проблема чистой пресной воды, поскольку экологическое неблагополучие в значительной степени проявляется именно в гидросфере. В частности, проблемы питьевого водоснабжения, снижение органолептических свойств воды и рыбопродуктивности водоёмов связаны с процессами эвтрофикации и токсификации. Прогрессирующее ухудшение качества водной среды представляет угрозу жизненно важным национальным интересам страны в областях экологической, продовольственной и национальной безопасности.

*Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00376).

Свойства поверхностных вод

Поверхностные воды обладают отличительным положительным свойством – это относительно быстрое самообновление их качества. основополагающими характеристиками, определяющими специфику площади водосбора, поверхностного зеркала, водности, скорости течений, извилистости и др., являются географические, физико-морфологические особенности формирования водоемов и водотоков. Однако огромной «очистительной фабрикой», имеющей особое значение в формировании и обновлении качества вод, является биологический слой [2].

Существует целый ряд программ разного уровня по охране, очистке природных поверхностных водоемов и рациональному водопользованию. Европейская экологическая система пресной воды курируется панъевропейской программой «Пресная вода». Всемирный фонд живой природы (WWF) старается объединить мероприятия, проводимые в России и Европе, в партнерскую организацию по пяти основным направлениям: политика, охрана, управление, восстановление и уменьшение загрязнения окружающей среды. Основная сформулированная WWF цель – «сохранить и восстановить функции и целостность пресноводных экосистем ради всего живого» – едина для всех мировых программ. В последние годы определилась концепция необходимости перехода от усложненных и перегруженных информацией исследований к более продуктивным разработкам, направленным на выявление приоритетных принципов и механизмов, контролирующихся функционирование экосистем, и поиску интегральных зависимостей [3].

При оценке качества поверхностных водоемов важно знать потенциал возможностей их самовосстановления. Только структурно-видовой состав ценозов водных экосистем может дать максимально достоверную информацию о качестве водной среды. И задача исследователя состоит в разработке соответствующих методических подходов.

Кажущаяся очевидной прямая зависимость «концентрация загрязняющих веществ – комфортность состояния гидробиоты» не подтверждается. Об этом свидетельствуют многочисленные попытки классифицировать качество среды по химическому составу, оказавшиеся несостоятельными. Этот «парадокс» объясняет утверждение В.И. Вернадского [4] о том, что «вся химия водоема больше всего меняется жизнью». Расширение сферы анализируемых ингредиентов не проясняет картину, а наоборот, усугубляет загруженность информацией. Попытки выявления корреляционных зависимостей и каких-либо репрезентативных взаимодействий пока не эффективны, особенно в тех случаях, когда анализируется объемная информация по гидрохимическим, гидробиологическим и санитарно-гигиеническим параметрам.

Каждая экосистема находится в динамическом равновесии и, согласно принципу Ле Шателье – Брауна, старается сохранить гомеостаз, выдвигая одно из необходимых в данный момент звеньев на борьбу с

поступающим извне воздействием, в том числе загрязняющих веществ. Тем не менее очевидна потеря биологической полноценности воды под антропогенным прессингом. Об этом свидетельствуют неспособность воды быть средой обитания, продуктом питания и наличие негативных процессов в водных экосистемах. Обратимость или необратимость возникающих нарушений в состоянии экосистемы можно определить только по отклику гидробиоты.

Основные термины и понятия в экотоксикологии

Экологическая токсикология (экоотоксикология) – раздел токсикологии, изучающий эффекты воздействия токсичных веществ на экосистемы и их круговорот в биосфере, в особенности в пищевых цепях. Экоотоксикология является самой молодой из токсикологических дисциплин. Она изучает источники поступления токсикантов в природные биосистемы, токсические эффекты действия химических веществ на живые организмы, устойчивость и функционирование биосистем надорганизменного уровня в условиях их токсического загрязнения.

Согласно ГОСТу 17.1.1.01-77 [5], состояние водного объекта – характеристика водного объекта по совокупности его количественных и качественных показателей применительно к видам водопользования. Экологическое благополучие водного объекта – нормальное воспроизведение основных звеньев экологической системы водного объекта [5]. Звенья экологической системы водного объекта входят в основные компоненты водных экосистем. В толще воды звенья экосистемы представлены рядом ценозов – это бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, ихтиопланктон, нектон, в донных отложениях – это зообентос, фитобентос, макрофиты, а также перифитон, представленный организмами-обрастателями из числа растительных и животных организмов.

Под понятием «качество воды» подразумевают характеристику состава и свойств воды, определяющую ее пригодность для конкретных видов водопользования [5], а также для жизни водных организмов. Токсичность окружающей среды – это токсичность, которой характеризуется проба, полученная из принимающей водной системы [6]. Таким образом, токсичность следует считать одной из характеристик качества воды [7], которая имеет первостепенное значение с точки зрения опасности для существования водных экосистем. Токсичностью воды в водной токсикологии принято считать свойство воды оказывать вредное, патологическое, вплоть до гибели, действие на организм [8]. Однако под токсичностью воды до недавнего времени понимали только концентрации загрязняющих веществ, выраженные в ПДК [9]. Мы склонны понятие *токсичность* расценивать как интегральную характеристику качества воды, обусловленную проявлением негативных для водной биоты свойств химических веществ, присутствующих в испытываемой среде и проявляющих синергетическое, антагонистическое и аддитивное действие [7].

Методические подходы к экотоксикологической оценке состояния экосистем

Оценить токсическое состояние водных экосистем каким-либо одним из известных методических подходов (физико-химический, биологический) не представляется возможным, поскольку для получения адекватной картины необходимо изучить не только состояние гидробиоты, но и определить качество среды её обитания, т.е. загрязнение токсичными веществами и общий уровень загрязнения вод и донных отложений водного объекта.

В настоящее время оценка качества поверхностных вод, донных отложений и антропогенных изменений в состоянии водных экосистем базируется на триаде методических подходов: аналитическом и двух биологических, включающих биоиндикацию и биотестирование. Первоначальным и остающимся основным в природоохранных мероприятиях в настоящее время является аналитический метод, поскольку в России действует система нормирования по ПДК загрязняющих веществ, регламентирующая содержание этих веществ в природных и сточных водах.

Химические и физические показатели удобны тем, что имеют чёткое количественное выражение и согласно разработанным нормативам позволяют получить информацию о негативных изменениях в водном объекте. Однако оценить состояние экосистемы только по физико-химическим показателям невозможно. Во-первых, получаемая информация односторонняя, поскольку неучтённой остаётся основная характеристика – состояние гидробиоты. Во-вторых, практически невозможен контроль прогрессирующего возрастания количества новых химических веществ, а самое главное – аналитический контроль осложнен аддитивностью и синергетическим действием большинства соединений [7, 10]. В-третьих, реакция гидробиоты зависит не столько от отдельных физико-химических факторов, сколько от их взаимодействия. В результате может образоваться большая токсичность, чем при воздействии исходных загрязняющих веществ.

Из изложенного ясно, что оценка токсичности вод, донных отложений и состояния экосистем, основанная только на гидрохимических показателях, не может считаться достаточной. Кроме того, количественный анализ какого-либо вещества в воде сам по себе не даёт ответа на главный вопрос о её опасности для гидробиоты. В связи с этим возрастает роль холистического подхода для определения интегральной оценки токсичности на основе биологических методов.

Вследствие сказанного в современных условиях эвтрофикации и токсификации поверхностных вод особо важным представляется изучение экотоксичности компонентов экосистем.

Область применения экотоксикологического подхода

Экотоксикологический подход к анализу антропогенного воздействия занимает важнейшее место в стра-

тегии мониторинга окружающей природной среды и, в частности, водных объектов. На принципах экотоксикологии базируются как национальные системы и программы мониторинга окружающей среды, так и международные исследовательские программы, реализуемые в рамках деятельности крупных международных организаций и проектов (программы Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН), Международной академии безопасности окружающей среды (IAES), Научного комитета НАТО и др.) [11].

Предмет исследований экотоксикологии – экосистема, а экотоксикологические показатели являются индикаторами общего состояния экосистемы, её «экологического благополучия». Она отличается от классической токсикологии, которая изучает эффекты отдельных химических веществ [11]. Разработаны принципиальные схемы использования биологических методов для оценки качества вод и донных отложений (рис. 1, 2). Каждый из биологических методов имеет свои особенности, плюсы и минусы, которые подробно изложены в [7]. Там же обсуждены особенности методов биотестирования поверхностных вод (в отличие от сточных вод) и донных отложений.

В связи с тем, что в настоящее время оценка токсичности пресноводных экосистем включена в число обязательных характеристик экологического состояния водных объектов многих европейских государств и США, актуальной становится задача получения объективной информации о токсичности вод водных объектов, подверженных разнообразному по характеру антропогенному воздействию [12].

Известно, что количество показателей, определяемое современными аналитическими методами в водных экосистемах, составляет более сотни. Поэтому одной из актуальных задач, стоящих при исследовании водных экосистем, является: 1) выбор биологических методов, поскольку токсичность проявляется в отношении только живых объектов; 2) поиск интегральных показателей, характеризующих состояние водной экосистемы.

Получить адекватную оценку изменений состояния поверхностных водных объектов в части их качественных показателей можно с помощью биотестирования [13].

Биологическая индикация воды (биоиндикация) – оценка качества воды по наличию водных организмов, являющихся индикаторами её загрязнённости [9]. Следует отметить, что такой подход требует объективного разделения и точного описания двух одновременно действующих процессов, вызывающих отклонение индикационного признака от нормы. Во-первых, результат действия антропогенных факторов, во-вторых, следствие случайного отклонения от нормы в результате действия принципиально неформализуемых факторов. Кроме того, такой важный показатель любого биоценоза, как видовой состав, не даёт ее оценки на момент исследования, поскольку является итоговой характеристикой всей суммы воздействия на сообщество за некоторый промежуток времени.

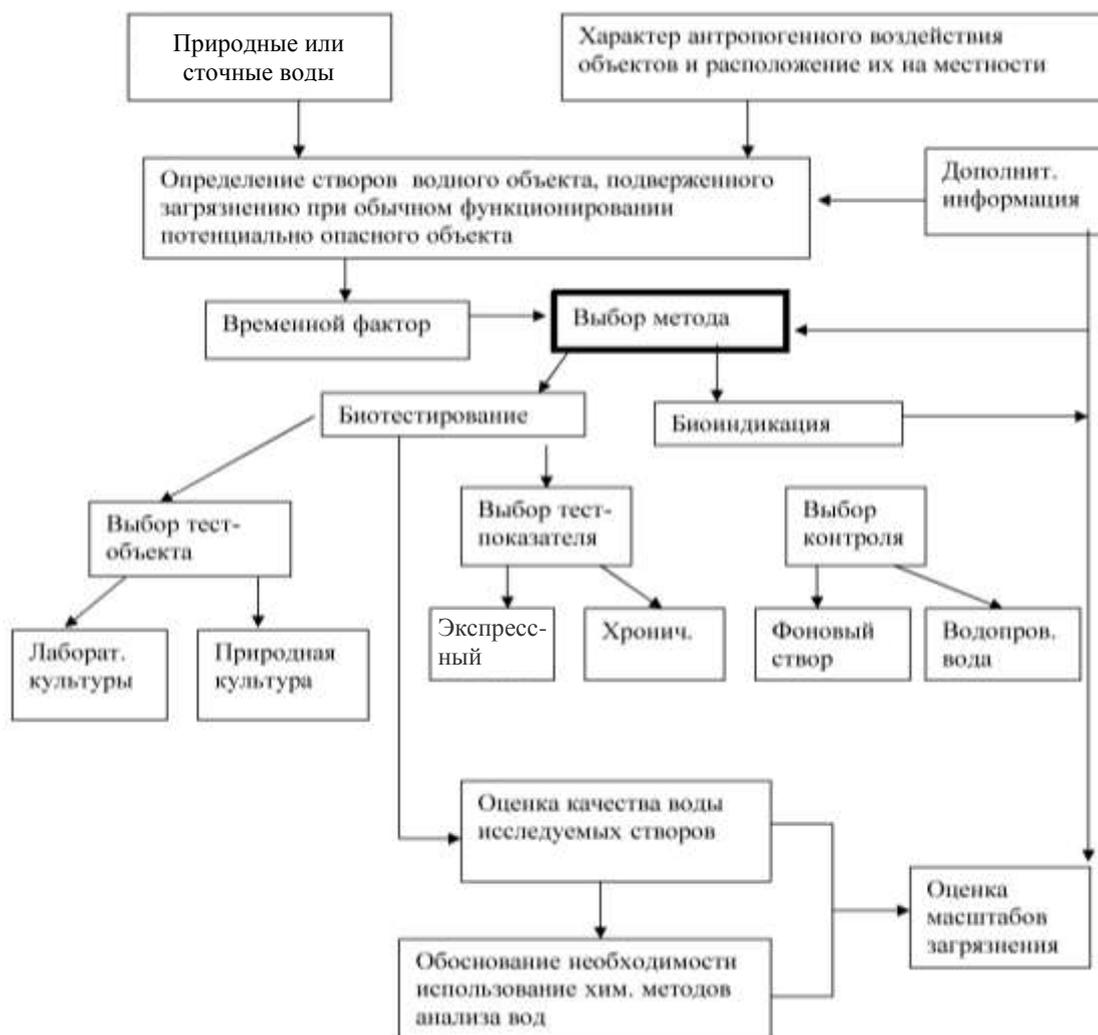


Рис. 1. Принципиальная схема использования биологических методов оценки токсичности вод поверхностных водных объектов

Биотестирование. Согласно ГОСТу 27065-85 СТ СЭВ 5184-85 [9], биотестирование воды – это оценка качества воды по ответным реакциям водных организмов, являющихся тест-объектами. Согласно действующим нормативам [14], вода контрольного створа (природная вода) не должна оказывать токсического (хронического и тем более острого) действия на тест-объекты. Прием биотестирования первоначально и в настоящее время использовали в качестве основного методологического подхода при разработке регламентов (ПДК) на химические вещества. Далее он стал активно применяться для оценки токсичности сточных вод. С неуклонным ростом антропогенной нагрузки на водные объекты с середины XX в. увеличивалась угроза токсического загрязнения. В 70-х гг. XX в. в нашей стране была поставлена задача использования методов биотестирования в мониторинге поверхностных вод суши при организации государственной службы наблюдений (ГСН) Росгидромета. Реализация этой задачи в тот период оказалась невозможной, поскольку не были обеспечены ни научно-методическая, ни

материальная база для выполнения биотестовых анализов. Кроме того, существовало мнение, что результаты биотестирования трудно связать с состоянием природных водных сообществ, т.е. они не могут характеризовать отклик водной экосистемы на воздействие. Сейчас стало очевидным, что биотестирование характеризует не отклик природных популяций, а воздействие на них опасных загрязняющих веществ [12].

Биотестирование позволяет решить ряд вопросов, связанных с оценкой токсического действия отдельных химических веществ, их смесей, сточных и природных вод. Оно стало активно применяться в оценке качества донных отложений [7].

Существуют серия международных стандартов по оценке качества вод – ISO Water quality: 6341:1996; 7346-1:1996; 7346-2:1996; 7346-3:1996; 8692:1989; 10229:1994; 10253:1995; 10706:2000; 10712:1995; 11348-1:1998; 11348-2:1998; 11348-3:1998; 12890:1999; 13829:2000; 14442:1999; 14669:1999, EPA-821-R-02-012, EPA-821-R-02-013, PA-821-R-02-014 и донных отложений EPA/600/R-94/024; EPA/600/R-94/025.

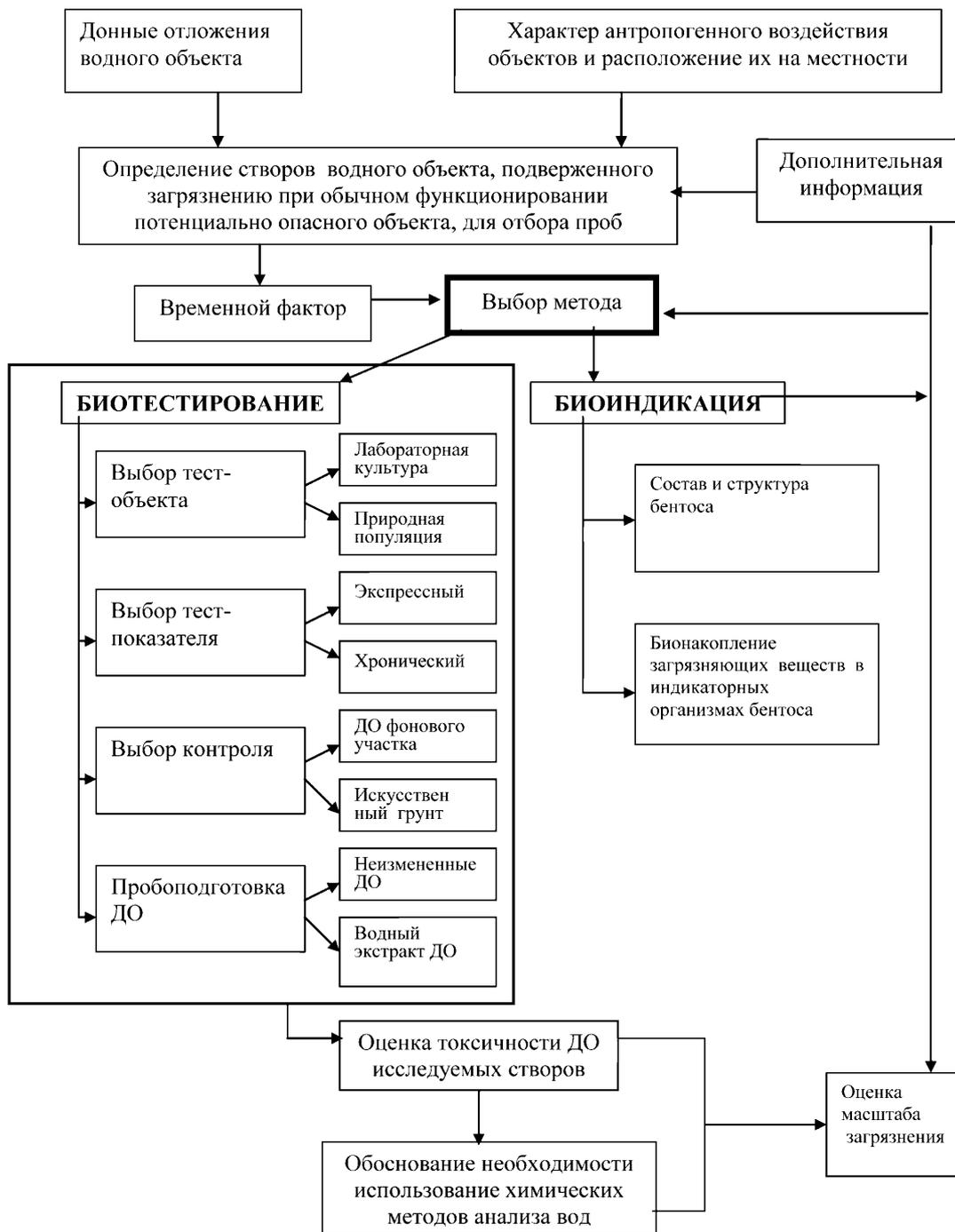


Рис. 2. Принципиальная схема использования биологических методов оценки токсичности донных отложений (ДО) поверхностных водных объектов

Также имеются национальные стандарты для тест-объектов: рыб (Австрия – М 6263, ч. 1, ч. 2, ч. 3; Великобритания – 6068, р.5-85; Венгрия – 260.24-56; 22902/3-77; Дания – 259-82; 6504-80; Норвегия – 4757-82; Польша – 0-04610 04-72; США – Д 3696-78; Франция – Т 90-303-85; Т 90-305-85; Т 90-307-85; ФРГ – 38412.15-82), дафний (Австрия – М 62-62-84; Великобритания – 6068, р.5-85; Венгрия – 260.24-56; 22902/6-81; Нидерланды – 6501-80; 6502-80; Польша – 0-04610 03-72; Финляндия – 50-60-84;

Франция – Т 90-301-83; ФРГ 38412.11-82), водорослей (Венгрия – 22902/2-76; Нидерланды – 6506-84; Польша – 0-04610 05-74), микробиологических объектов (Венгрия – 450/2-77), семян растений (Венгрия – 22902/4-76), общие по токсикологии (Венгрия – 22902/1-76, 2903/5-80; 22902/7-82; Польша – 0-04610 01-72; США – APH-AWWA-WPCF, Франция – Т 90-304-80; ФРГ – 384.12-82), для пресноводных рыбных водоемов (США – Д 1345-77; APH-AWWA-WPCF) [7].

С 1991 г. биотестирование в качестве обязательного элемента контроля качества поверхностных вод суши предусмотрено Правилами охраны поверхностных вод [14]. В России с 90-х гг. показатели биотестирования природных вод включены в перечень показателей для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия [15]. К настоящему моменту разработано несколько десятков методик, а главное – наработана нормативно-методическая база, например в системе Росгидромета. Ведомственным документом Росгидромета РД 52.24.309-2011 выполнение работ по биотестированию предусмотрено в качестве рекомендуемого [16].

В последние годы в связи с увеличением числа чрезвычайных ситуаций на водных объектах возрос интерес к использованию и разработке экспресс-методик биотестирования, способных в кратчайшие сроки получить информацию о токсичности вод и донных отложений, которые являются аккумуляторами загрязняющих веществ [17, 18]. На основе полученных данных оконтуривают загрязненные участки, в которых затем проводят исследования аналитическими методами с целью выявления конкретных загрязняющих веществ и их концентраций. В случае необходимости принимаются управленческие решения.

Согласно современным представлениям и мировому опыту оценка экотоксикологического состояния водных объектов невозможна без данных оценки интегральной токсичности с помощью биотестирования [19]. В России биотестирование применяется для оценки токсичности вод сотрудниками водоохраных организаций различных ведомств. Материалы публикуются в докладах о состоянии окружающей среды как регионального, так и федерального уровней.

Перспективы биотестирования

Развитие науки, особенно методических возможностей смежных наук и генной инженерии, позволяет расширить методологию биотестирования приборным оснащением и возможностью проникновения на микроуровень живых систем. Перспективными в водной экотоксикологии являются два направления: биомаркирование [20] и люминесцирующие бактериальные биосенсоры [21]. Не выявляя, как правило, отдельных веществ, они дают возможность обнаружить способность исследуемого образца вызывать токсические эффекты, в том числе поражать определенные классы биомолекул и дезинтегрировать важные метаболические пути. Показано, что батарея биосенсоров, включающая культуры различных штаммов бактерий видов *Vibrio aquamarines* и *Esherichia coli*, позволяет даже дифференцировать в воде и донных отложениях отдельные группы загрязняющих веществ, например тяжёлые металлы [21]. Однако эти методики на настоящий момент не вошли в водоохранную практику, а остаются в области научных исследований.

В современных подходах контроля гидросферы выделяют биотестирование, биоиндикацию, экспертную оценку качества экосистем, анализ ранговых рас-

пределений, метод функциональной желательности, эталонное оценивание, показатели функционирования биоценозов, оценку состояния биоты, основанную на отклонениях от нормального функционирования отдельных организмов (пограничный между биотестированием и биоиндикацией), графический способ выражения результатов изучения биоценозов. Особенности приемов биоиндикационного и биотестового исследований подробно изложены в [7]. Методы оценки качества биоты в реальных водных объектах различаются составом организмов-индикаторов и типом применяемого анализа (структурный, продукционный, биохимический, клинический).

Оценку экотоксичности водных экосистем по биологическим показателям, как изложено выше, проводят двумя основными методами: биоиндикацией и биотестированием. На этих двух методических приемах базируется биодиагностика, вскрывающая причины и факторы изменения среды на основе применения различных видов-биоиндикаторов, как правило, характеризующихся узкоспецифическими реакциями.

Методы биоиндикации установлены в руководстве [22], методы биотестирования поверхностных вод закреплены в ГОСТах, ПНД Ф (природоохранные нормативные документы федеративные), ПНД ФТ (федеральный природоохранный нормативный документ, регламентирующий токсикологические методы контроля), нормативно-методических документах РД (руководящий документ) и Р (рекомендации), в частности в ведомственных документах Росгидромета.

Окончательная оценка экотоксикологического состояния водных экосистем по результатам биологических методов исследования складывается из трёх основных характеристик: сапробности, трофности, токсичность (таблица). Хотя существует и более детальная классификация, объединённая в шесть основных групп: ацидофикацию (А), эвтрофикацию (Е), нуклидизацию (R), сапробизацию (S), термофикацию (t), токсификацию (Т) [23]. Сравнительная оценка типов антропогенного воздействия и методов их исследования изложена в работе [7].

Оценка по биоиндикационным исследованиям

По результатам биоиндикации получают сведения о видовом разнообразии и структурном составе гидробионтов, что выражается в качественных и количественных характеристиках биоценозов. По этим характеристикам рассчитывают индекс сапробности, определяют уровни трофности и загрязнённости согласно принятым в системе Росгидромета классификациям [16].

Биоиндикационные исследования, как правило, охватывают планктонные и донные биоценозы, реже – перифитон (обрастатели). Из планктонных обязательно исследованию подлежат биоценозы двух трофических уровней: автотрофы – фитопланктон, гетеротрофы – зоопланктон. В донных отложениях исследуют в основном гетеротрофов – макрозообентос. Результаты биоиндикации характеризуют отклик «аборигенных» гидробионтов на внешнее воздействие.

Биологические характеристики для оценки экотоксичности водных экосистем

Характеристика	Показатель	Метод	Оценка
Сапробность	Виды-индикаторы органического загрязнения (от олигодополисапробных)	Гидробиологический – все биоценозы водной толщи и донных отложений	Индекс сапробности, или процентный состав видов разных уровней сапробности
Трофность	Биомасса первого трофического звена (автотрофов)	Гидробиологический – структурно-видовые показатели фитопланктона	Уровень трофности по биомассе фитопланктона
	Концентрация хлорофилла <i>a</i>	Аналитический	Уровень трофности по концентрации хлорофилла <i>a</i>
Токсичность	Регистрируемые в соответствии с биотестом тест-показатели	Биотестирование по трём биотестам	ОТД, ПО/ТД, ХТД
	Регистрируемые в соответствии с биотестом тест-показатели	Биотестирование неизменённых ДО и их водных экстрактов (каждый по трём биотестам)	ОТД, ТД

Примечание. ОТД – острое токсическое действие; ПО/ТД – подострое токсическое действие; ХТД – хроническое токсическое действие.

Сапробность. Приёмы биоиндикации предполагают выявление видов-индикаторов сапробности в водных объектах во время натурных исследований. Далее ведут расчёт индекса сапробности Пантле и Букку [22].

По гидробиологическим показателям фитопланктона, зоопланктона и макрозообентоса разработано несколько классификаций качества вод, включающих индекс сапробности. В зарубежных странах принята шестиклассная оценка качества вод, которая положена в основу ГОСТа 17.12.04.77 [5], ГОСТа 17.13.07.82 и РД 52.24.309-2011 [24]. В обоих классификаторах указывается 6 классов качества вод, но словесное их определение и абсолютные значения показателей отличаются. Уточнённый и утверждённый спустя почти 20 лет нормативно-методический документ РД 52.24.309-2011 [16] ранжирует качество вод уже на 5 классов.

Ясно, что нумерация от 1 к 5 указывает на возрастание уровня (в другом случае – степени) загрязнённости воды. Изъятым оказался первый (1) класс – «очень чистые» воды, или «экологически полноценные, могут использоваться для питья, рекреации, рыбоводства и орошения». То есть за двадцать лет практически исчезли водные объекты, способные соответствовать такому высокому классу чистоты.

Разработана градация оценки состояния экосистем по методу экологических модификаций, включающая такие состояния экосистемы, как фоновое, антропогенное экологическое напряжение, антропогенный экологический регресс, антропогенный метаболический регресс [16, 22, 25, 26]. Следует подчеркнуть, что эта система основана на статистической обработке данных и применима исключительно для многолетних массивов наблюдений.

Предложена методика [27] мониторинга пресных водоемов по важнейшим характеристикам бентосных сообществ с использованием комбинированного индекса загрязнения, который объединяет значения 6 показателей бентосного сообщества (суммарной численности, суммарной биомассы, числа видов, индекса

Шеннона, олигохетного индекса Пареле и средней сапробности пробы), рассчитанной как средневзвешенная сапробность трех первых доминирующих по численности видов. Однако этот индекс в руководящие документы не включён.

Помимо индексов сапробности, чрезвычайно широкое применение получил индекс видового разнообразия Шеннона, заимствованный из теории информации. Существует, однако, точка зрения, что индекс Шеннона и другие индексы разнообразия невозможно интерпретировать в терминах качества среды [28]. Наблюдения свидетельствуют, что «здоровой» экосистеме могут соответствовать различные уровни видового разнообразия, в то же время одно и то же значение индекса может быть обнаружено у неодинаковых (порой прямо противоположных) состояний экосистемы.

Трофность. Сущность процесса эвтрофирования состоит в увеличении продуктивности экосистемы, в его основе лежит рост первичной продукции. В связи с этим используют биологические показатели, характеризующие процесс первичного продуцирования органического вещества и концентраций основного фотосинтетического пигмента – хлорофилла *a*. При определении трофического состояния водного объекта трудным представляется выделение градаций процесса эвтрофирования, поскольку процесс этот постепенный и непрерывный. Кроме того, эвтрофирование, формируемое многообразием и изменчивостью географических и экологических условий, обусловило появление большого количества различных классификаций и границ трофических уровней. В связи с этим попытки разработки шкал трофности по комплексу показателей не дали положительного результата. Сводные таблицы градаций трофического состояния водоёмов, разработанных на данный момент разными авторами по показателям фитопланктона (биомасса, концентрация хлорофилла *a*) и зоопланктона (биомасса), приведены в работе [29]. Абсолютные значения этих показателей в одном уровне трофности вод перекрываются и не совпадают.

Систематизированные материалы по расчёту и применению индексов сапробности и трофности представлены в работе [30].

Оценка по результатам биотестирования

Согласно нормативно-методическим документам [18, 31], при оценке токсичности исследуемой воды необходимо использовать минимум три биотеста. Использование набора биотестов с разными по чувствительности тест-объектами и тест-показателями увеличивает вероятность обнаружения токсичности исследуемой воды и донных отложений.

Итоговая оценка токсичности воды является экспертной. Окончательную оценку проводят по тест-объекту и тест-показателю, проявившему наибольшую чувствительность к воздействию исследуемой воды или донных отложений. Оценка по результатам биотестирования выражается словесно: «оказывает/не оказывает острого (ОТД), подострого (П/ОТД) или хронического (ХТД) токсического действия».

В зависимости от целей работ выбирают биотест (методику биотестирования) в соответствии с имеющейся предварительной информацией о геоморфологических особенностях водного объекта, расположением потенциально опасных производств, произошедших авариях, возможных видах загрязнения и т.д. Также перед исследованием необходимо выбрать, во-первых, тест-объект, экологически соответствующий гидрохимии водного объекта и объекту исследования (вода или донные отложения), во-вторых, вариант биотеста. Для быстрого получения информации о возможной токсичности за краткий промежуток времени выбирают экспрессный биотест и экспрессный тест-показатель; для определения хронического токсического действия – длительный биотест с обязательным включением показателя плодовитости. При оперативных работах и в случае чрезвычайных ситуаций (ЧС) проводят сканирование створов водного объекта для экспресс-оценки наличия или отсутствия токсичности вод и донных отложений. Сканирование проводят методом экспрессного биотестирования, позволяющего в зависимости от выбранного биотеста в кратчайшие сроки (до 1 ч – Р ...) определить наличие или отсутствие токсичности [17].

В случае обнаружения острого токсического действия (ОТД) проводят серию разбавлений чистой контрольной водой. На основе разбавлений разработана шкала оценки токсичности и экологического статуса водного объекта или его участка [17, 23].

Оценку уровня токсического загрязнения вод в режимных наблюдениях проводят в сравнении с контрольной серией, поставленной на воде из условно чистого створа или дехлорированной водой исследуемого региона. Как правило, рассчитывают отклонение полученных значений тест-показателя от контрольных или статистически достоверные отличия. Такого рода оценки проводят по отдельным тест-объектам.

Однако наиболее точной является оценка по комплексу тест-показателей в сочетании со временем биотестового эксперимента. В [17, 32] предложены шкалы оценки токсичности вод с использованием гетеротрофных тест-объектов по двум тест-показателям, один из которых – выживаемость – является основным, так как позволяет дать прогноз существования популяции в исследуемом водном объекте. Разработана также шкала оценки токсичности вод по комплексу двух тест-показателей автотрофных тест-объектов (коэффициент прироста численности, дающий прогноз развития популяции, и концентрация основного фотосинтетического пигмента – хлорофилла *a*) [33].

Оценка уровня токсического загрязнения донных отложений водоёмов и водотоков по данным биотестирования [16] учитывает тип и характер донных отложений и количество участков, на которых обнаружена токсичность.

Оценка токсикологического состояния водоёма и водотока (участка) методом биотестирования только донных отложений в [16] относится к длительному периоду наблюдений – один год. В [32, 34] представлена шкала оценки экологического состояния водного объекта по результатам биотестирования двух компонентов экосистем – вод и донных отложений – по данным однократной съёмки.

Оценка по комплексу биологических методов

Из существующих попыток разработки шкал для оценки экотоксикологического состояния водных экосистем по набору абиотических и биотических показателей наиболее применимой является система, предложенная Окснюк, Жукинским [35], однако используют её только в научно-исследовательских целях.

Практический аспект применения биологических методов оценки качества поверхностных вод

Наиболее очевидным, реальным направлением применения биологических методов служит государственная система мониторинга качества вод (ГСН) Росгидромета. По мнению А.М. Никанорова [36], в настоящее время формирование и развитие ГСН должно опираться на соответствующую нормативно-правовую базу, в которой должен быть закреплён юридический статус самой системы, ее частей и структурных элементов, определены юридический статус получаемой информации и ответственность юридических и физических лиц за ее сокрытие, непредставление и умышленное искажение [36].

Методик биотестирования разработано и используется в научно-исследовательских целях несколько десятков. Часть разработок нашла выход в природоохранной практике. Но проблема сопоставления результатов, полученных разными авторами, осложняется тем, что разные ведомства работают разными методиками, в то время как природоохранные меро-

приятия должны основываться на определённой нормативно-методической базе, утверждённой соответствующими ведомствами. К настоящему времени на ряд методик биотестирования существуют нормативные документы: ГОСТ, ПНД Ф, ПНД Ф Т, РД и Р.

В настоящее время наблюдения в системе ГСН Росгидромета проводят в соответствии с разработанными и утверждёнными нормативно-методическими документами.

В связи с участвующимися техногенными авариями, ЧС особое внимание уделяется разработке оперативных методик. Основное требование к оперативным работам по оценке токсичности вод методом биотестирования заключается в экспрессности получения достоверной биологической информации. Это возможно при использовании короткоциклических организмов из числа представителей фито- и зоопланктона и использовании легкорегистрируемых тест-показателей. С этих позиций наиболее удобным является применение методик, использующих в качестве тест-объектов представителей коловраток и инфузорий.

Рассмотрим нормативно-методические документы, отвечающие указанным требованиям. В РД 52.24662-2004 [32] изложен ряд методик с использованием различных тест-показателей коловраток, позволяющих получить результат о токсичности вод или донных отложений в зависимости от выбранного показателя и задачи исследования, например, определить острое, подострое или хроническое токсическое действие. В течение 30 мин тест-показатель даёт ответ – скорость осветления среды, в течение 24, 48, 72 ч – комплекс тест-показателей «выживаемость» и основного биологического тест-показателя – «плодовитость».

Экспресс-методика биотестирования с использованием в качестве тест-показателя особенностей поведенческой реакции инфузорий хемотаксиса закреплена в Р 52.24.741-2010 [17]. Этот биотест даёт ответ через 30 мин. В ФР.1.31.2005.01881 [37] и ПНД ФТ 14.1:2:3:4.2-98 [38] эта же методика позволяет регистрировать реакцию хемотаксиса инфузорий прибором «Биотестер» различных модификаций.

Биотест по оценке токсического загрязнения природных вод и донных отложений водных экосистем по коэффициенту регенерации популяции утверждён в Р 52.24.695-2007 [34]. Методика универсальна: позволяет определять возможности выживания популяции любого используемого тест-объекта по количеству отродившейся молодежи и отмерших особей. Для оперативных работ – на короткоциклических тест-объектах (микроводоросли, инфузории, коловратки).

При использовании в качестве тест-объектов представителей фитопланктона экспрессным тест-показателем служит изменение концентрации хлорофилла *a*. Наиболее точный ответ получают по комплексу тест-показателей: концентрации хлорофилла *a* и коэффициента прироста микроводорослей, представленных в Р 52.24.808-2014 [33]. Методика определения хлорофилла *a* может быть осуществлена гидрохимиками в аналитической лаборатории.

Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколом» на приборе «Биотокс-10» закреплена ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 (ПНД Ф Т 16.1:2.3:3.8-04) [39].

Выйти на приборный уровень проведения методик биотестирования позволило использование для регистрации тест-показателей живых организмов химических и физических методик.

Заключение

На сегодняшний момент развития экотоксикологии наработано большое количество индексов, рассчитываемых по показателям гидробиоты, полученным в ходе биоиндикации, а также методик биотестирования и нормативно-методической документации по их применению. Однако проблема оценки экотоксикологического состояния экосистем остаётся открытой. Весьма трудной является разработка универсальной шкалы для всего многообразия водных объектов и типов загрязнений. Большой фактический материал, полученный авторами, по изучению водных объектов Нижнего Дона комплексом биологических методов изложен в ряде публикаций [40–43] и др. Эти исследования могут быть использованы для разработки шкал экотоксикологического состояния водных объектов бассейна Нижнего Дона в зависимости от конкретной антропогенной нагрузки.

Литература

1. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 14.10.2014). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170158 (дата обращения: 11.10.2014).
2. Винберг Г.Г. Пути количественного исследования роли водных организмов как агентов самоочищения загрязнённых вод // Радиоактивные изотопы в гидробиологии и методы санитарной гидробиологии. М., 1964. С. 21–36.
3. Hauhs M., Neal C., Hooper R., Christophersen N. Summary of a workshop on ecosystem modeling: The end of an era? // Sci. Total Environ. 1996. Vol. 183. P. 1–5.
4. Вернадский В.И. Живое вещество. М., 1978. 358 с.
5. ГОСТ 17.1.1.01-77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения. М., 2000.
6. ИСО/ТК 147/С 6 1990. Качество воды. Общее руководство по биотестированию вод и сточных вод. Отбор проб, подготовка, проведение и оценка.
7. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М. Гидробионты в оценке качества вод суши. М., 2006. 236 с.
8. Строганов Н.С. Краткий словарь терминов по водной токсикологии. Ярославль, 1982. 42 с.
9. ГОСТ 27065 СТ СЭВ 5184-85. Качество вод. Термины и определения. М., 2001.
10. Бакаева Е.Н. Адекватная оценка состояния водных экосистем биологическими методами // Материалы VI Всерос. гидролог. съезда. 28 сентября – 1 октября 2004 г. СПб., 2004. С. 156–158.

11. Никаноров А.М., Бакаева Е.Н., Хоружая Т.А. Результаты и перспективы использования экотоксикологических методов контроля в системах мониторинга поверхностных вод // Десять лет сотрудничества России и Беларуси в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды и перспективы его дальнейшего развития : материалы науч.-практ. конф. 12–14 декабря 2006. М., 2006. С. 33–35.
12. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. Динамика токсичности поверхностных вод бассейна реки Дон в пределах мегаполиса по многолетним данным биотестирования // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 1. С. 70–77.
13. Положение об осуществлении государственного мониторинга водных объектов: Постановление Правительства РФ № 219 от 10.04.07. URL: http://www.consultant.ru/cons_doc_LAW_162057 (дата обращения: 11.10.2014).
14. Правила охраны поверхностных вод: типовые положения. М., 1991. 42 с.
15. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия // Зеленый мир. 1994. № 12. С. 8.
16. РД 52.24.309-2011. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов н/Д, 2011. 24 с.
17. Р 52.24.741-2010. Оценка токсичности поверхностных вод суши в условиях чрезвычайных ситуаций методом экспрессного биотестирования // Обеспечение безопасности поверхностных вод суши РФ в условиях чрезвычайных ситуаций : сб. рекомендаций. Ростов н/Д, 2011. С. 67–90.
18. Р 52.24.756-2011. Критерии опасности токсического загрязнения поверхностных вод суши при чрезвычайных ситуациях (в случаях загрязнения) // Обеспечение безопасности поверхностных вод суши РФ в условиях чрезвычайных ситуаций: сб. рекомендаций. Ростов н/Д, 2011. С. 91–125.
19. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Исследование состояния поверхностных вод на основе комплекса биологических методов // Современные методы исследования состояния поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки: материалы V Всерос. конф. по водной токсикологии. 28 октября – 1 ноября 2014. Борок, 2014. Т. 2. С. 119–123.
20. Чуйко Г.М. Биомаркеры в гидроэкологии: принципы, методы, методология, практика использования // Современные методы исследования состояния поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки : материалы V Всерос. конф. по водной токсикологии, 28 октября – 1 ноября 2014. Борок, 2014. Т. 2. С. 185–197.
21. Сазыкина М.А. Экотоксикологическая оценка водных экосистем с использованием биосенсоров на основе люминесцентных бактерий: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Ростов н/Д, 2014.
22. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В.А. Абакумова. СПб., 1992. 318 с.
23. Брагинский Л.П. Некоторые принципы классификации пресноводных экосистем по уровням токсической загрязненности // Гидробиол. журн. 1985. Т. 21, № 6. С. 65–74.
24. РД 52.24.309-92. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. СПб., 1992. 24 с.
25. РД 52.24.633-2002. Методические основы создания и функционирования подсистемы мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем. СПб., 2002. 32 с.
26. РД 52.24.565-96. Метод оценки загрязненности пресноводных экосистем по показателям развития зооплankтона. М., 1996. 32 с.
27. Баканов А.И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоёмов // Биол. внутр. вод. 2000. № 1. С. 68–82.
28. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург, 1994. 280 с.
29. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М., 2007. 252 с.
30. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология. Тольятти, 2003. 463 с.
31. РД 52.24.566-94. Методы токсикологической оценки загрязнения пресноводных экосистем. М., 1994. 130 с.
32. РД 52.24.662-2004. Оценка токсического загрязнения природных вод и донных отложений пресноводных экосистем методами биотестирования с использованием кололаток. М., 2006. 60 с.
33. Р 52.24.808-2014. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла *a* / Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Ростов н/Д., 2014. 23 с.
34. Р 52.24.695-2007. Оценка токсического загрязнения природных вод и донных отложений водных экосистем по коэффициенту регенерации популяции. Ростов н/Д, 2008. 32 с.
35. Оксьюк О.М., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 30, № 2. С. 213–221.
36. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Бражникова Л.В., Жулидов А.В. Качество вод: оценка токсичности. СПб., 2000. 159 с.
37. ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.2-98. Методика определения токсичности воды по хемотаксической реакции инфузорий. М., 1998.
38. ПНД Ф Т 16.2:2.2-98. Методика определения токсичности почвы и донных осадков по хемотаксической реакции инфузорий. М., 1998.
39. ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.11-04 (ПНД Ф 16.1:2.3:3.8-04). Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм». М., 2004.
40. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Эколого-токсикологическое состояние нижнего течения р. Дон // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы : материалы III Всерос. конф. по водной токсикологии. Борок, 2008. С. 193–197.
41. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Оценка токсичности вод методом биотестирования: вопросы методического обеспечения // Экология. Экономика. Информатика : материалы конф. Ростов н/Д, 2008. С. 93–95.
42. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Динамика токсичности вод и донных отложений водного объекта рекреации // Совр. проблемы науки и образования (электр. журн.). 2011. № 6.
43. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Экотоксичность вод приплотинного участка Цимлянского водохранилища // Глобальная ядерная безопасность. 2012. Спец. вып. № 3. С. 5–10.

References

- Vodnyi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 03.06.2006 N 74-FZ (red. ot 14.10.2014) [Water Code of the Russian Federation of 03.06.2006 N 74-FZ]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170158/ (accessed 11.10.2014).
- Vinberg G.G. [Methods for the quantitative study of the role of aquatic organisms as agents of self-purification of polluted water]. *Radioaktivnye izotopy v gidrobiologii i metody sanitarnoi gidrobiologii* [Radioactive isotopes in hydrobiology and sanitary methods of hydrobiology]. Moscow, 1964, pp. 21-36.
- Hauhs M., Neal C., Hooper R., Christophersen N. Summary of a workshop on ecosystem modeling: The end of an era? *Sci. Total Environ.*, 1996, vol. 183, pp. 1-5.
- Vernadskii V.I. *Zhivoe veshchestvo* [Living matter]. Moscow, 1978, 358 p.
- GOST 17.1.1.01-77. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Ispol'zovanie i okhrana vod. Osnovnye terminy i opredeleniya* [GOST 17.1.1.01-7. Nature Conservancy. Hydrosphere. Use and protection of water. Basic terms and definitions]. Moscow, 2000.
- ISO/TK 147/S 6 1990. *Kachestvo vody. Obshchee rukovodstvo po biotestirovaniyu vod i stochnykh vod. Otbor prob, podgotovka, provedenie i otsenka* [ISO / TC 147 / C 6 1990. Water quality. General guidance of water and wastewater biotesting. Sampling, preparation, implementation and evaluation].
- Bakaeva E.N., Nikanorov A.M. *Gidrobionty v otsenke kachestva vod sushi* [Aquatic organisms in water quality assessment of the land]. Moscow, 2006, 236 p.
- Stroganov N.S. *Kratkii slovar' terminov po vodnoi toksikologii* [A brief glossary on water toxicology]. Yaroslavl, 1982, 42 p.
- GOST 27065 ST SEV 5184-85. *Kachestvo vod. Terminy i opredeleniya* [GOST 27065 ST SEV 5184-85. Water quality. Terms and definitions]. Moscow, 2001.
- Bakaeva E.N. [Adequate assessment of aquatic ecosystems biological methods]. *Materialy 6 vseros. gidrolog. s"ezda. 28 sentyabrya - 1 oktyabrya 2004* [Materials 6 Proc. hydrologist. congress. 28 September - 1 October 2004]. Saint Petersburg, 2004, pp. 156-158.
- Nikanorov A.M., Bakaeva E.N., Khoruzhaya T.A. [Results and prospects of ecotoxicological methods of control systems for surface water monitoring]. *Desyat' let sotrudnichestva Rossii i Belarusi v oblasti gidrometeorologii i monitoringa zagryazneniya prirodnoi sredy i perspektivy ego dal'neishego razvitiya* : materialy nauch.-prakt. konf. 12-14 dekabrya 2006 [Ten years of cooperation between Russia and Belarus in the field of hydrometeorology and monitoring of environmental pollution and the prospects for its further development: scientific and practical materials. Conf. 12-14 December 2006]. Moscow, 2006, pp. 33-35.
- Bakaeva E.N., Nikanorov A.M., Ignatova N.A. Dinamika toksichnosti poverkhnostnykh vod basseina reki Don v predelakh megapolisa po mnogoletnim dannym biotestirovaniya [Dynamics of surface water toxicity Don basin within the metropolis for long-term data bioassay]. *Vodnye resursy*, 2015, vol. 42, no 1, pp. 70-77.
- Polozhenie ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"ektov: Postanovlenie Pravitel'stva RF N 219 ot 10.04.07 [Regulation on the implementation of state monitoring of water bodies: Russian Federation Government Resolution № 219 of 10.04.07]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162057/ (accessed 11.10.2014).
- Pravila okhrany poverkhnostnykh vod: tipovye polozeniya [Rules for the protection of surface waters: model regulations]. Moscow, 1991, 42 p.
- Kriterii otsenki ekologicheskoi obstanovki territorii dlya vyyavleniya zon chrezvychainoi ekologicheskoi situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya [Criteria for assessing the ecological environment areas to identify areas of ecological emergency and ecological disaster zones]. *Zelenyi mir*, 1994, no 12, p. 8.
- RD 52.24.309-2011. *Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudenii za sostoyaniem i zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushi* [RD 52.24.309-2011. Organization and carrying out routine observations of the condition and surface water pollution]. Rostov-on-Don, 2011, 24 p.
- R 52.24.741-2010. Otsenka toksichnosti poverkhnostnykh vod sushi v usloviyakh chrezvychainykh situatsii metodom ekspresnogo biotestirovaniya [P 52.24.741-2010. Evaluation of the toxicity of surface water in emergency situations by express bioassay]. *Obespechenie bezopasnosti poverkhnostnykh vod sushi RF v usloviyakh chrezvychainykh situatsii* : sbornik rekomendatsii. Rostov-on-Don, 2011, pp. 67-90.
- R 52.24.756-2011. Kriterii opasnosti toksicheskogo zagryazneniya poverkhnostnykh vod sushi pri chrezvychainykh situatsiyakh (v sluchayakh zagryazneniya) [P 52.24.756-2011. Criteria for a hazardous toxic pollution of surface waters in emergency situations (in the case of pollution)]. *Obespechenie bezopasnosti poverkhnostnykh vod sushi RF v usloviyakh chrezvychainykh situatsii* : sbornik rekomendatsii. Rostov-on-Don, 2011, pp. 91-125.
- Bakaeva E.N., Ignatova N.A. [The study of surface water on the basis of complex biological methods]. *Sovremennye metody issledovaniya sostoyaniya poverkhnostnykh vod v usloviyakh antropogennoi nagruzki* : materialy V vseros. konf. po vodnoi toksikologii. 28 oktyabrya - 1 noyabrya 2014 [Modern methods of investigation of surface waters in the conditions of anthropogenic load: the V All-Russia. conf. on aquatic toxicology. 28 October - 1 November 2014]. Borok, 2014, vol. 2, pp. 119-123.
- Chuiiko G.M. [Biomarkers in hydroecology: principles, methods, methodology, practice of using]. *Sovremennye metody issledovaniya sostoyaniya poverkhnostnykh vod v usloviyakh antropogennoi nagruzki* : materialy V vseros. konf. po vodnoi toksikologii, 28 oktyabrya - 1 noyabrya 2014 [Modern methods of investigation of surface waters in the conditions of anthropogenic load: the V All-Russia. Conf. on aquatic toxicology, Oct. 28 - 1 Nov. 2014]. Borok, 2014, vol. 2, pp. 185-197.
- Sazykina M.A. *Ekotoksikologicheskaya otsenka vodnykh ekosistem s ispol'zovaniem biosensov na osnove lyuminestsentnykh bakterii*: avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk [Ecotoxicological assessment of aquatic ecosystems based biosensors based on fluorescent bacteria]. Rostov-on-Don, 2014.
- Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem* [Guide of hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems]. Ed. V.A. Abakumov. Saint Petersburg, 1992, 318 p.
- Braginskii L.P. *Nekotorye printsipy klassifikatsii presnovodnykh ekosistem po urovnyam toksicheskoi zagryaznennosti* [Some principles of classification of freshwater ecosystems through the levels of toxic contamination]. *Gidrobiol. zhurn.*, 1985, vol. 21, no 6, pp. 65-74.

24. RD 52.24.309-92. *Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudenii za sostoyaniem i zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushy* [RD 52.24.309-92. Organization and carrying out routine observations of the condition and surface water pollution]. Saint Petersburg, 1992, 24 p.
25. RD 52.24.633-2002. *Metodicheskie osnovy sozdaniya i funktsionirovaniya podsystemy monitoringa ekologicheskogo regressa presnovodnykh ekosistem* [RD 52.24.633-2002. Methodological basis for the creation and operation of environmental monitoring subsystem recourse freshwater ecosystems]. Saint Petersburg, 2002, 32 p.
26. RD 52.24.565-96. *Metod otsenki zagryaznenosti presnovodnykh ekosistem po pokazatelyam razvitiya zooplanktona* [RD 52.24.565-96. Method of estimating contamination of freshwater ecosystems in terms of the development of zooplankton]. Moscow, 1996, 32 p.
27. Bakanov A.I. Ispol'zovanie zoobentosa dlya monitoringa presnovodnykh vodoemov [Using zoobenthos to monitor freshwater reservoirs]. *Biol. vnutr. vod*, 2000, no 1, pp. 68-82.
28. Vorobeichik E.L., Sadykov O.F., Farafontov M.G. *Ekologicheskoe normirovanie tekhnogennykh zagryaznenii* [Environmental regulation of technogenic pollution]. Ekaterinburg, 1994, 280 p.
29. Datsenko Yu.S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty* [Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow, 2007, 252 p.
30. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaya gidroekologiya* [Quantitative hydroecology]. Tol'yatti, 2003, 463 p.
31. RD 52.24.566-94. *Metody toksikologicheskoi otsenki zagryazneniya presnovodnykh ekosistem* [RD 52.24.566-94. Methods of toxicological assessment of pollution of freshwater ecosystems]. Moscow, 1994, 130 p.
32. RD 52.24.662-2004. *Otsenka toksicheskogo zagryazneniya prirodnykh vod i donnykh otlozhenii presnovodnykh ekosistem metodami biotestirovaniya s ispol'zovaniem kolovratok* [RD 52.24.662-2004. Evaluation of the toxic pollution of natural waters and sediments of freshwater ecosystems bioassay methods using rotifers]. Moscow, 2006, 60 p.
33. R 52.24.808-2014. *Otsenka toksichnosti poverkhnostnykh vod sushy metodom biotestirovaniya s ispol'zovaniem khlorofilla a* [P 52.24.808-2014. Evaluation of the toxicity of surface water by bioassay using chlorophyll a]. Bakaeva E.N., Ignatova N.A., Chernikova G.G. Rostov-on-Don, 2014, 23 p.
34. R 52.24.695-2007. *Otsenka toksicheskogo zagryazneniya prirodnykh vod i donnykh otlozhenii vodnykh ekosistem po koeffitsientu regeneratsii populyatsii* [P 52.24.695-2007. Evaluation of the toxic pollution of natural waters and sediments of aquatic ecosystems at a rate of regeneration of the population]. Rostov-on-Don, 2008, 32 p.
35. Oksiyuk O.M., Zhukinskii V.N., Braginskii L.P. *Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod sushy* [Complex ecological quality classification of surface waters]. *Gidrobiol. zhurn.*, 1993, vol. 30, no 2, pp. 213-221.
36. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Brazhnikova L.V., Zhulidov A.V. *Kachestvo vod: otsenka toksichnosti* [Water quality: evaluation of toxicity]. Saint Petersburg, 2000, 159 p.
37. PND F T 14.1:2:3:4.2-98. *Metodika opredeleniya toksichnosti vody po khemotaksicheskoi reaktzii infuzorii* [PND F T 14.1:2:3:4.2-98. Method of determining the toxicity of water on the chemotactic response of ciliates]. Moscow, 1998.
38. PND F T 16.2:2.2-98. *Metodika opredeleniya toksichnosti pochvy i donnykh osadkov po khemotaksicheskoi reaktzii infuzorii* [PND F T 16.2:2.2-98. Method of determining the toxicity of soils and bottom sediments on the chemotactic response of ciliates]. Moscow, 1998.
39. PND F T 14.1:2:3:4.11-04 (PND F 16.1:2.3:3.8-04). *Metodika opredeleniya toksichnosti vody i vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod i otkhodov po izmeneniyu intensivnosti bakterial'noi biolyuminestsentsii test-sistemoi «Ekolyum»* [PND F T 14.1: 2: 3: 4.11-04 (PND F 16.1: 2.3: 3.8-04). Method of determining the toxicity of water and aqueous extracts from soils, sewage sludge and waste by changes in the intensity of bacterial bioluminescence test system "Ekolyum"]. Moscow, 2004.
40. Bakaeva E.N., Ignatova N.A. [Ecological and toxicological state of the lower reaches of the river Don]. *Antropogennoe vliyaniye na vodnye organizmy i ekosistemy: materialy III vseros. konf. po vodnoi toksikologii* [Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems: Proceedings of III All-Russia. Conf. on aquatic toxicology]. Borok, 2008, pp. 193-197.
41. Bakaeva E.N., Ignatova N.A. [Assessment of toxicity bioassay method of treatment: methodological support questions]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: materialy konf.* [Ecology. Economy. Computer Science: materials conf.]. Rostov-on-Don, 2008, pp. 93-95.
42. Bakaeva E.N., Ignatova N.A. *Dinamika toksichnosti vod i donnykh otlozhenii vodnogo ob'ekta rekreatsii* [The dynamics of the toxicity of water and bottom sediments of a water body recreation]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya (elektr. zhurn.)*, 2011, no 6.
43. Bakaeva E.N., Ignatova N.A., Chernikova G.G. *Ekotoksichnost' vod priplotinnogo uchastka Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Ecotoxicity water reservoir dam part Tsimlyansk]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*, 2012, Spetsvyp., no 3, pp. 5-10.