

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2022

Чуйко Г.М.¹, Томилина И.И.¹, Холмогорова Н.В.^{2,3}

Методы биодиагностики в водной экотоксикологии

¹ФГБУН «Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина» Российской академии наук, 152742, Ярославская область, г. Борок, Российская Федерация;

²ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, Удмуртская Республика, г. Ижевск, Российская Федерация;

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, Российская Федерация

Введение. Современная экотоксикология для обнаружения, количественной и качественной оценки содержания токсикантов в окружающей среде и живых организмах использует весь спектр химико-аналитических методов. Однако методы биодиагностики специфичны для этой науки.

Материал и методы. В статье обобщены сведения об использовании современных методов биодиагностики: биомаркирования, биотестирования и биоиндикации.

Результаты. Основным преимуществом биодиагностики перед физико-химическими методами анализа является возможность выявления биологических последствий действия одного стрессового фактора или их сочетания. В то же время биодиагностические методы позволяют фиксировать аддитивность, антагонизм и синергизм их совместного действия. Биомаркирование отличается от других методов биодиагностики временем отклика от нескольких минут до нескольких суток, высокой чувствительностью и достаточной специфичностью, так как дает возможность регистрировать изменения, происходящие в биологической системе на ранних этапах действия факторов при их малой интенсивности, и при этом в некоторых случаях выявить характер стресс-фактора. Биотестирование имеет более медленное время отклика, чем биомаркирование (от нескольких часов до нескольких недель), но экологическая значимость на уровне особи более очевидна: гибель организма, снижение репродуктивной способности вплоть до прекращения размножения, нарушение роста, развития, различных типов поведения и т. д. Биоиндикация характеризуется достаточно длительной задержкой ответов надорганизменных биосистем на действие стрессового фактора от нескольких недель до нескольких лет. В то же время он позволяет более адекватно и достоверно оценивать изменения, произошедшие за длительный период действия негативного фактора, прогнозировать варианты дальнейшего развития экосистем.

Ограничения исследования. Методы биодиагностики в водной экотоксикологии не имеют ограничений использования. Однако в отличие от методов физико-химического анализа они не позволяют дать количественную, а иногда качественную оценку стресс-фактора. Поэтому их следует использовать совместно с методами качественного и количественного физико-химического анализа.

Заключение. Таким образом, биодиагностический подход, включающий биомаркирование, биотестирование и биоиндикацию, совместно с физико-химическим анализом, играет важную роль в современной комплексной системе оценки экологического состояния водоемов и антропогенного воздействия на них.

Ключевые слова: биодиагностика; биомаркирование; биотестирование; биоиндикация; водная экотоксикология

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Чуйко Г.М., Томилина И.И., Холмогорова Н.В. Методы биодиагностики в водной экотоксикологии. Токсикологический вестник. 2022; 30(5): 315-322. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2022-30-5-315-322>

Для корреспонденции: Чуйко Григорий Михайлович, доктор биол. наук, заведующий лабораторией физиологии и токсикологии водных животных ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина» РАН, Ярославская область, 152742, г. Борок, Российская Федерация. E-mail: gchuiko@ibiw.ru

Участие авторов: Чуйко Г.М. – концепция исследования, сбор и обработка материала, написание текста; Томилина И.И., Холмогорова Н.В. – сбор и обработка материала, написание текста. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование. Работа выполнена в рамках плановой темы № г/р АААА-А18-118012690123-4, при частичной поддержке грантов РФФИ (№ 08-05-00805, 12-05-00572) и приоритетного проекта Оздоровление Волги по теме № г.р. АААА-А18-118052590015-9.

Поступила в редакцию: 08 сентября 2022 / Принята в печать: 22 сентября 2022 / Опубликовано: 30 октября 2022

Chuiko G.M.¹, Tomilina I.I.¹, Kholmogorova N.V.^{2,3}

Methods of biodiagnostics in aquatic ecotoxicology

¹Institute of Biology of Inland Waters named after I.D. Papanin, Yaroslavl region, Borok, Russian Federation;

²Udmurt State University, 426034, Udmurt Republic, Izhevsk, Russian Federation;

³National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russian Federation

Introduction. Modern ecotoxicology for the detection, quantitative and qualitative assessment of the content of toxicants in the environment and living organisms uses the entire spectrum of chemical-analytical methods. However, methods of biodiagnostics are specific to this science.

Materials and methods. The paper summarizes information on the use of modern methods of biodiagnostics: biomarking, biotesting and bioindication.

Results. The main advantage of biodiagnostics over physicochemical methods of analysis is the ability to identify the biological consequences of the action of a single stress factor or their combination. At the same time, biodiagnostic methods allow fixing the additivity, antagonism and synergy of their joint action. Biomarking differs from other biodiagnostic methods in response time from several minutes to several days, high sensitivity and sufficient specificity, since it gives the ability to register the changes occurring in the biological system at the early stages of the action of factors at their low intensity and at the same time identify the nature of the stress factor. Biotesting has a slower response time than biomarking (from several hours to several weeks), but the ecological significance at the level of an individual is more obvious: the death of an organism, a decrease in reproductive ability up to the cessation of reproduction, disruption of growth, development, various types of behavior, etc. Bioindication is characterized by a sufficiently long-time delay of responses of supraorganismal biosystems to the action of a stress factor from several weeks to several years. At the same time, it makes possible assess more adequately and reliably the changes that have occurred over a long period of time of stress factor action in order to predict options for the further development of ecosystems.

Limitations. Methods of biodiagnostics in aquatic ecotoxicology have no restrictions on their use. However, unlike the methods of physicochemical analysis, they do not allow a quantitative, and sometimes a qualitative assessment of the stress factor. Therefore, they should be used in conjunction with the methods of qualitative and quantitative physicochemical analysis.

Conclusion. Thus, the biodiagnostic approach, including biomarking, biotesting, and bioindication, together with physics and chemicals analysis plays an important role in the modern integrated system for assessing the ecological state of water bodies and anthropogenic impact on them.

Keywords: *biodiagnostics; biomarking; biotesting; bioindication; aquatic ecotoxicology*

Compliance with ethical standards. The study does not require submission of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Chuiko G.M., Tomilina I.I., Kholmogorova N.V. Methods of biodiagnostics in water ecotoxicology. *Toksikologicheskii vestnik (Toxicological Review)*. 2022; 30(5): 315-322. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2022-30-5-315-322> (in Russian)

For correspondence: *Chuiko Grigorii Mikhailovich*, Head of the Laboratory of Physiology and Toxicology of Aquatic Animals of the I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, 152742, Yaroslavl Region, Borok village, Russian Federation. E-mail: gchuiko@ibiw.ru

Information about authors:

Chuiko G.M., <https://orcid.org/0000-0002-3334-7073>

Tomilina I.I., <https://orcid.org/0000-0002-5266-877X>

Kholmogorova N.V., <https://orcid.org/0000-0003-3970-1907>

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004160570>

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=23567256800>

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211207796>

Author contributions: *Chuiko G.M.* – the concept of the study, the collection and processing of material, writing the text; *Tomilina I.I., Kholmogorova N.V.* – collection and processing of material, writing the text. *All co-authors* – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

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

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the planned theme No. g/r AAAA-A18-118012690123-4, with partial support from RFBR grants (No AAAA-A18-118052590015-9.)

Received: September 08, 2022 / Accepted: September 22, 2022 / Published: October 30, 2022

Введение

Антропогенное загрязнение окружающей среды – одна из актуальных экологических, санитарно-гигиенических и социальных проблем человечества [1]. Влияние человека на окружающую среду – неизбежный результат его жизнедеятельности, как одного из элементов биосферы. Научно-технический прогресс, продолжающийся рост численности населения на планете и его постоянно возрастающие потребности требуют освоения новых территорий, введение в эксплуатацию все новых и новых минерально-энергетических, сырьевых и пищевых ресурсов, создания и активного использования новых химических соединений, материалов и технологий, наращивания промышленного и сельскохозяйственного производства. Все это ведет за собой масштабное поступление в природную среду и вовлечение в глобальную циркуляцию веществ антропогенного происхождения, отсутствующих в естественных условиях или встречающихся в природе в безопасных количествах.

Материал и методы

В работе обобщены сведения о применении современных методов биодиагностики: биомаркировании, биотестировании и биоиндикации.

Результаты и обсуждение

До недавнего времени экотоксикологическая оценка антропогенного воздействия на окружающую среду и его нормирование базировалась на количественном и качественном анализе содержания загрязняющих веществ физико-химическими методами. Однако такой подход имеет два существенных недостатка: он не учитывает реакцию биоты на действие антропогенных факторов и не позволяет оценить их совместное влияние на нее. Этих недостатков лишены методы биодиагностики, которые начинают все более активно использоваться для оценки качества среды.

Из вышеизложенного следует, что в настоящее время необходима система комплексной оценки, которая должна состоять из двух основных компонентов: инструментально-аналитиче-

ского физико-химического анализа и биодиагностики [2] (рис. 1).

Аналитические физико-химические методы используются для качественной и количественной оценки антропогенных факторов окружающей среды, а биодиагностика – для оценки степени их воздействия на окружающую среду и биоту.

На современном этапе под биодиагностикой в экотоксикологии понимают использование ответов биологических систем на разных уровнях биологической организации (суборганизменный, организменный, надорганизменный) на действие экологических факторов для оценки их состояния и качества окружающей среды (рис. 2).

Главное преимущество биодиагностики перед физико-химическими методами анализа – способность выявить биологические последствия действия отдельно взятого стресс-фактора или их совокупности. При этом биологические методы позволяют регистрировать аддитивность, антагонизм и синергичность их совместного действия.

Биодиагностика включает биомаркирование, биотестирование и биоиндикацию.

Биомаркирование служит для оценки степени воздействия факторов среды на состояние здоровья гидробионтов с использованием биомаркеров – морфофункциональных показателей, регистрируемых на суборганизменном и организменном уровнях биологической организации, таких как молекулярно-генетический, био-

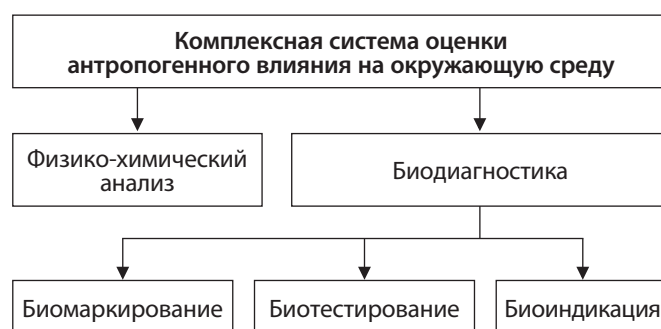


Рис. 1. Компоненты комплексной системы оценки эколого-токсикологического состояния объектов окружающей среды.

Fig. 1. Components of an integrated system for assessing the ecological and toxicological state of environment.

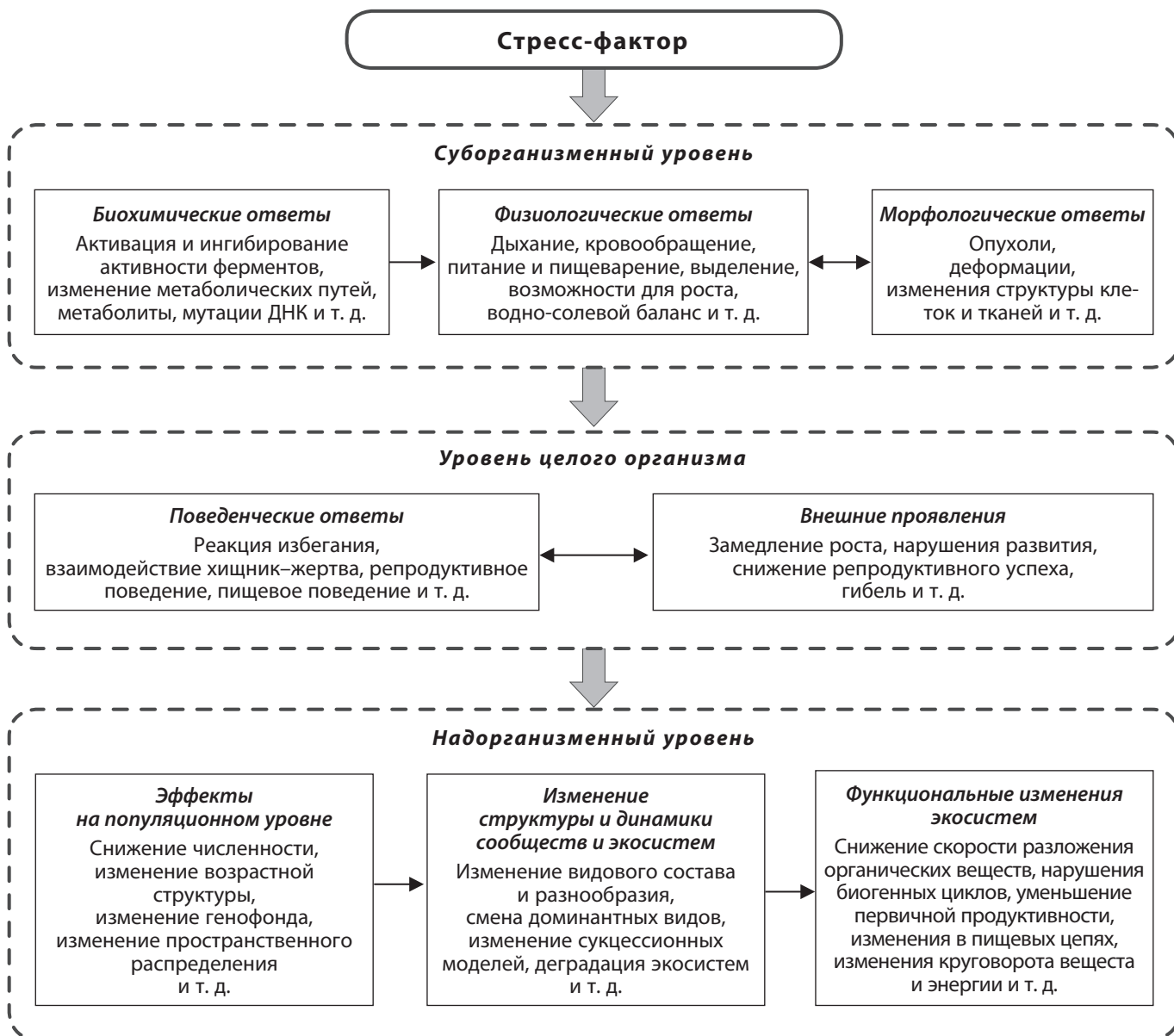


Рис. 2. Блок-схема эффектов, вызываемых на разных уровнях биологической организации при воздействии стресс-факторов [2].

Fig. 2. Diagram of the effects caused at different levels of biological organization under the influence of stress factors [2].

химический, физиологический и гистологический [3–5]. Биомаркирование от других биодиагностических методов (биотестирования и биоиндикации) отличает оперативность ответа от нескольких минут до нескольких дней, высокая чувствительность и достаточная специфичность, то есть возможность зарегистрировать происходящие в биологической системе изменения на ранних этапах действия факторов при их низкой интенсивности и при этом идентифицировать природу стресс-фактора. В отношении ксенобиотиков (соединений, имеющих чужеродное для организма происхождение) — это выявление их действия на организм при хронических экспозициях в сублетальных дозах, когда еще други-

ми методами это воздействие зарегистрировать не представляется возможным, и установление природы действующего вещества (тяжелые металлы, фосфорорганические пестициды, хлорорганические соединения, полициклические ароматические углеводороды и т. д.). Однако биолого-экологическая значимость ответа биомаркеров не столь очевидна [2, 5].

Биомаркер, сокращенное от биологический маркер — термин, обозначающий измеряемый параметр или событие (процесс, явление), происходящее в биологической системе или биологическом образце на суборганизменном и организменном уровнях организации (молекула, клетка, ткань, физиологическая система, организм).

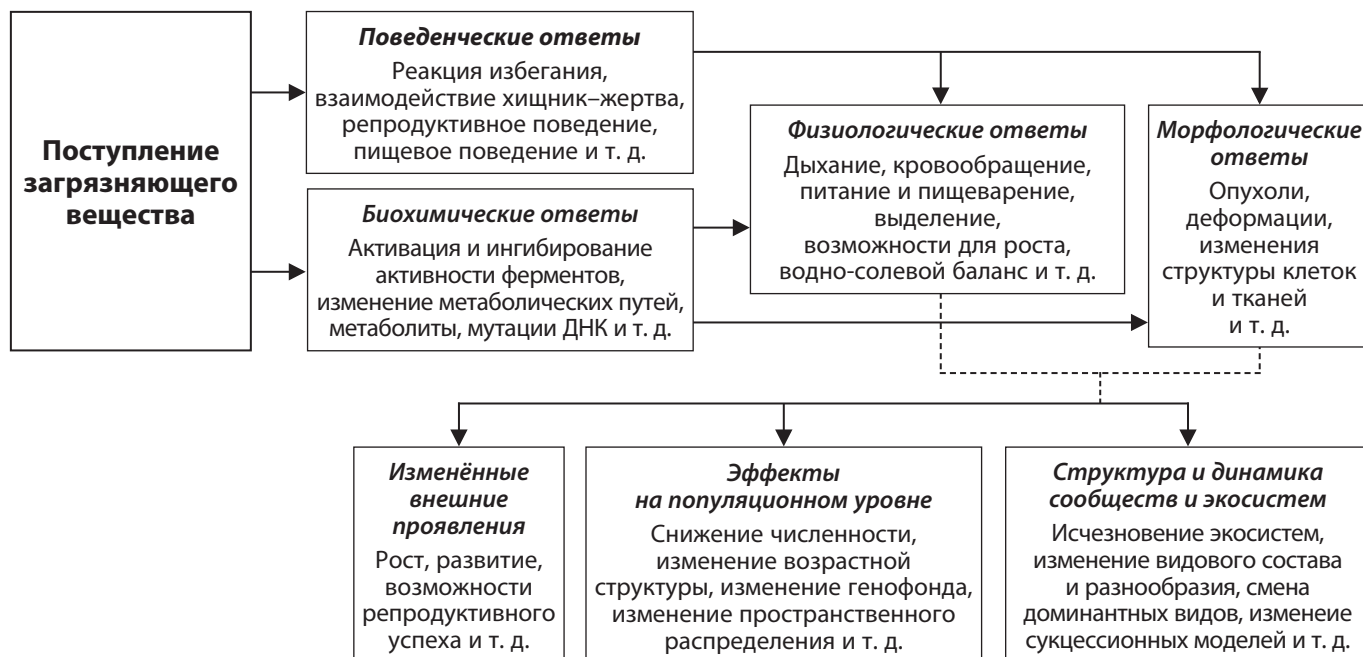


Рис. 3. Блок-схема эффектов, которые может вызывать на разных уровнях биологической организации воздействие загрязняющих веществ (модифицировано: Sheehan, 1984; цит. по [2]).

Fig. 3. Diagram of the effects that can be caused at different levels of biological organization by the impact of pollutants (modified from: Sheehan, 1984, cited from [2]).

В водной токсикологии биомаркеры обычно используются как индикаторы состояния здоровья или риска проявления патологии (нарушения функции) гидробионтов, либо как индикаторы воздействия на организм химических загрязняющих веществ или ксенобиотиков.

Результаты, полученные на уровне организма, интерпретируются как отражение более общего состояния организма (выживаемость, рост, размножение) или состояния популяции, сообщества, экосистемы. Взаимосвязь эффектов на разных уровнях биологической организации, вызываемых действием загрязняющих веществ, представлена на схеме (рис. 3).

В настоящее время в качестве биомаркеров используют следующие параметры организма: молекулярно-генетические изменения на уровне ДНК; функциональные белки, включая ферменты; метаболиты; неспецифические иммунологические, гистопатологические и физиологические ответы. Однако не каждый показатель, отражающий изменения на суборганизменном уровне в ответ на действие стресс-фактора может претендовать на роль биомаркера. Более подробно критерии этого выбора описаны ранее [2, 5].

Биотестирование — оценка токсичности компонентов окружающей среды (воды, донных отложений, грунтов) и других сред по общим биологическим реакциям организма (выживаемость, размножение, рост, двигательная активность и т.п.) с использованием лабораторных культур тест-орга-

низмов разных экологических уровней (микроорганизмы, простейшие, одноклеточные водоросли, беспозвоночные, икра, мальки и взрослые рыбы).

Биотестирование обладает меньшей оперативностью ответа, чем биомаркирование (от нескольких часов до нескольких недель), но экологическая значимость на уровне основных биологических функций отдельной особи более очевидна: гибель организма, снижение репродуктивной способности вплоть до прекращения воспроизводства, нарушение роста, развития, различных типов поведения и т.д.

Биотестирование как метод исследования используют специалисты различных областей науки: в экотоксикологии — для анализа воды, донных отложений и почв, в гуманитарной и ветеринарной медицине — для исследования свойств внутренних сред высших организмов, в сельском хозяйстве — для экспресс-тестирования кормов на токсичность, в химии — для первичной оценки свойств новых веществ и т.д.

Характеристика и качество выполнения биотестирования зависят от выбора тест-организмов; условий проведения эксперимента; выбора тест-реакции и тест-критерия организмов. Выбор тест-организмов определяется их распространенностью, простотой содержания и культивирования в лабораторных условиях, чувствительностью к загрязняющим веществам.

Наиболее распространенными биологическими тест-объектами являются: микроорганизмы,

водоросли, растения, простейшие, планктонные рачки, насекомые и другие группы беспозвоночных, позвоночные животные, клеточные культуры. Рекомендуются для целей биотестирования группы гидробионтов и методы учета представлены в работе [2].

Методы биотестирования прочно закрепились в природоохранной практике, хотя перечень используемых аттестованных методик и тест-функций крайне ограничен. Необходима разработка новых методик биотестирования, ориентированных на оценку тест-функций ранней диагностики, предусматривающих использование современного оборудования.

Биоиндикация – оценка качества среды обитания и её отдельных характеристик по состоянию её биоты в природных условиях [7]. Биоиндикация загрязнения водной среды – это обнаружение и определение экологического значения антропогенных нагрузок на водный объект на основе определения качественных (видовой состав) и количественных (численность, биомасса, видовое разнообразие) характеристик различных биоценозов гидробионтов [8].

Биоиндикация характеризуется достаточно большим временем запаздывания ответных реакций надорганизменных биосистем (популяция, сообщество, экосистема) на действие стресс-фактора от нескольких недель до нескольких лет. В то же время она даёт возможность более адекватно и надёжно оценить изменения в экосистемах, произошедших за длительный промежуток времени действия негативного фактора, спрогнозировать варианты дальнейшего развития экосистем, то есть биоиндикация имеет высокую экологическую значимость.

При биоиндикации изменения биологических систем всегда зависят как от антропогенных, так и от природных факторов среды. Эти системы реагируют на воздействие среды в целом в соответствии со своей предрасположенностью, то есть такими внутренними факторами, как условия питания, возраст, генетически контролируемая устойчивость и уже присутствующие нарушения. Если различные антропогенные факторы вызывают одинаковые реакции, то говорят о неспецифической биоиндикации. Если же те или иные происходящие изменения можно связать только с одним фактором, то речь идет о специфической биоиндикации [9].

Биоиндикаторы (от гр. *bios* – жизнь и лат. *indico* – указываю, определяю) – организмы, присутствие, количество или особенности развития которых служат показателями естественных процессов, условий или антропогенных изменений среды [7].

В зависимости от типа ответной реакции биоиндикаторы подразделяют на чувствительные и кумулятивные. Чувствительные биоиндикаторы реагируют на стресс значительным отклонением от жизненных норм, а кумулятивные накапливают антропогенное воздействие, значительно превышающее нормальный уровень в природе, без видимых изменений. Индикаторная значимость определяется экологической толерантностью биологической системы. В пределах зоны толерантности организм способен поддерживать свой гомеостаз. Любой фактор, если он выходит за пределы «зоны комфорта» для данного организма, является стрессовым. В этом случае организм реагирует ответной реакцией различной интенсивности и длительности, проявление которой зависит от вида и является показателем его индикаторной ценности.

В качестве биоиндикаторов могут быть использованы представители всех «царств» живой природы и их сообщества [9].

Использование методов биоиндикации имеет ряд ограничений:

1. Необходимость привлечения специалистов-биологов различного, иногда достаточно узкого профиля.

2. В ряде случаев биоиндикаторы не способны обозначить основную причину изменений, происходящих в природных экосистемах при одновременном воздействии многих факторов.

3. До сих пор не разработаны универсальные шкалы измерения силы (уровня) ответных реакций биоиндикаторов, позволяющих определить порог предельно допустимого отклонения значений биологических параметров от нормы [10].

На данный момент биоиндикация наиболее широко используется для оценки состояния водных экосистем [11–17].

При этом разные методы системы комплексной оценки не конкурируют, а взаимно дополняют друг друга. Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения. Только их использование в комплексе может дать наиболее информативную картину экотоксикологического состояния водного объекта, атмосферы или участка суши.

Схема соотношения чувствительности и оперативности биологического ответа с его эколого-биологической значимостью для разных компонентов биодиагностики представлена на рис. 4.

На современном этапе развития системы биодиагностики и ее полноценного практического использования одной из важных задач является выявление причинно-следственных связей между ответами, полученными на разных уровнях

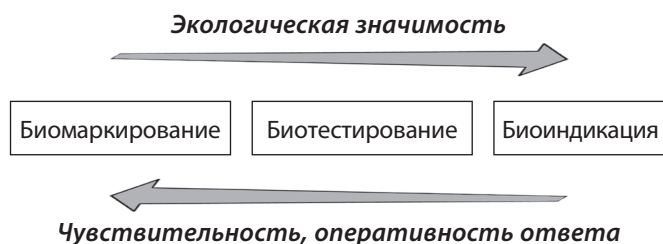


Рис. 4. Соотношение чувствительности и оперативности биологического ответа с его экологической значимостью для разных компонентов биодиагностики [2].

Fig. 4. Correlation of sensitivity and efficiency of biological response with its ecological significance for different components of biodiagnosis [2].

биологической организации: суборганизменном для биомаркеров, целого организма при биотестировании (выживаемость, рост, размножение) и надорганизменном при биоиндикации, характеризующем состояние популяции, сообщества или экосистемы. Вторая важная задача — установить зависимости доза (концентрация) — биологический эффект на всех уровнях биологической организации.

В связи с особенностями ответных реакций на разных уровнях организации жизни биомаркирование и биотестирование чаще используется в оперативном, а биоиндикация — в долгосрочном биомониторинге экологического состояния пресноводных объектов и антропогенного влияния на них. При этом применяются как активные, так и пассивные приемы биомониторинга.

В случае активного экологического биомониторинга тест-организмы из лабораторных культур, природных популяций или искусственные тест-системы в лабораторных условиях подвергают дозированным воздействиям природного или экспериментального фактора или заселяют их в тестируемую внешнюю среду *in situ*. У этих тест-организмов или тест-систем регистрируют биологические ответы и их динамику. При активном биомониторинге применяют такие методы биодиагностики, как биомаркирование и биотестирование. В случае пассивного экологического биомониторинга используются только тест-организмы из природных популяций, отловленные в естественных условиях при их постоянном контакте с факторами внешней среды, у них регистрируют биологические ответы и их динамику [2]. При этом наиболее подходящими биодиагностическими методами являются биомаркирование и биоиндикация. Используя биомаркеры, следует иметь в виду, что их ответы при пассивном и активном экологическом биомониторинге могут несколько отличаться. В первом случае тест-организмы, биомаркеры которых ис-

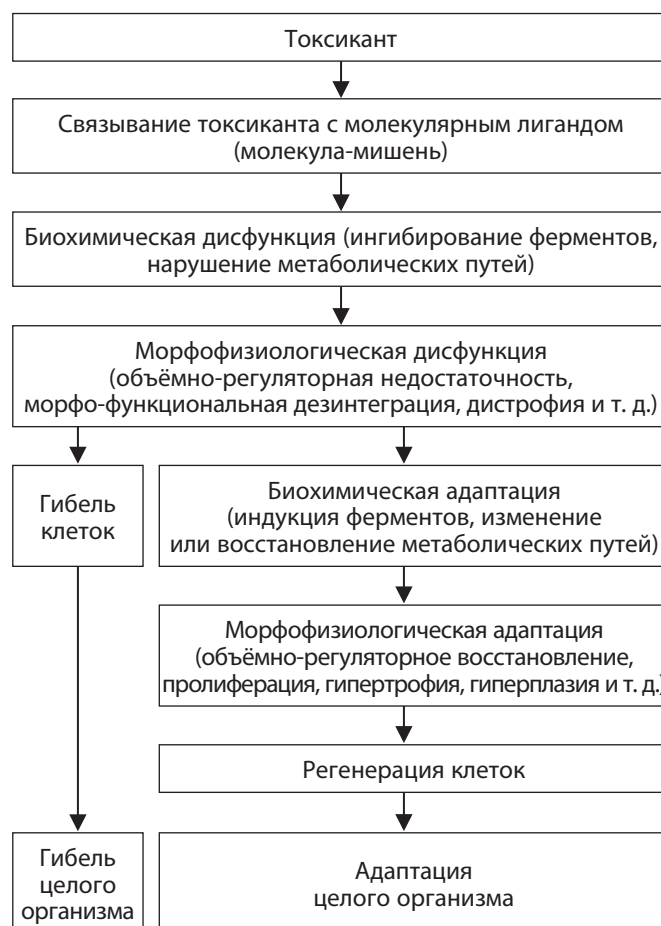


Рис. 5. Блок-схема двух вариантов интегрированного биохимического, морфофункционального и целостного ответа организма на действие токсиканта (модифицировано по: Hinton and Lauren, 1990, цит. по [2]).

Fig. 5. Diagram of two variants of the integrated biochemical, morphofunctional, and holistic responses of the organism to the action of a toxicant (modified from: Hinton and Lauren, 1990, cited from [2]).

пользуются, адаптированы к конкретным природным условиям, в том числе и к наличию в среде их обитания загрязняющих веществ, в то время как во втором случае они адаптированы к лабораторным условиям, характеризующимся стабильностью и отсутствием негативных факторов в среде их обитания.

На блок-схеме показаны последовательность изменений в организме и их возможные последствия для него при антропогенном воздействии на окружающую среду (рис. 5).

Заключение

Таким образом, биодиагностика, включающая биомаркирование, биотестирование и биоиндикацию, играет важную роль в современной комплексной системе оценки экологического состояния водных объектов и антропогенного влияния на них.

ЛИТЕРАТУРА

- Моисеенко Т.И. *Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты*. М.: Наука; 2009.
- Чуйко Г.М., Томила И.И., Холмогорова Н.В. *Комплексная оценка биоэкологических и химических систем: учебное пособие*. Ярославль: ЯрГУ; 2018.
- Adams S.M. (Ed). *Biological indicators of stress in fish*. American Fisheries Society Symposium 8. Bethesda: AFS; 1990.
- Лукьянова О.Н. *Молекулярные биомаркеры*. Владивосток: Издательство ДВГАЭУ; 2001.
- Чуйко Г.М. Биомаркеры в гидроэкологии: принципы, методы и методология, практика использования. В кн.: *Экологический мониторинг. Часть VIII. Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем: Учебное пособие*. Под ред. проф. Д.Б. Гелашвили, проф. Г.В. Шургановой. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета; 2014: 310–26.
- Sheehan P.J. Effects of individuals and populations. Effects of Pollutants at the Ecosystems Level. Eds.: P.J. Sheehan, D.R. Miller, G.C. Butler, Ph. Bourdeau. Chichester: Jon Wiley&Sons Ltd; 1984.
- Снакин В.В. *Экология и природопользование в России: энциклопедический словарь*. М.: Academia; 2008.
- Никаноров А.М., Иваник В.М. *Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши*. Ростов-на-Дону: ООО «Центр Печатных Технологий АртАртель»; 2014.
- Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений*. Под ред. О.П. Мелехова, Е.И. Егорова, Т.И. Евсеева и др. М.: Издательский центр «Академия»; 2007.
- Котегов Б.Г. Организация биологического мониторинга в зоне влияния производственного объекта: метод. Указания. Ижевск: Изд-во УдГУ; 2007.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем*. Под ред. Абакумова В.А. СПб: Гидрометеиздат; 1992.
- Баканов А.И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоёмов (обзор). *Биология внутренних вод*. 2000; 1: 68–82.
- Зинченко Т.Д., Шитиков В.К., Головатюк Л.В., Номоконова В.И., Попченко В.И., Абросимова Э.В. Экосистемный подход к проблеме биоиндикации рек бассейна средней и нижней Волги. *Астраханский вестник экологического образования*. 2014; 1(27): 58–67.
- Семенченко В.П. *Принципы и системы биоиндикации текучих вод*. Минск: Орех; 2004.
- Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. *Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения*. Кн. 1. М.: Наука; 2005.
- Крылов А.В. *Зоопланктон равнинных малых рек*. М.: Наука; 2008.
- Яныгина Л.В. *Донные сообщества в оценке экологического состояния малой реки Издревей*. Известия АО РГО: 2017; 4 (47): 93–100.

REFERENCES

- Moiseenko T.I. *Aquatic Ecotoxicology: Theoretical and Applied Aspects [Vodnaya ekotoksikologiya: Teoreticheskie i prikladnye aspekty]*. Moscow: 2009; Nauka. (in Russian)
- Chuiiko G.M., Tomilina I.I., Kholmogorova N.V. *Comprehensive assessment of bioecological and chemical systems: Tutorial. [Kompleksnaya otsenka bioekologicheskikh i khimicheskikh sistem: uchebnoe posobie]*. Yaroslavl: YarGU; 2018. (in Russian)
- Adams S.M. (Ed). *Biological indicators of stress in fish*. American Fisheries Society Symposium 8. Bethesda: AFS; 1990.
- Lukyanova O.N. *Molecular biomarkers. [Molekulyarnye biomarkery]*. Vladivostok: Izd-vo DVGAUEU; 2001. (in Russian)
- Chuiiko G.M. Biomarkers in hydroecotoxicology: principles, methods and methodology, practice of use. In: *Ecological monitoring. Part VIII. Modern Problems of Monitoring Freshwater Ecosystems: Tutorial [Ekologicheskii monitoring. Chast' VIII. Sovremennye problemy monitoringa presnovodnykh ekosistem: Uchebnoe posobie]*. Pod red. prof. D.B. Gelashvili, prof. G.V. Shurganovoy. Nizhnyj Novgorod: 2014. 310–26. (in Russian)
- Sheehan P.J. Effects of individuals and populations. Effects of Pollutants at the Ecosystems Level. Eds.: P.J. Sheehan, D.R. Miller, G.C. Butler, Ph. Bourdeau. Chichester: Jon Wiley&Sons Ltd; 1984.
- Snakin V.V. *Ecology and nature management in Russia: an encyclopedic dictionary. [Ekologiya i prirodopol'zovanie v Rossii: entsiklopedicheskii slovar']*. Moscow: Academia; 2008. (in Russian)
- Nikanorov A.M., Ivanik V.M. *Dictionary-reference book on hydrochemistry and land water quality. [Slovar'-spravochnik po gidrokhimii i kachestvu vod суши.]*. Rostov-na-Donu: LLC «Tsentr Pechatnykh Tekhnologiy ArtArtel»; 2014. (in Russian)
- Melekhova O.P., Egorova E.I., Evseeva T.I. and others. *Biological control of the environment: bioindication and biotesting: textbook. allowance for students. higher textbook institutions. [Biologicheskii kontrol' okruzhayushchey sredy: bioindikatsiya i biotestirovanie: uchebnoe posobie]*. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiyaya»; 2007. (in Russian)
- Kotegov B.G. *Organization of biological monitoring in the zone of influence of a production facility: method. Instructions. [Organizatsiya biologicheskogo monitoringa v zone vliyaniya proizvodstvennogo ob'ekta: metod. ukazaniya.]* Izhevsk: Izd-vo UdGU; 2007. (in Russian)
- Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems. [Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem]*. Ed. Abakumov V.A. SPb: Gidrometeoizdat; 1992. (in Russian)
- Bakanov A.I. *The use of zoobenthos for monitoring freshwater reservoirs (review). Biologiya vnutrennikh vod*. 2000; 1: 68–82. (in Russian)
- Zinchenko T.D., Shitikov V.K., Golovatyuk L.V., Nomokonova V.I., Popchenko V.I., Abrosimova E.V. *Ecosystem approach to the bioindication problem of the rivers in the basin of the middle and lower Volga (review). Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2014; 1(27): 58–67. (in Russian)
- Seimenchenko V.P. *Principles and systems of bioindication of flowing waters. [Printsipy i sistemy bioindikatsii tekuchikh vod.]* Minsk: Orekh; 2004. (in Russian)
- Shitikov V.K., Rozenberg G.S. and Zinchenko T.D. *Quantitative Hydroecology: Methods, Criteria, Solutions. [Kolichestvennaya gidroekologiya: metody, kriterii, resheniya]*. Moscow: Nauka; 2005. (in Russian)
- Krylov A.V. *Zooplankton of lowland small rivers. [Zooplankton ravninnykh malykh rek]*. Moscow: 2008; Nauka. (in Russian)
- Yanygina L.V. *Benthic communities in assessment of ecological state of small Izdrevaya river. Izvestiya AO RGO*. 2017; 4(47): 93–100. (in Russian)

ОБ АВТОРАХ:

Чуйко Григорий Михайлович (Chuiiko Grigorii Mikhailovich), заведующий лабораторией физиологии и токсикологии водных животных ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина» Российской академии наук, доктор биол. наук, 152742, Ярославская область, п. Борок, Российская Федерация. E-mail: gchuiiko@ibiw.ru

Томила Ирина Ивановна (Tomilina Irina Ivanovna), ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии и токсикологии водных животных ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина» Российской академии наук, кандидат биологических наук, 152742, Ярославская область, п. Борок, Российская Федерация. E-mail: i_tomilina@mail.ru

Холмогорова Надежда Владимировна (Kholmogorova Nadezda Vladimirovna), доцент кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», кандидат биологических наук, 426034, Удмуртская Республика, г. Ижевск, Российская Федерация; доцент кафедры иктиологии и гидробиологии ФГАУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, Российская Федерация. E-mail: Nadjaholm@mail.ru

