

ОЦЕНКА ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ГИДРОБИОНТОВ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

*О. В. Никитин, Э. И. Насырова, Е. В. Перевозчикова, П. А. Андреев,
Д. Ю. Гизатуллин, В. З. Латыпова*
Казанский (Приволжский) федеральный университет, *olnova@mail.ru*

В статье представлены сведения о программно-аппаратном комплексе «Анализатор токсичности TrackTox», позволяющем осуществлять оценку двигательной активности гидробионтов при помощи технологии компьютерного зрения в условиях варьирования различных факторов эксперимента (температура, интенсивность освещения, проточность).

Ключевые слова: гидробионты, компьютерное зрение, поведение, двигательная активность, экологический фактор.

Мониторинг качества пресной воды и её потенциального загрязнения является неотъемлемой частью обеспечения здоровья человека, устойчивого экономического развития и прогнозирования воздействия загрязняющих веществ на водные экосистемы. Несмотря на значительный прогресс в технологиях автоматизированного отбора проб и непрерывного анализа физико-химических параметров воды, современные возможности для предупреждения в режиме реального времени всё ещё ограничены. Обычные системы химического анализа не подходят для оценки неизвестных смесей химических веществ, а также аддитивного и/или синергетического воздействия на биологические системы. С точки зрения нейротоксикологии острые воздействия химических агентов, которые воздействуют на нервную систему и могут попасть в воду случайно или в результате преднамеренного действия, могут быть надежно оценены только с использованием соответствующих функциональных биологических моделей [1]. Поэтому актуальной проблемой обеспечения экологической безопасности поверхностных вод является поиск и разработка «систем раннего биологического предупреждения» (*biologically early warning systems, BEWS*), предназначенных для оперативного выявления нештатных и чрезвычайных экологических ситуаций, как природного, так и антропогенного характера, представляющих опасность для экосистем и здоровья человека [2].

В разработке систем раннего биологического предупреждения применяется принцип приборного биотестирования, когда тест-организмы (биосенсоры) служат оперативными сигнализаторами возникновения экологически опасного уровня загрязнения воды, а регистрация функциональных показателей организмов осуществляется в автоматическом режиме аппаратной частью системы без участия оператора [3].

Перечень тест-реакций можно существенно расширить, если использовать дополнительные сведения по тест-объекту, основанные на его функцио-

нальных показателях, в том числе и поведенческие реакции. Это позволяет проводить оценку качества водной среды более оперативно и отслеживать более низкие концентрации токсикантов [4–6]. Для решения этой проблемы всё чаще начинают использовать технологию компьютерного зрения, которая позволяет осуществлять оценку плавательной активности более точно, с описанием дополнительных поведенческих особенностей (скорость плавания, подвижность, угловые движения, продолжительность пребывания в определенной зоне). Кроме того, использование компьютерного зрения позволяет производить непрерывные наблюдения в течение длительного времени.

Подобный подход позволяет выявлять опасную ситуацию в том случае, когда методы физико-химического мониторинга могут давать сбои. Это связано с тем, что традиционные подходы ориентированы на определение регламентированного ограниченного перечня показателей. В случае появления в воде ингредиентов, не учитываемых при стандартном контроле, повышается уровень экологических рисков, что может привести к причинению вреда как здоровью человека, так и экосистемам. Подходы биологического мониторинга, основанные на интегральной оценке качества среды, могут зарегистрировать опасность на самых ранних этапах, для самого широкого перечня загрязняющих соединений, обеспечивая таким образом возможность оперативной реакции на сложившуюся ситуацию и как следствие – обеспечивая экологическую безопасность поверхностных вод и понижая уровень экологического риска.

На кафедре прикладной экологии КФУ разработана система для слежения за поведенческими характеристиками гидробионтов – «Анализатор токсичности TrackTox» (рис. 1).



Рис. 1. Программно-аппаратный комплекс «Анализатор токсичности TrackTox»

Аппарат представляет из себя устройство, внутрь которого помещается кювета с гидробионтами (рис. 2). В аппарат встроена камера, которая передает запись на компьютер с установленной специализированной программой «TrackTox». Указанная программа способна распознавать тест-организмы на видео и сохранять координаты движения объектов на компьютере. Результа-

том анализа является табличный файл, доступный для последующей статистической обработки. В табличном виде представлена следующая информация по каждой точке: текущая временная позиция в видеофайле, координаты тест-объекта (по оси x и y), скорость, пройденное расстояние за единицу времени, высота плавания относительно дна кюветы, ориентация в пространстве, сложность траектории (фрактальная размерность) [7]. Программой предусмотрена возможность предварительной калибровки для конвертации расстояний, выраженных в пикселях изображения, в сантиметры.

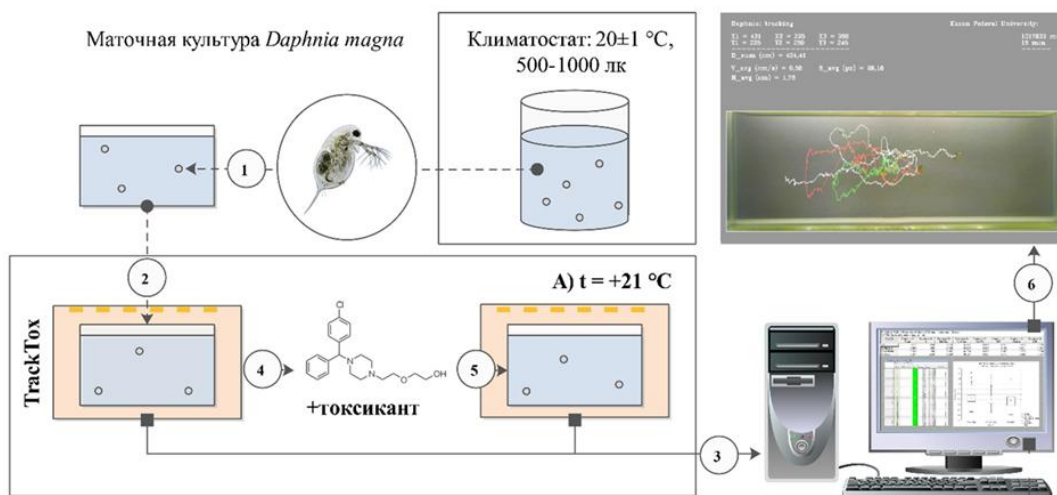


Рис. 2. Общая схема использования «Анализатора токсичности TrackTox»

Важно отметить, что анализатор «TrackTox» обладает техническими возможностями поддержания температуры и уровня освещенности внутри аппарата, тем самым создавая для тестируемых организмов условия среды, приближенные к культивируемым, и уменьшая воздействие температурных или световых раздражителей. В качестве устройств для поддержания температуры аппарат оснащен такими техническими элементами, как термоэлектрическая система охлаждения на элементе Пельтье, вентиляторы для отвода тепла и распределения охлажденного воздуха, алюминиевый радиатор, программируемый микропроцессорный контроллер температуры с цифровым индикаторным дисплеем. Выбор режима и интенсивности освещения возможен благодаря наличию светодиодного освещения (LED) различного спектрального класса (ультрафиолетовый, белый, ближний инфракрасный). Помимо оптимальных параметров, аппаратная часть анализатора может моделировать дополнительные условия проведения эксперимента. Например, можно варьировать температуру и уровень освещения [8]. Можно наблюдать за реакцией тест-объектов под воздействием УФ-излучения ($\lambda = 390\text{--}395\text{ нм}$) или в условиях отсутствия видимого света (0 лк). Возможность наблюдения за двигательной активностью не только в условиях наличия освещенности, но и при полном отсутствии видимого света позволяет конструировать полноценные системы биологического мониторинга качества воды, приближенные к есте-

ственному жизненному циклу гидробионтов, а также дополнительно анализировать проявления фототаксиса.

В качестве дополнительной приставки к анализатору была разработана установка для оценки плавательной активности в различных гидродинамических условиях, состоящая из проточной камеры, перистальтических насосов и соединяющих силиконовых шлангов, обеспечивающая устойчивый регулируемый водообмен в тестовой камере [9]. Применение динамической проточной системы в экспериментах может иметь несколько преимуществ: 1) проточность обеспечивает лучший контакт организма с исследуемой средой, обновление токсиканта позволяет поддерживать исследуемый токсический фактор на постоянном уровне; 2) наличие проточности позволяет конструировать системы непрерывного мониторинга за окружающей средой, в том числе и автономные; 3) проточность может имитировать условия лотических экосистем, что может дать возможность оценивать воздействие на реофильные организмы; 4) плавание в условиях течения требует повышенных энергетических затрат, следовательно дафнии могут оказаться в таких условиях более чувствительными к токсикантам, что может позволить разрабатывать более чувствительные токсикологические тесты.

Первоначально анализатор «TrackTox» был предназначен для наблюдения за планктонными беспозвоночными (представители родов *Daphnia*, *Ceriodaphnia*), однако развитие работ в этой области показало возможность использования системы и для наблюдения за другими гидробионтами, в частности за рыбами [10, 11]. Была создана биоэлектронная система контроля качества воды на основе этологических биомаркеров *Danio rerio*. Помимо ранее определявшихся характеристик (координаты тест-объекта; его ориентация в пространстве; средняя длина сегмента пути; общее проплываемое расстояние; затраченное время на расстояние и скорость плавания), в системе были реализованы новые возможности: определение группировки рыб относительно друг друга (агрегированность), возможность слежения за объектом в трехмерном пространстве, одновременное слежение за множеством объектов (6 и более). При совместном использовании системы с кайромонами возможно отслеживание отдельных социальных особенностей в поведении рыб, выражающихся в демонстрации агрессивного поведения и акинезии.

Внедрение в практику систем, основанных на поведенческих особенностях гидробионтов, может позволить добиться повышения объективности при проведении экологического мониторинга, информирования о состоянии окружающей среды в режиме реального времени, учета опасности неучтенных веществ. В целом возможные области применения подобных систем довольно обширны: производственный экологический контроль, экологический мониторинг, оценка экологического риска, контроль качества воды на водозаборах и очистных сооружениях, контроль качества воды в рыбоводных хозяйствах, токсикологические исследования объектов окружающей среды, оценка безопасности веществ и материалов, научные исследования, образовательная деятельность.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Библиографический список

1. Bownik A., Wlodkowic D. Advances in real-time monitoring of water quality using automated analysis of animal behaviour // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 789. Article No. 147796. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147796
2. Холодкевич С. В., Шаров А. Н., Кузнецова Т. В. Перспективы и проблемы использования биоэлектронных систем в мониторинге состояния экологической безопасности акваторий финского залива // *Региональная экология*. 2015. № 1 (36). С. 66–76.
3. Системы и технологии раннего биологического оповещения общей токсичности воды [Электронный ресурс]. – URL: http://ecocontour.ru/produkcija_2 (дата обращения: 01.11.2022).
4. Nikitin O. Aqueous medium toxicity assessment by *Daphnia magna* swimming activity change // *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8 (13). P. 74–78.
5. Bownik A. *Daphnia* swimming behaviour as a biomarker in toxicity assessment: A review // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 601–602. P. 194–205. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.199
6. К вопросу выбора тест-чувствительных гидробионтов для биотестирования воды в лабораторных, производственных и естественных условиях / С. А. Нефедова, А. А. Коровушкин, Д. Г. Минин, Л. Б. Зутова, И. А. Ипатов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2014. № 3. С. 14–20. doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-014-020
7. Nikitin O. V., Petrova V. M., Latypova V. Z. Bioassay of pyrethroid insecticide esfenvalerate using fractal analysis of *Daphnia magna* motion // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015. Vol. 6 (6). P. 1729–1736.
8. Effect of various temperature and light intensity regimes on *Daphnia magna* swimming behaviour / O. Nikitin, E. Nasyrova, A. Kalinina, K. Sadykova, V. Latypova // *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019 : Conference proceedings. Ecology and Environmental Protection, Albena*. 2019. Vol. 19. P. 229–236. doi: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.029
9. Гизатуллин Д. Ю., Никитин О. В. Плавательное поведение *Daphnia magna* в статических и проточных условиях // *Экология родного края: проблемы и пути их решения : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Книга 1. Киров : Вятский государственный университет, 2021. С. 233–238.*
10. Система биоэлектронной регистрации качества воды на основе поведенческих характеристик рыб / О. В. Никитин, Д. Д. Гребенщикова, А. О. Белов, Э. И. Насырова, В. З. Латыпова // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Книга 1. Киров : Вятский государственный университет, 2018. С. 87–92.*
11. Насырова Э. И., Никитин О. В., Латыпова В. З. Система биологического мониторинга для непрерывного контроля качества воды с использованием рыб как организмов-биосенсоров // *Химия и инженерная экология – XIX : сб. трудов междунар. науч. конф., посвященной 150-летию периодической таблицы химических элементов. Казань : ИП Сагиева А. Р., 2019. С. 234–237.*