



АПК ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ВОДНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФУЗОРИЙ *P. CAUDATUM*

Соколов А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия
asokolov@etu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для экспресс-оценки токсичности водных сред методом биотестирования с использованием *Paramecium Caudatum*. Основной задачей являлось создание системы, обеспечивающей регистрацию и анализ хемотаксической реакции группы тест-организмов при разных уровнях токсического воздействия. МЕТОДЫ. Аппаратная часть комплекса включает в себя камеру высокого разрешения, специальную плоскую фотометрическую кювету, светодиодную подсветку с регулируемой интенсивностью. Программное обеспечение использует алгоритмы компьютерного зрения (OpenCV) для трекинга движения инфузорий *P. Caudatum*, оценка токсичности на основе пространственно-временного распределения клеток. Эксперименты проводились с использованием раствора Лозины-Лозинского в качестве контроля и раствора медного купороса (CuSO_4) в концентрациях от 1 мг/л до 0.1 мг/л в качестве исследуемого раствора. РЕЗУЛЬТАТЫ. При 1 мг/л CuSO_4 95% клеток сохранили локализацию в нижней зоне кюветы (детальность), индекс токсичности соответствовал высокой степени опасности ($T > 0.70$). При 0.1 мг/л CuSO_4 наблюдалась миграция 70-75% популяции в верхнюю зону, аналогично контрольной пробе ($T < 0.40$). Система продемонстрировала погрешность $\leq 5\%$ и время анализа 30 минут. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный АПК позволяет точно определять токсичность сред с CuSO_4 , выявляя как критические (1 мг/л), так и субпороговые (0.1 мг/л) концентрации. Устойчивость метода к артефактам съемки подтверждает его надежность для экологического мониторинга.

Ключевые слова: биотестирование; *paramecium caudatum*; автоматизированный контроль токсичности; аппаратно-программный комплекс; хемотаксическая реакция; компьютерное зрение; экологический мониторинг.

Для цитирования: Соколов А. АПК для экспресс-оценки токсичности водных сред с использованием инфузорий *P. Caudatum* // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 25-37. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-25-37.

HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR RAPID TOXICITY ASSESSMENT OF AQUATIC ENVIRONMENTS USING *P. CAUDATUM* INFUSORIA

Sokolov A.

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin),
Saint Petersburg, Russia
asokolov@etu.ru

Abstract: THE PURPOSE. Development of a hardware-software complex (HSC) for rapid toxicity assessment of aquatic environments using *Paramecium caudatum* as a bioindicator. The primary goal was to create a system capable of registering and analyzing the chemotactic response of test organisms under varying levels of toxic exposure. METHODS. The hardware component includes a high-resolution camera, a specialized flat photometric cuvette, and adjustable LED lighting. The software utilizes computer vision algorithms (OpenCV) for tracking *P. caudatum* movement and assessing toxicity based on spatiotemporal cell distribution. Experiments were conducted using Lozina-Lozinsky solution as a control and copper sulfate (CuSO_4) solutions at concentrations

ranging from 1 mg/L to 0.1 mg/L as test samples. **RESULTS.** At 1 mg/L CuSO_4 , 95% of cells remained localized in the lower cuvette zone (lethality), with a toxicity index corresponding to high hazard ($T > 0.70$). At 0.1 mg/L CuSO_4 , 70-75% of the population migrated to the upper zone, similar to the control ($T < 0.40$). The system demonstrated $\leq 5\%$ error and a 30-minute analysis time. **CONCLUSION.** The developed HSC enables precise toxicity assessment of CuSO_4 -contaminated environments, detecting both critical (1 mg/L) and subthreshold (0.1 mg/L) concentrations. The method's robustness against imaging artifacts confirms its reliability for ecological monitoring.

Keywords: bioassay; *Paramecium caudatum*; automated toxicity control; hardware-software complex; chemotactic response; computer vision; environmental monitoring.

For citation: Sokolov A. Hardware-software system for rapid toxicity assessment of aquatic environments using *P. Caudatum* infusoria. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 25-37. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-25-37.

Введение (Introduction)

В условиях глобальных изменений и ежегодного увеличения антропогенной нагрузки на окружающую среду вопросы мониторинга и оценки качества природных ресурсов становятся критически важными для обеспечения устойчивого развития и сохранения экосистем [1]. Интенсификация промышленного производства, транспортной деятельности, нерациональное использование природных ресурсов и урбанизация приводят к значительному загрязнению атмосферы, водоемов и почв [2]. Это, в свою очередь, требует разработки современных и эффективных методов биотестирования для своевременного обнаружения и предотвращения негативных экологических последствий.

Биотестирование представляет собой совокупность методик и технических решений, используемых для оценки токсичности и биологической активности различных веществ с помощью живых организмов или их компонентов. Биотестирование, как метод оценки токсичности окружающей среды, основан на использовании живых тест-организмов, чьи поведенческие, физиологические и метаболические реакции служат индикаторами вредного воздействия химических веществ. Эти методы позволяют выявлять потенциальные экологические риски, связанные с воздействием химических веществ, загрязнителей и других факторов на окружающую среду [3].

Основные задачи биотестирования включают определение степени токсичности различных веществ, выявление их потенциального воздействия на разнообразные виды организмов, а также оценку долгосрочных экологических последствий загрязнения. В зависимости от поставленных целей исследования, биотестирование может проводиться с использованием широкого спектра тест-организмов, таких как бактерии, водоросли, инфузории, ракообразные и рыбы. Каждый из этих организмов обладает уникальной чувствительностью к различным загрязнителям, что позволяет получать комплексную и всестороннюю оценку экологического состояния.

Бактерии и ракообразные используются для оценки общей токсичности по приросту/убыли число организмов. Инфузории и другие виды одноклеточных чаще всего используются для исследования среды путем оценки изменения специфических двигательных реакций. Ракообразные и рыбы, в свою очередь, предоставляют информацию о потенциальных эффектах на более высоких уровнях биологической организации. Таким образом, использование различных тест-организмов позволяет создать детализированный экологический профиль, который учитывает множество факторов и обеспечивает более точное понимание состояния окружающей среды [4].

Традиционные методики биотестирования широко применяются для исследования токсичности как в лабораторных условиях, так и в полевых исследованиях. Однако в рамках экологического мониторинга существует ряд ограничений, связанных с нехваткой времени и ресурсов. К основным недостаткам этих методов можно отнести длительное время анализа, которое может достигать 48 часов, сложность подготовки и проведения анализа, а также необходимость использования специализированного оборудования, которое часто допустимо использовать только в лабораторных условиях. Это существенно ограничивает их применимость в полевых исследованиях. Кроме того, необходимость создания специфических условий содержания для тест-организмов дополнительно усложняет процесс анализа и требует значительных затрат труда и ресурсов.

Современные методы биотестирования, основанные на реакциях *Escherichia coli* и *Paramecium caudatum*, сталкиваются с проблемой неучтенных внешних факторов, способных искажать результаты анализа. Ранее влияние этих факторов на биолюминесценцию бактерий и хемотаксис инфузорий не изучалось, что ограничивает надежность методов оценки токсичности водных сред [5].

Настоящее исследование проводилось с использованием модельного токсиканта CuSO_4 , выбранный в соответствии с утвержденной методикой ФР.1.39.2015.19242 «Определения токсичности отходов производства и потребления экспресс – методом с применением прибора серии «Биотестер»» и не ставило целью определение влияния дополнительных факторов среды (рН, ХПК, нефтепродукты, аммоний и пр.) Влияние этих параметров планируется в рамках последующих этапов разработки.

Целью исследования является разработка методики и аппаратной реализации портативного устройства для контроля качества природной среды на основе таксических реакций инфузорий *Paramecium Caudatum*. Предлагаемая методика основана на цифровом анализе движения группы организмов, что позволяет количественно оценивать параметры их движения и формировать заключение о токсичности исследуемых сред. Использование современных технологий компьютерного зрения и автоматизация процессов анализа обеспечивают высокую точность и надежность результатов, а также возможность проведения исследований в полевых условиях.

Научная значимость исследования заключается в разработке нового метода цифрового анализа движения инфузорий с использованием современных технологий компьютерного зрения, что позволит регистрировать минимальные отклонения от нормальной тест-реакции клеток и повысить точность измерений.

Практическая значимость исследования заключается в создании компактного и мобильного устройства, обеспечивающего возможность проведения анализа в полевых условиях, что позволит сократить риск порчи образцов и повысить оперативность исследований. Обеспечение высокой точности и надежности анализа, включая возможность исследования мутных растворов без предварительного разбавления, что исключает искажения результатов.

Литературный обзор (Literature Review)

Несмотря на значительные достижения в области биотестирования, существующие методики и устройства имеют ряд недостатков, которые ограничивают их эффективность и применимость в современных условиях.

Применяемые в настоящее время методики биотестирования часто требуют длительного времени для проведения анализа, которое может достигать 48 часов. Такие методики основаны на измерении роста культур микроорганизмов или изменении их морфологических характеристик, требующих длительного инкубационного периода. Это существенно замедляет процесс получения результатов и затрудняет оперативное принятие решений в случае обнаружения опасных загрязняющих веществ [5].

Значительное число существующих методов биотестирования требует сложной и трудоемкой подготовки, включающей создание особых условий для тест-организмов и использование специализированного оборудования. Например, культивирование инфузорий *Tetrahymena*, требующее создания и поддержания определенных параметров питательной среды. Этот раствор обычно состоит из дистиллированной воды, глюкозы, бактериального пептона, дрожжевого экстракта и хлорида натрия. После приготовления питательного раствора необходимо обеспечить поддержание постоянного уровня рН и температуры. Этот процесс требует использования специального оборудования, такого как термостаты и рН-метры, для обеспечения стабильности условий содержания. Поддержание этих условий крайне важно для обеспечения надежности и воспроизводимости результатов биотестирования. При постоянном использовании процедуру приготовления питательного раствора и поддержания оптимальных условий следует повторять каждые 7-10 дней. Кроме того, культивация инфузорий требует регулярного мониторинга состояния культуры и своевременного обнаружения возможных отклонений от нормальных условий. Это включает в себя проверку чистоты культуры, предотвращение загрязнения и контроль за популяционной плотностью организмов. Все эти процедуры требуют высокой квалификации персонала и значительных затрат труда, что делает процесс биотестирования более сложным и ресурсоемким [6].

Описание существующих методов и предпосылки к разработке

Традиционно для количественной оценки распределения микроорганизмов в градиентах химического раздражителя применяются методы прямого подсчета клеток с помощью микроскопии и измерения оптической плотности [7]. Однако эти методы

обладают рядом ограничений, таких как высокая трудоемкость, невысокая точность и сложность автоматизации. Среди основных методов контроля характеристик движения тест-организмов можно выделить фотонную корреляционную спектроскопию, основанную на изменении частоты рассеянного от движущихся частиц излучения за счет эффекта Доплера, и оптическое гетеродинирование, использующее эффект интерференции волн от источника колебаний [8]. Эти методы позволяют более точно анализировать движение микроорганизмов, но также требуют сложного оборудования и специализированной подготовки.

Многие современные приборные методики биотестирования основаны на фотометрическом принципе, который позволяет определять концентрацию веществ в растворах путем измерения изменения их оптической плотности. В середине 1970-х годов в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» под руководством А. В. Пожарова были начаты исследования по разработке биотестовой аппаратуры для контроля токсичности водных сред, основанные на поведенческих реакциях инфузорий. В ходе этих исследований была обоснована концепция биотестовой аппаратуры как измерительного микробиологического преобразователя, который контролирует токсичность водных сред аналогично тестеру. Этот подход позволил значительно продвинуться в области биотестирования, предложив новые методы анализа, основанные на естественных реакциях живых организмов [9].

Однако такой подход имеет существенные ограничения, особенно при анализе мутных растворов. Например, при исследовании образцов с высоким содержанием взвешенных частиц результаты могут искажаться из-за рассеяния света, что снижает точность анализа. Взвешенные частицы могут поглощать и рассеивать свет, изменяя его интенсивность и спектральные характеристики, что влияет на точность фотометрических измерений. Разбавление исследуемых растворов может изменить их химический состав и свойства, что негативно сказывается на достоверности результатов. Это особенно важно при анализе проб, концентрация токсичных веществ в которых может быть снижена в процессе разбавления, что приведет к недооценке их воздействия на окружающую среду. Для минимизации данного эффекта в методике, использующей прибор «Биотестер 2», предлагается процедура разбавления исходного образца дистиллированной водой с последующим применением корректирующего коэффициента в расчетах [10].

Позже, для повышения точности детекции тест-организмов, был предложен метод контроля пространственно-временного распределения оптических характеристик взвеси инфузорий с использованием линейки фотоприемников. Этот метод, основанный на анализе импульсных сигналов, позволил определять концентрацию и динамику движения инфузорий, что значительно улучшило точность биотестирования водных сред. На основе данного метода был разработан и успешно апробирован функционирующий прототип устройства. Однако, несмотря на эффективность, такой подход имеет ряд ограничений: он не позволяет отделять подвижные частицы от микроорганизмов, что может приводить к искажению результатов измерений. Кроме того, контролируемая область значительно меньше общего объема кюветы, что ограничивает возможность полного наблюдения за изменениями, происходящими в исследуемой среде. Это особенно важно при изучении таких тест-реакций, как хемотаксис, гальванотаксис и летальность, где распределение микроорганизмов по объему кюветы может быть неравномерным.

При дальнейшем совершенствовании методик биотестирования была сформулирована методика пространственно-временного оценки оптических свойств взвеси инфузорий с помощью ПЗС-линейки. Эта методология основана на анализе светового потока через кювету, что позволяет оценить концентрацию и вертикальное распределение микроорганизмов с помощью оценки экстинкции. Для устранения недостатков ранее предложенной схемы была предложена новая оптическая схема, включающая цилиндрическую линзу, которая фокусировала весь световой поток, проходящий через кювету, на плоскость ПЗС-линейки. Такая конструкция позволила исключить зависимость от случайного попадания клеток в зону детекции и упростить математический аппарат. Несмотря на повышенную точность, обеспечиваемую данной методикой, важно признать ограничения, присущие этому подходу. Эти ограничения связаны с невозможностью дифференцировать сигналы, исходящие от подвижных частиц и микроорганизмов, а также с акцентом исключительно на вертикальном распределении, что не позволяет отразить трехмерную динамику популяции [11].

В рамках совершенствования методик биотестирования водных сред был разработан метод пространственно-временного контроля оптических характеристик взвеси инфузорий с применением ПЗС-линейки. Данный подход базируется на анализе светового потока, прошедшего через кювету, что обеспечивает определение

концентрации и вертикального распределения микроорганизмов посредством оценки экстинкции. Для того чтобы устранить недостатки предложенной ранее схемы была предложена оптическая схема с цилиндрической линзой, фокусирующей весь световой поток, прошедший через кювету, на плоскость ПЗС-линейки. Это позволило исключить зависимость от случайного попадания клеток в детектируемую зону и упростить математический аппарат. Несмотря на повышение точности, метод сохраняет ограничения: отсутствие дифференциации сигналов от подвижных частиц и микроорганизмов, а также фокус исключительно на вертикальном распределении, что не отражает трёхмерной динамики популяции. Для комплексного анализа требуется разработка подходов, учитывающих горизонтальную составляющую движения клеток и расширяющих контролируемую область, например, за счёт применения многомерных оптических систем или алгоритмов машинного обучения для обработки пространственно-временных данных.

Для устранения перечисленных выше сложностей было решено разработать метод контроля токсичности воды и водных вытяжек на основе анализа пространственно-временного распределения и динамики движения тест-организмов *Paramecium Caudatum* с использованием аппаратно-программного комплекса.

Материалы и методы (Materials and methods)

Разработанный аппаратный комплекс предназначен для регистрации и анализа пространственно-временного распределения тест-организмов в условиях переменной токсичности водных сред. Система включает следующие ключевые компоненты:

Цифровая камера – обеспечивает захват изображений в режиме реального времени.

Плоская кювета – формирует стабильную границу раздела между средами.

Светодиодная подсветка – гарантирует равномерное освещение пробы.

Микроконтроллер – управляет периферийными устройствами и передает данные.

Персональный компьютер – выполняет обработку видеопотока и анализ данных.

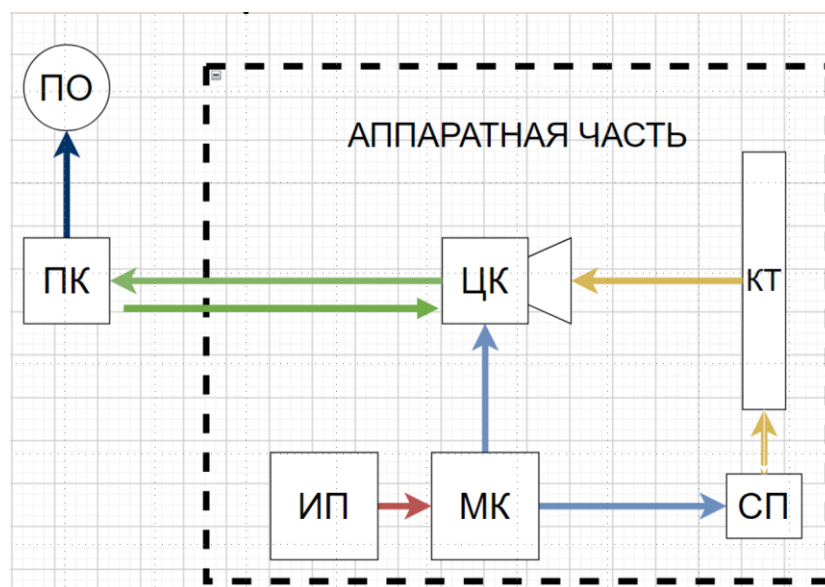


Рис. 1. Блок-схема устройства. ПО – программное обеспечение, ПК – персональный компьютер, ЦК – цифровая камера, КТ – плоская кювета, ИП – источник питания, МК – микроконтроллер, СП – светодиодная подсветка

Fig. 1. Block diagram of the device. ПО – software, ПК – personal computer, ЦК – digital camera, КТ – flat cuvette, ИП – power supply, МК – microcontroller, СП – illumination

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Архитектура системы направлена на устранение ограничений традиционных фотометрических методов, таких как зависимость от узкого светового пучка и необходимость сложной статистической обработки сигналов.

В качестве основного сенсора использована CMOS-камера со следующими характеристиками:

Разрешение: 2560x1440 пикселей.

Частота съемки: 60 кадров/с.

Объектив: макролинза с фокусным расстоянием 50 мм, обеспечивающая увеличение 3:1.

Камера фиксирует распределение инфузорий в плоской кювете толщиной 2 мм, что позволяет отслеживать как вертикальные, так и горизонтальные перемещения клеток. Замена ПЗС-линеек на цифровую камеру устранила необходимость использования сложной оптической схемы и расширила контролируемую область до 100% объема кюветы.

Для работы устройства используется разработанная ранее плоская кювета.

Кювета обеспечивает воспроизводимое формирование зон миграции клеток, что критично для оценки хемотаксиса.



Рис. 2. Плоская кювета

Fig. 2. Flat cuvette

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для минимизации шумов и артефактов изображения применена белая светодиодная подсветка с параметрами. Подсветка адаптирована для работы с мутными средами, что исключает необходимость предварительного разбавления проб.

Микроконтроллер

Управляющий модуль на базе ARM Cortex-M7 (частота 300 МГц) выполняет:

- Синхронизацию работы камеры и подсветки.
- Передачу данных на ПК через интерфейс USB 3.0.

Программное обеспечение

Было разработано программное обеспечение (ПО) для автоматизированной обработки видеопотока, регистрируемого цифровой камерой, и количественной оценки параметров движения тест-организмов. Архитектура ПО включает три основных модуля:

- Модуль захвата и предобработки видео – обеспечивает стабилизацию изображения и фильтрацию шумов.
- Модуль трекинга объектов – детектирует и отслеживает перемещение клеток.
- Аналитический модуль – рассчитывает скорость, пространственное распределение и классифицирует тест-реакции.

В ходе разработки были исследованы различные подходы к детекции объектов, включая применение фильтров по размеру и цвету. Алгоритм сегментации заднего фона, реализованный с использованием класса `cv2.BackgroundSubtractorMOG2`, позволил эффективно удалять статические элементы кадра и выделять движущиеся объекты. Для минимизации артефактов и повышения контрастности изображения применялась коррекция неравномерности подсветки с использованием метода плоского поля. Для фильтрации шумов использовалось Гауссово размытие (ядро 3x3) для подавления высокочастотных шумов и медианный фильтр (ядро 5x5) для устранения импульсных помех. Для возможности отслеживания перемещения объектов была проведена операция бинаризации изображения, с эмпирическим выбором порога.

Для отслеживания перемещений использовался алгоритм MOOSE (Minimum Output Sum of Squared Error). Детекция объектов осуществлялась путем выделения регионов интереса (ROI) на основе бинаризованного изображения. Для прогнозирования траекторий движений производилась корреляция между кадрами для определения

векторов движения. Впоследствии было принято решение отказаться от данного подхода ввиду значительных ошибок, возникающих при отслеживании большого количества объектов. Для фильтрации ложных срабатываний удалялись объекты с аномально высокой или низкой скоростью и размерами [12-15].

В связи с невозможностью постоянного отслеживания каждого отдельного организма для построения плотности распределения клеток кадр был разделен на горизонте и подсчитывалось количество клеток, которые попали в область интереса.

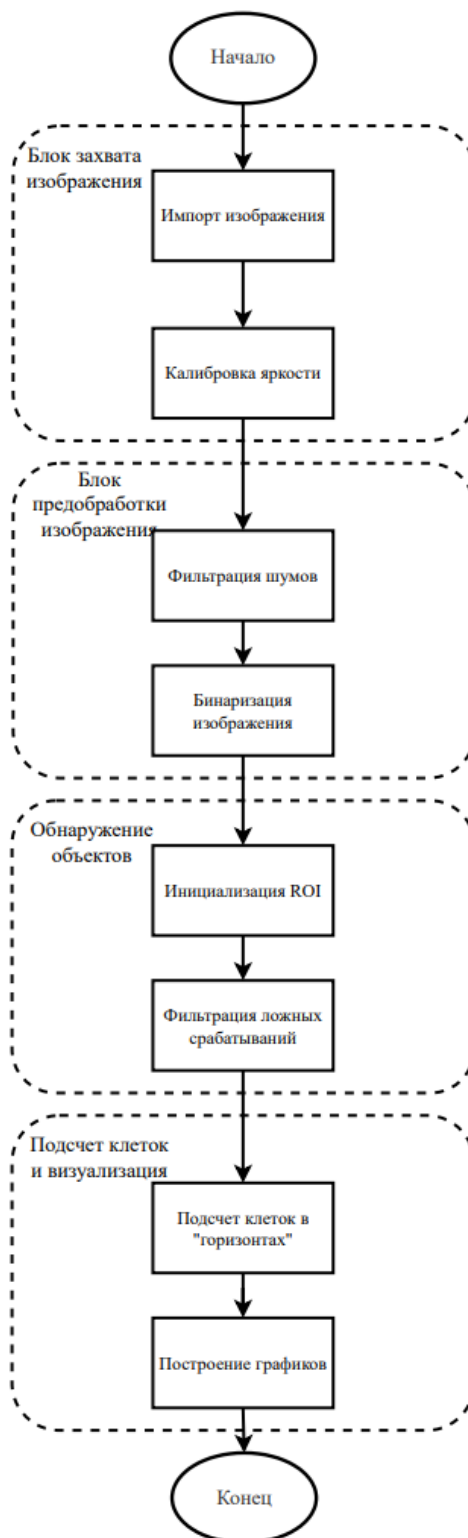


Рис. 3. Алгоритм работы программы

Fig. 3. Algorithm of the program operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанное программное обеспечение продемонстрирует устойчивость к частичному перекрытию тест-организмов, что повышает точность и надежность конечных

результатов. Оно характеризуется низкими требованиями к вычислительным ресурсам, что позволяет эффективно обрабатывать видеосигнал в реальном времени, обеспечивая оперативность и доступность решения в условиях ограниченных вычислительных мощностей.

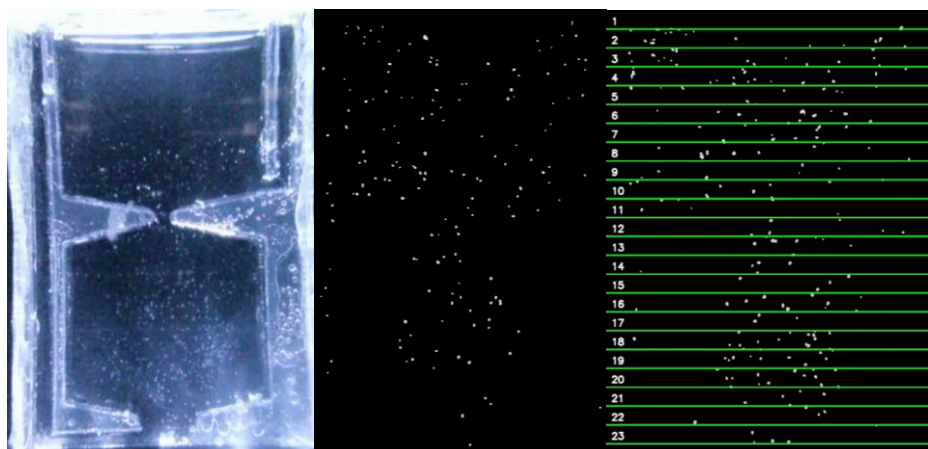


Рис. 4. Пример работы программы

Fig. 4. Example of program operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4, исходное изображение бинаризуется, инвертируется и затем кадр разбивается на горизонты и подсчитывается количество клеток в каждой области.

Перед проведением экспериментов взвесь инфузорий проверялась визуально под микроскопом для исключения признаков контаминации, чрезмерной плотности популяции и отсутствия двигательной активности. В соответствии с методикой ФР.1.39.2015.19242, культуры предварительно подкармливались за 3-4 дня до проведения исследования. Кроме того, при каждом эксперименте использовалась контрольная проба, в которой двигательная активность клеток дополнительно регистрировалась и оценивалась с помощью программных средств.

Результаты (Results)

Экспериментальное исследование пространственно-временного распределения клеток в условиях различного уровня воздействия.

Было проведено экспериментальное исследование, направленное на оценку возможности применения разработанной установки для анализа пространственно-временного распределения клеток микроорганизмов *Paramecium Caudatum* под воздействием различных концентраций модельного токсиканта. В ходе эксперимента изучалась динамика и поведение клеток в ответ на введение сульфата меди (II) (CuSO_4) в различных концентрациях, а также контрольного раствора Лозины-Лозинского (Л-Л). Известно, что раствор Л-Л является безопасной средой и клетки проявляют яркую реакцию отрицательного геотаксиса и перемещаются в раствор. При внесении токсиканта (CuSO_4) в концентрации 1 мг/л наблюдается реакция избегания, обусловленная активацией защитных механизмов микроорганизмов. Концентрация 0.1 мг/л считается пороговой, клетки должны демонстрировать поведение аналогичное, как при использовании раствора Л-Л.

Эксперимент проводился с использованием кюветы, заполненной взвесью микроорганизмов *Paramecium Caudatum*. Для фиксации изменений в поведении клеток использовалась видеокамера, подключенная к персональному компьютеру с установленной программой OBS для записи видео. В ходе эксперимента исследовались следующие растворы:

- Контрольный раствор Л-Л.
- Раствор сульфата меди (II) (CuSO_4) в концентрациях 1 мг/дм³ и 0,1 мг/дм³.

Исследования для каждого раствора проводились в трех повторениях.

Результаты эксперимента с контрольной пробой.

Для оценки пространственно-временного распределения клеток тест-организмов в контрольной пробе был подготовлен раствор Л-Л.

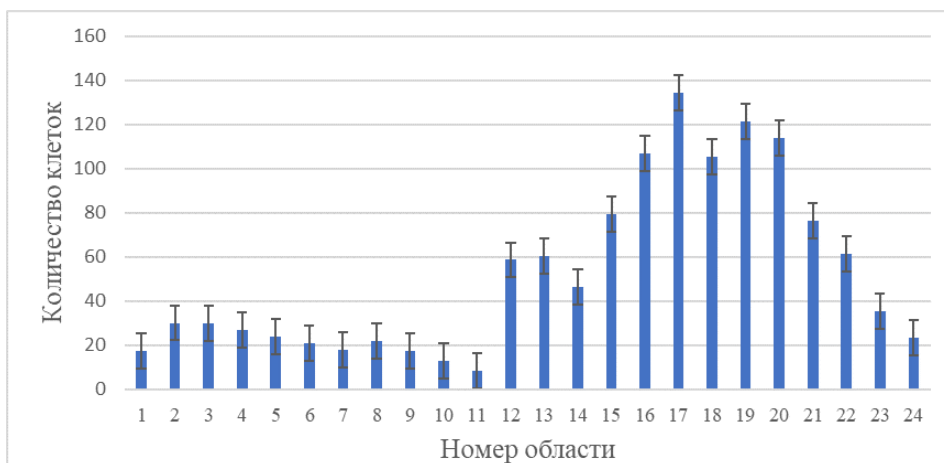


Рис. 5. Начальное распределение клеток (раствор Л-Л) Fig. 5. Initial cell distribution (L-L solution)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

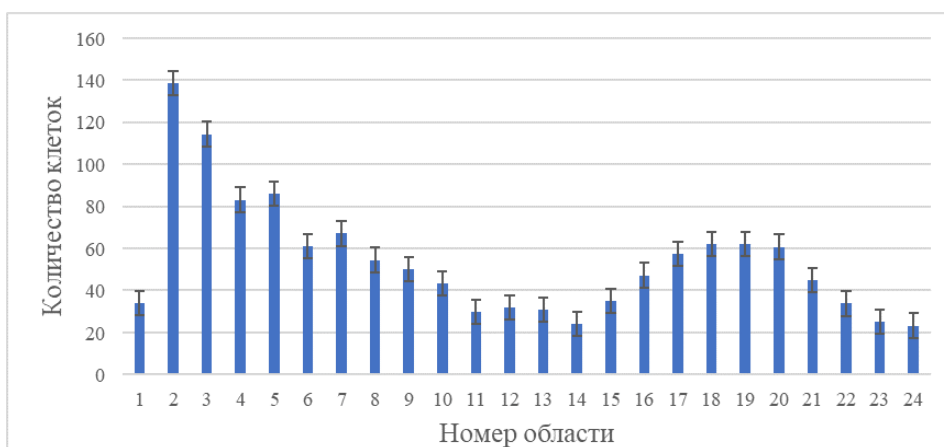


Рис. 6. Конечное распределение клеток (раствор Л-Л) Fig. 6. Final distribution of cells (L-L solution)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные результаты согласуются с данными методики биотестирования с применением прибора серии «Биотестер». Через 30 минут эксперимента наблюдается значимое увеличение концентрации в верхней области кюветы, что соответствует типичному поведению тест-организма в безопасных условиях.

Оценка тест-реакции микроорганизмов при низкой концентрации токсиканта.

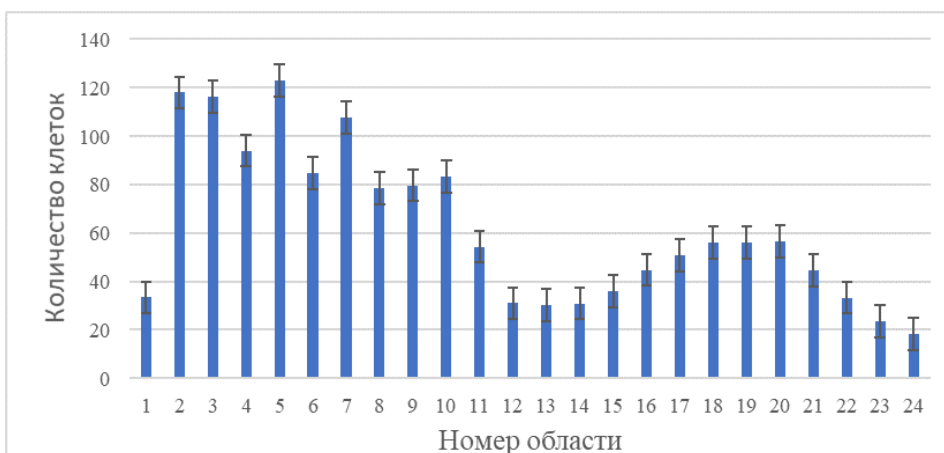


Рис. 7. Начальное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 0,1 мг/дм³) Fig. 7. Initial cell distribution (CuSO_4 solution, concentration 0.1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

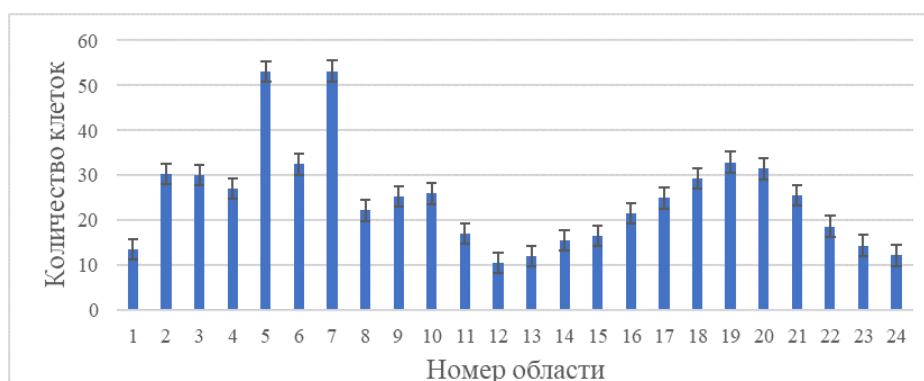


Рис. 8. Конечное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 0,1 мг/дм³) Fig. 8. Final distribution of cells (CuSO_4 solution, concentration 0.1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В ходе эксперимента было установлено, что клетки микроорганизмов мигрировали в исследуемый раствор, как и предполагалось ранее, однако последующее снижение общей концентрации микроорганизмов указывает на то, что даже при низких концентрациях сульфата меди (II) сохраняется его токсическое воздействие, что приводит к гибели клеток.

Оценка тест-реакции микроорганизмов при воздействии высокой концентрации токсиканта.

В ходе данного эксперимента оценивалось изменение пространственно-временного распределения микроорганизмов *Paramecium Caudatum* при воздействии опасной концентрации токсиканта в растворе.

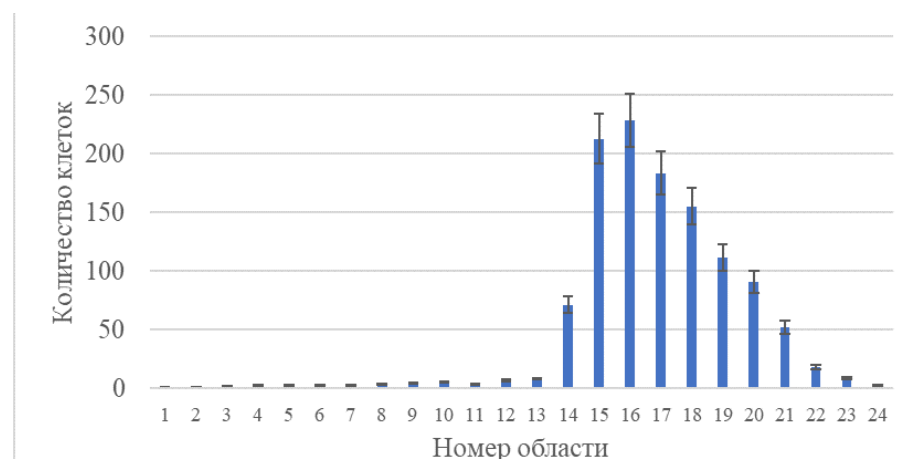


Рис. 9. Конечное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 1 мг/дм³) Fig. 9. Final distribution of cells (CuSO_4 solution, concentration 1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

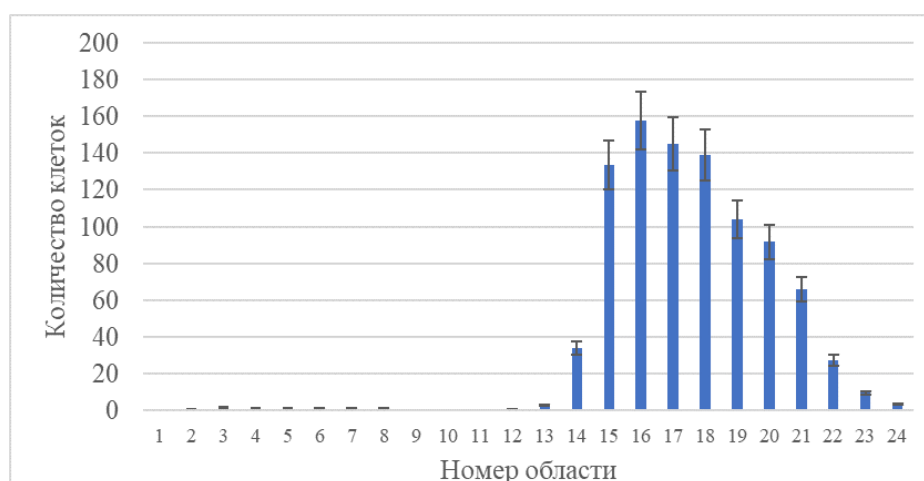


Рис. 10. Конечное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 1 мг/дм³) Fig. 10. Final distribution of cells (CuSO_4 solution, concentration 1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты эксперимента продемонстрировали, что микроорганизмы сохранили локализацию в безопасной зоне кюветы, избегая областей с повышенной концентрацией токсиканта.

Заключение (Conclusion)

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность разработанного аппаратно-программного комплекса для биотестирования водных сред. Установлены статистически значимые различия в поведении инфузорий при воздействии растворов различного уровня токсического воздействия:

– В контрольной пробе (раствор Л-Л) наблюдалась активная миграция $\geq 80\%$ популяции в верхнюю зону кюветы, что соответствует проявлению нормальной хемотаксической реакции.

– При внесении токсиканта (CuSO_4 , 1 мг/л) 90% клеток сохранили локализацию в исходной области, демонстрируя реакцию избегания, что свидетельствует о высокой чувствительности метода к наличию загрязнителей.

Полученные результаты подтверждают, что комплекс обеспечивает:

1. Высокую точность: Данный подход обеспечивает высокий уровень детекции клеток.

2. Экспресс-анализ: Время проведения эксперимента сокращено до 30 минут против 2-4 часов для традиционных методов.

3. Универсальность: Возможность работы с мутными средами без предварительной подготовки проб.

Практическая значимость исследования заключается в создании инструмента для оперативного мониторинга токсичности в полевых условиях, что актуально для задач экологического контроля и ликвидации последствий техногенных аварий.

Перспективы дальнейших исследований:

– Расширение базы тест-реакций за счет включения дополнительных биомаркеров (например, изменение частоты биения ресничек).

– Адаптация системы для работы с другими типами загрязнителей (нефтепродукты, пестициды).

Система демонстрирует устойчивость к шумам и артефактам видеосъемки, что подтверждается повторяемостью результатов в трёх независимых сериях экспериментов. Погрешность анализа составляет не более 5%, что сопоставимо с уровнем стандартных лабораторных методов биотестирования.

Разработанный метод открывает новые возможности для интеграции биотестирования в системы автоматизированного экологического мониторинга, сочетая высокую информативность с минимальными временными и ресурсными затратами.

Литература

1. United Nations Environment Programme. UNEP Annual Report 2023. 2023. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19 (дата обращения: 20.02.2025).
2. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/2021/> (дата обращения: 20.02.2025).
3. Семенова М.И., Смирнов А.В., Веженкова И.В., Кустов Т.В., Ковалевская А.С. Особенности пробоподготовки водных вытяжек компонентов солнечных панелей в целях биотестирования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – С. 211–220.
4. Олькова А.С. Актуальные направления развития методологии биотестирования водных сред // Вода и экология: проблемы и решения. – 2018. – № 2. – С. 40–49.
5. Семенова М.И., Смирнов А.В., Веженкова И.В., Кустов Т.В., Ковалевская А.С. Влияние растворённого кислорода в среде на индексы токсичности, получаемые различными методами биотестирования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – № 1. – С. 38–49.
6. Брежнева И.Н., Трифонова М.П. Биотестирование бурового шлама на экотоксичность // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 3.
7. Горгуленко В.В., Кириллов В.В., Ким Г.В., Ковешников М.И. Оценка качества донных отложений реки Аба методами биоиндикации и биотестирования // Вестник ННГУ. – 2011. – № 2–2.
8. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, талых и технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ФР.1.39.2015.19242.
9. Захаров И.С., Завгородний А.В. Биотестовые аппаратные средства и методы контроля

локомоций инфузорий // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – С. 205–209.

10. Олькова А.С. Процедура выбора методов биотестирования в условиях разных видов загрязнения // Трансформация экосистем. – 2022. – № 3 (17).

11. Завгородний А.В. Разработка метода и средств контроля пространственно-временного распределения оптических характеристик взвеси инфузорий для биотестирования водных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2008. – 18 с.

12. Ciarrone G., Luque Sánchez F., Tabik S., Troiano L., Tagliaferri R., Herrera F. Deep Learning in Video Multi-Object Tracking: A Survey // Neurocomputing. – 2020. – С. 61–88.

13. Esser P., Sutter E., Ommer B. A variational U-Net for conditional appearance and shape generation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 8857–8866.

14. Tian C., Xu Y., Fei L., Yan K. Deep Learning for Image Denoising: A Survey // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – № 384. – С. 61–88.

15. Лукашик Д.В. Анализ современных методов сегментации изображений // Экономика и качество систем связи. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 57–65.

Авторы публикации

Соколов Алексей – ассистент кафедры «Инженерной защиты окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7522-3354/>. *asokolov@etu.ru*

References

1. United Nations Environment Programme. UNEP Annual Report 2023. 2023. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19 (accessed: 20.02.2025).

2. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/2021/> (accessed: 20.02.2025).

3. Semenova M.I., Smirnov A.V., Vezhenkova I.V., Kustov T.V., Kovalevskaya A.S. Osobennosti probopodgotovki vodnykh vytyazhek komponentov solnechnykh paneley v tselyakh biotestirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2022. P. 211–220.

4. Ol'kova A.S. Aktual'nye napravleniya razvitiya metodologii biotestirovaniya vodnykh sred // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2018. № 2. P. 40–49.

5. Semenova M.I., Smirnov A.V., Vezhenkova I.V., Kustov T.V., Kovalevskaya A.S. Vliyaniye rastvorennogo kisloroda v srede na indeksy toksichnosti, poluchaemye razlichnymi metodami biotestirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2024. № 1. P. 38–49.

6. Brezhneva I.N., Trifonova M.P. Biotestirovaniye burovogo shlama na ekotoksichnost' // Problemy regional'noi ekologii. 2019. № 3.

7. Gorgulenko V.V., Kirillov V.V., Kim G.V., Koveshnikov M.I. Otsenka kachestva donnykh otlozhenii reki Aba metodami bioindikatsii i biotestirovaniya // Vestnik NNGU. 2011. № 2–2.

8. Metodika opredeleniya toksichnosti prob prirodnykh, pit'evykh, khozyaistvenno-pit'evykh, khozyaistvenno-bytovykh stochnykh, ochishchennykh stochnykh, talykh i tekhnologicheskikh vod ekspress-metodom s primeneniem pribora serii "Biotester". FR.1.39.2015.19242.

9. Zakharov I.S., Zavgordniy A.V. Biotestovye apparaturnye sredstva i metody kontrolya lokomotsii infuzorii // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2008. P. 205–209.

10. Ol'kova A.S. Protsedura vybora metodov biotestirovaniya v usloviyakh raznykh vidov zagryazneniya // Transformatsiya ekosistem. 2022. № 3 (17).

11. Zavgordniy A.V. Razrabotka metoda i sredstv kontrolya prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya opticheskikh kharakteristik vzvesi infuzorii dlya biotestirovaniya vodnykh sred: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Saint Petersburg, 2008. 18 p.

12. Ciarrone G., Luque Sánchez F., Tabik S., Troiano L., Tagliaferri R., Herrera F. Deep Learning in Video Multi-Object Tracking: A Survey // Neurocomputing. 2020. P. 61–88.

13. Esser P., Sutter E., Ommer B. A Variational U-Net for Conditional Appearance and Shape Generation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 8857–8866.

14. Tian C., Xu Y., Fei L., Yan K. Deep Learning for Image Denoising: A Survey // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. № 384. P. 61–88.

15. Lukashik D.V. Analiz sovremennykh metodov segmentatsii izobrazhenii // Ekonomika i kachestvo sistem svyazi. 2022. Vol. 24, № 2. P. 57–65.

Authors of the publication

Alexey Sokolov – St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” (named after Ulyanov-Lenin), Saint Petersburg, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7522-3354/>. asokolov@etu.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **12.05.2025 г.**

Отредактировано **02.08.2025 г.**

Принято **11.08.2025 г.**