

На правах рукописи

Ковалевская Алла Станиславовна

**МЕТОД И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТОКСИЧНОСТИ  
ВОДНЫХ СРЕД ПО РЕАКЦИИ ГАЛЬВАНОТАКСИСА ИНФУЗОРИЙ**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, доцент Захаров И.С.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Брусакова И.А.  
кандидат технических наук, доцент Алипов А.Н.

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_, 2006 г в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Юлдашев З.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Постоянное возрастание антропогенной нагрузки на окружающую среду, в том числе в виде увеличивающихся объемов и номенклатуры загрязняющих веществ, обуславливает повышение требований, предъявляемых к методам и средствам контроля качества природной среды. Одним из параметров качества окружающей среды является токсичность – основная характеристика вредности для живого.

Многообразные загрязняющие вещества, попадая в окружающую среду, могут претерпевать в ней различные превращения, усиливая или ослабляя при этом свое токсическое действие, которые невозможно выявить аналитическими методами. Это требует дополнения аналитических методов контроля биологическими.

Биологический контроль основан на единстве органического мира, что позволяет по количественно измеряемым параметрам тест-реакции лабораторных тест-организмов прогнозировать опасность вредных веществ на представителей других видов.

В соответствии с международными стандартами и российскими законами, необходимо несколько видов биотестов, так как различные реакции живого отражают воздействие различных вредных веществ.

Большой объем тестируемых проб предполагает переход к аппаратурным методам, которых на сегодняшний день очень мало.

Широкое распространение уже получили методы и средства контроля токсичности, основанные на использовании хемотаксиса (направленное перемещение под действием химических стимулов) инфузорий *P. Caudatum*. Это удобный для пользователя, хорошо изученный, безопасный тест-объект, отражающий реакцию важного звена пищевой цепи водоемов, что и определило выбор данного типа организмов в качестве *тест-объекта* для разработки нового метода контроля токсичности водных сред.

В последние годы внимание исследователей привлекла реакция гальванотаксиса, проявляющаяся в перемещении популяции организмов под действием электрического поля. Гальванотаксис инфузорий был открыт еще в конце XIX в. Тем не менее, прежде он не применялся в качестве *тест-реакции* для обнаружения токсичности водных сред.

В этом случае управляемое электрическое воздействие открывает новые возможности и может существенно повысить экспрессность биотестирования, т.е. уменьшить время проведения анализов по сравнению существующими методами.

Применение гальванотаксиса инфузорий для контроля токсичности водных сред сдерживается отсутствием аппаратных методов и средств контроля тест-реакции, а также недостаточным знанием особенности воздействия электрического поля на микроорганизмы и вредных веществ на реакцию гальванотаксиса.

Таким образом, актуальность проблемы, лежащей в основе данной диссертации, обусловлена необходимостью разработки нового экспрессного метода и средств регистрации популяционной реакции гальванотаксиса инфузорий для контроля токсичности водных сред.

**Целью диссертационной работы** является – исследование закономерностей гальванотаксиса инфузорий для разработки экспресс метода и системы контроля токсичности водных сред.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Исследовать влияние технических и биологических факторов на реакцию гальванотаксиса.
2. Разработать математическую модель тест-реакции гальванотаксиса на токсичность водной среды.
3. Разработать инструментальный метод и макет устройства для контроля токсичности водных сред по реакции гальванотаксиса инфузорий.
4. Разработать систему контроля токсичности водных сред на основе регистрации тест-реакции гальванотаксиса.
5. Экспериментально выявить информативные характеристики гальванотаксиса, отражающие воздействие токсичных водных сред на тест-реакцию.

**Объектами исследования** данной работы являются метод и средства биотестирования с использованием организмов типа простейших, предназначенных для применения в области экологического мониторинга.

**Предметом исследования** является информационное, инструментальное и методическое обеспечение системы, реализующее контроль токсичности водных сред по реакции гальванотаксиса инфузорий *P. Caudatum*.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались методы биотехнологии, физические и математические методы моделирования, методы математической статистики, фотометрии взвесей частиц.

**Новые научные результаты.** В процессе выполнения исследований автором получены следующие научные результаты:

- анализ основных закономерностей возникновения и протекания реакции гальванотаксиса показал, что для разработки метода и системы контроля токсичности водных сред необходимо учитывать режимы подготовки

инфузорий *P. Caudatum*, материалы электродов и диапазон токов и напряжений, подаваемых на них;

– разработана математическая модель тест-реакции гальванотаксиса, выявляющая ее информативные характеристики, и их зависимость от начальной концентрацией тест-объекта, разности потенциалов, показателей токсичности водной среды и параметров устройства контроля реакции;

– разработан инструментальный метод оценки токсичности водных сред, основанный на применении гальванотаксиса в качестве тест-реакции с учетом основных закономерностей возникновения и протекания данной реакции гальванотаксиса, который позволяет экспрессно оценивать качество природных вод;

– разработана система контроля тест-реакции гальванотаксиса, позволяющая исследовать ее аппаратурно-регистрируемые характеристики и их зависимость от наличия водной среде токсических веществ.

**Практическую ценность** работы представляют:

– рекомендации по формированию биотехнической системы для контроля токсичности водных сред с использованием тест-реакции гальванотаксиса инфузорий;

– макет устройства контроля для регистрации гальванотаксической реакции;

– информативные показатели тест-реакции гальванотаксиса;

– результаты экспериментальных исследований системы контроля гальванотаксиса.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. При обосновании применения гальванотаксиса в качестве тест-реакции для экспресс контроля токсичности водных сред необходимо учитывать основные эффекты, возникающие при взаимодействии электродов, среды и микроорганизмов, диапазон токов и напряжений, материалы электродов и режимы подготовки тест-объекта;

2. Математическая модель, связывающая характеристики гальванотаксического слоя с начальной концентрацией инфузорий, разностью потенциалов, показателями токсичности водной среды и параметрами устройства контроля реакции, описывает формирование тест-реакции в безвредной и токсичной среде;

3. Экспресс метод для контроля токсичности водных сред по реакции гальванотаксиса инфузорий, основанный на различиях в поведении инфузорий *P. Caudatum* в токсичных и нетоксичных средах под действием электрического поля с устройством контроля тест-реакции турбидиметрического типа.

**Достоверность результатов** обеспечена использованием при их получении надежных и проверенных теоретических представлений и экспериментальных методов и технологий; численными расчетами, проведенными на основании полученных соотношений; оценками величин и характера вытекающих из них зависимостей с использованием надежных экспериментальных данных.

**Внедрение результатов работы.** Результаты теоретических и прикладных исследований, полученных в диссертационной работе, использовались при выполнении НИР ПМЧС-2 (БФ-67) «Разработка методов анализа и принципов построения технических средств для исследования свойств пространств объектов с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций» рег. № 01200403706 (глава Разработка критериев прогнозирования ЧС на основе данных ГВ, спектрального биотестового контроля), в ГБ НИР ФПБЭИ за 2004 и 2005 гг.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях по Мягким вычислениям и измерениям – Санкт-Петербург, 2003, 2004, 2005, научно-практических конференциях «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» – Санкт-Петербург, 2003, 2004, 2005, на III и IV международных конгрессах "Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине", международной конференции "Региональная информатика" – Санкт-Петербург, 2004 и на Научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического Университета (ЛЭТИ) 2004, 2005 и 2006 годов.

**Публикации по работе.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них – 3 статьи, 9 работ – в материалах международных и российских научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 70 наименований, и одного приложения. Основная часть работы изложена на 136 страницах машинописного текста. Работа содержит 18 таблиц и 48 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** обоснована необходимость применения реакции гальванотаксиса в области охраны среды.

На основе обзора отечественных и иностранных источников выявлены группы вредных веществ, влияющих на возникновение и протекание реакции.

В качестве тест-объекта обоснован выбор инфузории-туфельки и обобщена литература, в которой описаны особенности гальванотаксиса инфузорий. Одной из них является то, что реакция гальванотаксиса проявляется только у живых организмов. Приведены особенности организации биотестового эксперимента на основе биотехнического подхода.

Проанализированы существующие математические модели гальванотаксиса клеток и цельных организмов. Сделан вывод об отсутствии математической модели гальванотаксиса инфузорий.

Проанализированы возможные эффекты, возникающие при взаимодействии электродов, среды и микроорганизмов и методы моделирования распределения характеристик электрического поля в среде.

Проведен обзор методов контроля гальванотаксиса организмов, проанализированы их достоинства и недостатки. Сделан вывод об отсутствии устройств для количественной оценки характеристик гальванотаксической реакции инфузорий *P. Caudatum*.

В результате проведенного анализа современного состояния разработок аппаратурных биотестовых методов, сделан вывод, что применение реакции гальванотаксиса для контроля острой токсичности водных сред сдерживается отсутствием удобных для пользователя метода и средств контроля реакции, а также сложностью ее регистрации.

Выявление существующих проблем разработки методов и средств контроля водных сред по реакции гальванотаксиса позволило сформулировать цели и задачи исследования.

**Во второй главе** приведены материалы по разработке структурной схемы биотехнической системы для оценки острой токсичности водных сред, где применен гальванотаксис в качестве тест-реакции и инфузории *P. Caudatum* в качестве тест-объекта.

Такая система (рис. 1) в своей основе содержит: пробу – П; биообъект, использующийся в качестве тест-объекта – ТО; БФТР – блок формирования тест-реакции, включающий гальванотаксическую ячейку – ГЯ (электроды, фотометрические кюветы и взвесь инфузорий) и источник электрических стимулов – ИЭС; УКР – устройства контроля реакции; ОИ – оператор-исследователь.

В результате анализа электрохимических процессов в ГЯ были определены диапазон напряжений ИЭС и виды материалов электродов.

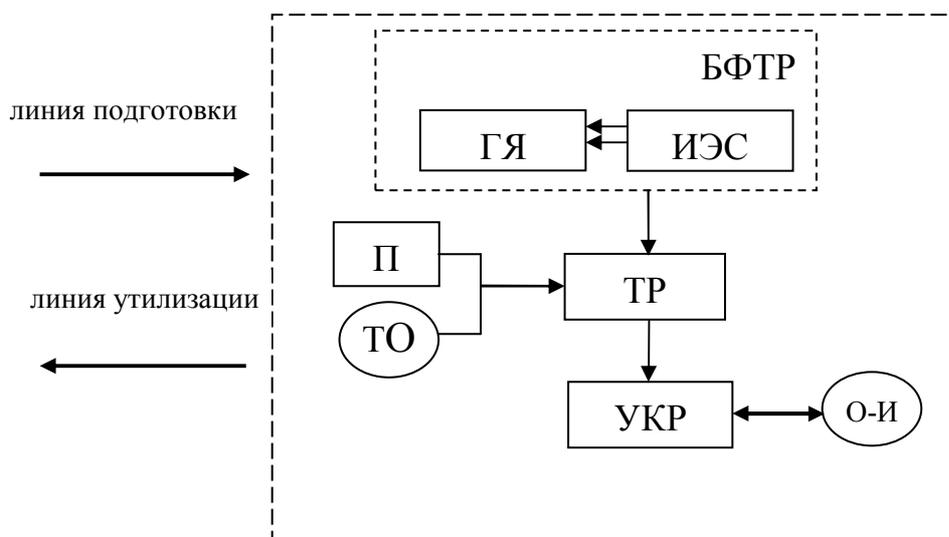


Рис. 1. Биотестовая биотехническая система.

Было установлено, что гальванотаксическая реакция исчезает при голодании инфузорий в течение 7 суток. Поэтому в дальнейших экспериментах использовалась культура в возрасте 4 суток.

Для выявления фактора, вызывающего гальванотаксис, были поставлены эксперименты по организации реакции гальванотаксиса в среде с разной проводимостью. В эксперименте применялись инфузории, живущие в пресной воде и инфузории адаптированные к воде с повышенной соленостью, проводимость которых составляла соответственно  $0,25 \pm 0,05$  и  $7,50 \pm 0,05$  мСм/см. К электродам подключались источник постоянного тока и источник постоянного напряжения.

При стабильном токе наблюдалось наличие реакции в пресных средах и ее отсутствие в средах с повышенной соленостью. При подаче стабилизированного напряжения реакция наблюдалась в обоих видах сред.

Эксперимент позволил сделать вывод, что электрическим стимулом для гальванотаксиса является разность потенциалов.

Визуальное наблюдение реакции гальванотаксиса позволяло фиксировать только конечную фазу гальванотаксиса. Для исследования процесса реакции был применен телевизионный метод.

Гальванотаксическая реакция связана с изменением распределения концентрации инфузорий в кювете, которую отражает распределение яркости изображения по длине кюветы. Задача измерения яркости была решена за счет деления обработки изображения на два этапа: предварительная обработка изображения при помощи стандартного пакета обработки изображений, подсчет яркости пикселей по длине изображения с помощью специализированной компьютерной программы. Далее по полученным данным были построены графики зависимости яркости от координаты (рис. 2)

Обработка изображения (с применением регрессионной зависимости) показала, что концентрация клеток без подачи напряжения распределена равномерно по длине кюветы, а при подаче разности потенциалов убывает экспоненциально относительно максимума, находящегося у катода.

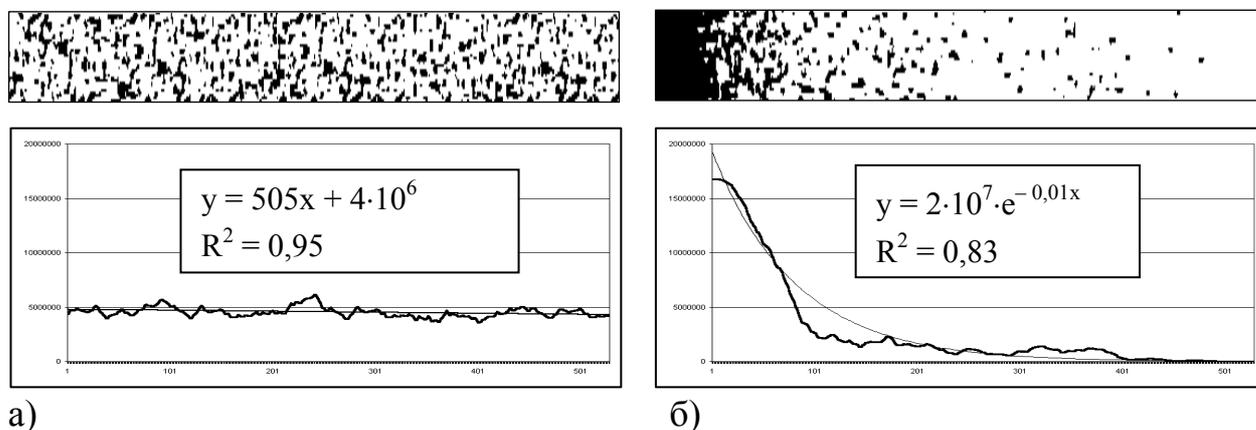


Рис. 2. Распределение инфузорий

а) без подачи электрических стимулов, б) при гальванотаксисе.

Затем было проведено исследование перераспределения клеток в кювете при переключении полярности. Было показано, что клетки образуют новое экспоненциальное распределение с максимумом направленным в сторону нового катода.

Для исследования популяционного движения инфузорий под воздействием электрического поля, было произведено моделирование распределения характеристик электрического поля программы ELCUT. Моделирование включало построение картины распределения параметров электрического поля в кювете с проводящей средой в программе ELCUT, проведение натуральных опытов с микроорганизмами и сопоставление этих распределений. Было показано, что инфузории всегда скапливаются в области отрицательного потенциала.

Материал второй главы был положен в основу разработки специализированных средств для контроля токсичности водных сред.

**Третья глава** посвящена разработке математической модели тест-реакции гальванотаксиса для контроля токсичности водных сред.

На основе собранной априорно информации о гальванотаксисе и экспериментальных данных был сделан вывод, что наиболее удобно регистрировать тест-реакцию методом формирования у катода концентрированного слоя инфузорий при подаче напряжения на электроды и перемещения гальванотаксического слоя при изменении полярности электродов на обратную.

Этот слой лучше различим на фоне среды, его легче контролировать оптическими способами.

Таким образом, тест-реакция включала две стадии: сбор организмов у катода и перемещение гальванотаксического слоя при перемене полярности.

При построении модели для первой стадии реакции было принято, что концентрация микроорганизмов одинакова по длине кюветы. При подаче напряжения со временем концентрация будет уменьшаться на долю инфузорий, переместившихся к катоду, образуя экспоненциальное распределение, которое наблюдалось экспериментально.

Показано, что его можно выразить в виде:

$$C(x) = C_{MAX}(\Delta\varphi) \exp(-\alpha \cdot \Delta\varphi \cdot x / x_{MAX}) \quad (1)$$

где  $C_{MAX}(\Delta\varphi)$  – максимальная концентрация инфузорий у катода при разности потенциалов  $\Delta\varphi$ ,  $x_{MAX}$  – максимальное расстояние между электродами;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции гальванотаксической ячейки.

Величина  $C_{MAX}$  и распределение инфузорий по кювете  $C(x)$ , были найдены интегрированием уравнения (1) от 0 до  $x_{MAX}$ , исходя из условия сохранения количества клеток в популяции с концентрацией  $C_0$  без подачи разности потенциалов и при действии разности потенциалов:

$$C_{MAX} = (C_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\varphi) / (1 - \exp(-\alpha \cdot \Delta\varphi)) \quad (2)$$

Для учета фактора токсичности при расчете максимальной концентрации  $C_{MAX\ TOX}$  инфузорий у катода введен коэффициент токсичности водной среды  $K_{TOX}$ , отражающий уменьшение количества способных к гальванотаксису клеток исходной концентрации и выражение (2) принимает следующий вид:

$$C_{MAX\ TOX} = K_{TOX} (C_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\varphi) / (1 - \exp(-\alpha \cdot \Delta\varphi)) \quad (3)$$

Показано, что при стремлении величины  $\Delta\varphi$  к нулю  $C(x)$  стремится к постоянной исходной концентрации  $C_0$ , а при подаче разности потенциалов концентрация клеток у катода будет нарастать согласно формуле (1).

При моделировании второй стадии гальванотаксиса было принято, что измерительный преобразователь ИП включает фотоприемник (ФП) с прямоугольной апертурой  $D \times H$ , где  $H$  – высота,  $D$  – ширина ФП (рис. 3), который находится на расстоянии  $x_F$  от катода. Источник излучения (ИИ) создает равномерную освещенность фоточувствительной площадки ФП. Инфузории моделировались рассеивающими частицами с поперечником рассеяния  $\sigma$ . Толщина рассеивающего слоя частиц была принята равной  $b$ .

Коэффициент пропускания ИП рассчитывался по формуле:

$$T = 1 - \frac{x}{D} (1 - T_S) \quad (4)$$

где  $T_S$  – пропускание слоя частиц находящихся между фотоприемником и источником излучения,  $D$  – ширина фотоприемника,  $x$  – ширина зоны перекрытия слоем фотоприемника.

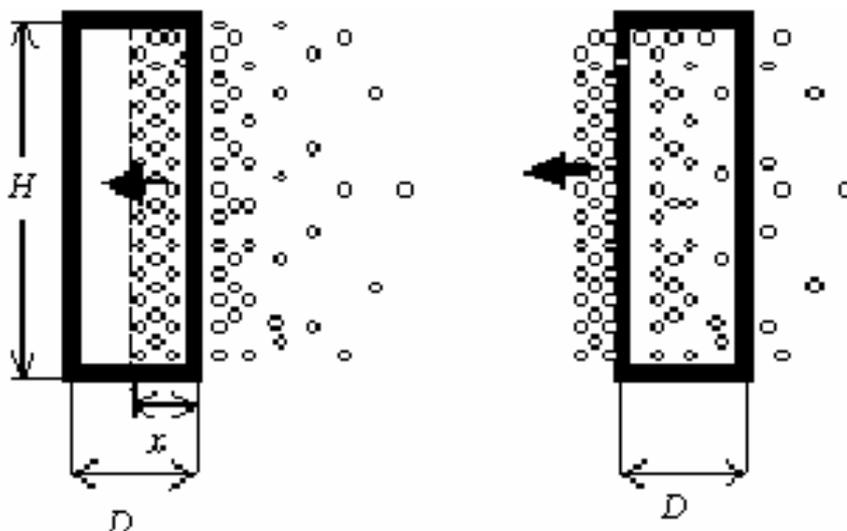


Рис. 3. Прохождение слоя инфузорий через апертуру фотоприемника.

В модели было принято, что скорость гальванотаксического слоя постоянна, что позволило перейти от зависимости по координате к зависимости по времени. Время перекрытия фотоприемника слоем частиц было принято равным  $\tau$ , время прохождения слоя через фотоприемник после заполнения –  $t_{MAX}$ .

Экспоненциальный характер распределения инфузорий был описан следующим образом:

$$C(t) = C_{MAX TOX} \exp(-\theta t) \quad (5)$$

где

$$\theta = \Delta\phi\alpha/t_{MAX}$$

На основании формул (4) и (5):

$$T = 1 - \frac{t}{\tau} \left[ 1 - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (1 - C(t) \sigma b) dt \right] \quad (6)$$

Была учтена остаточная концентрация инфузорий  $C_F$  в области фотоприемника после их концентрации у катода. Тогда сигнал образуется за счет разности  $\Delta C$  максимальной и остаточной концентрации.

Показано, что формула (6) примет вид в диапазоне времени  $t = 0 \dots \tau$

$$T = 1 - \frac{\Delta C \cdot \sigma \cdot b}{\theta \cdot \tau} (1 - \exp(-\theta \cdot t))$$

и в диапазоне времени  $t = \tau \dots t_{MAX}$  формула (6) преобразуется следующим образом:

$$T = 1 - \frac{\Delta C \cdot \sigma \cdot b}{\theta \cdot \tau} \cdot \frac{(1 - \exp(-\theta \cdot \tau))}{\exp(-\theta \cdot \tau)} \cdot \exp(-\theta \cdot t)$$

Исследование модели показывает, что при отсутствии разности потенциалов коэффициент пропускания практически не изменится. При подаче разности потенциалов сигнал гальванотаксиса принимает форму импульса с линейным спадом коэффициента пропускания и экспоненциальным подъемом. Амплитуда сигнала зависит от токсичности согласно формуле (3).

Таким образом, разработанная математическая модель гальванотаксической тест-реакции, позволяет описать формирование тест-реакции гальванотаксиса в безвредной и токсичной среде и связать характеристики гальванотаксического слоя с начальной концентрацией инфузорий, разностью потенциалов, показателями токсичности водной среды и параметрами устройства контроля реакции.

**В четвертой главе** диссертации приведены результаты экспериментальных данных по исследованию тест-реакции гальванотаксиса с устройством турбидиметрического типа.

Был разработан макет экспериментальной установки (рис. 4). При разработке системы контроля гальванотаксиса было проведено исследование спектра пропускания тест-объекта. Спектральный диапазон источника и приемника излучения был выбран после измерения коэффициентов пропускания на колориметре АБЛФ.

В видимом диапазоне коэффициент пропускания взвеси инфузорий меняется незначительно 0,87 – 0,91. Поэтому контроль концентрации инфузорий с помощью оптических измерительных преобразователей может быть осуществлен в широком диапазоне длин волн видимого излучения.

Сигнал с фотометра вводился через интерфейс в компьютер с частотой 48 отсчетов/сек. Напряжение на электродах составляло 2В, исходная концентрация клеток составляла  $1000 \pm 200$  клеток/мл.

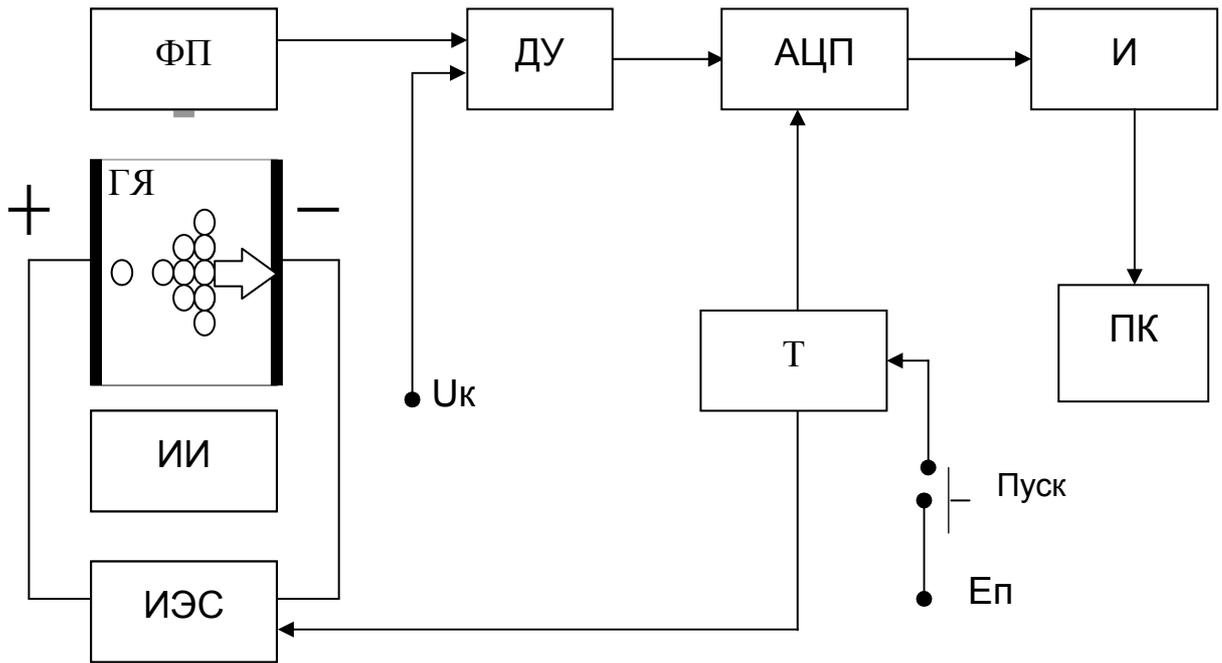


Рис. 4. Структурная схема макета экспериментальной установки, где ИИ – источник излучения, ГЯ – гальванотаксическая ячейка, ФП – фотоприемник, ИЭС – источник электрических стимулов, ДУ – дифференциальный усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь ( $R=8$  разрядов), И – последовательный интерфейс, Т – таймер, ПК – персональный компьютер.

Алгоритм проведения измерения с помощью макета экспериментальной установки представлен на рис. 5.

Он включает следующие блоки:

- Блок 1. Подача напряжения  $U = U_{\Gamma}$  на электроды, помещенные в кювету с инфузориями.
- Блок 2. Сбор инфузорий у катода в течение времени  $t = t_{\text{ПАУЗЫ}}$ .
- Блок 3. Изменение полярности напряжения на электродах  $U = -U_{\Gamma}$ .
- Блок 4. Включение системы регистрации прошедшего потока.
- Блок 5. Регистрация изменения коэффициента пропускания, вызванного перемещением слоя инфузорий к новому катоду,  $N_{\text{МАХ}}$  раз за 21 секунду.
- Блок 6. Сохранение результатов регистрации в виде массива данных.
- Блок 7. Завершение проведения измерений.

Данный алгоритм обеспечивает возможность регистрации процесса гальванотаксиса для дальнейшей обработки данных с помощью современных компьютерных приложений.

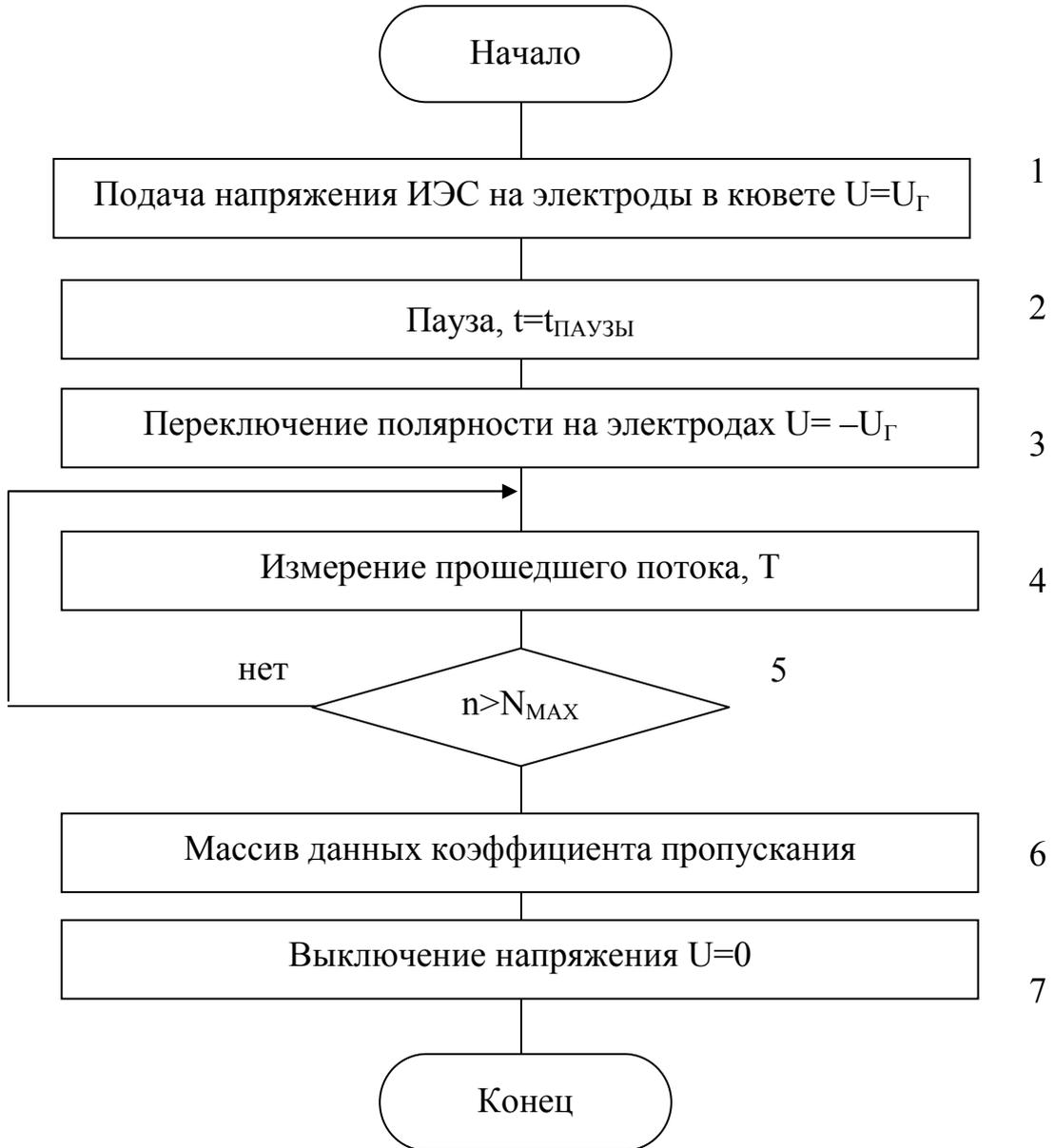


Рис. 5. Алгоритм проведения измерений.

С помощью макета экспериментальной установки впервые были получены сигналы от гальванотаксического слоя в безвредной среде.

Коэффициент корреляции между экспериментальными сигналами и модельными составлял  $r > 90\%$ . (рис. 6) при следующих параметрах модели:

$D = 0,1$  см,  $C_0 = 1500$  кл/мл,  $b = 1$  см,  $\sigma = 1.57 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>,  $U = 2$  В,  $\alpha = 6$ /в,  $\theta = 0,6$ /сек.

Графики модельного и экспериментального сигнала также сравнивались методами однофакторного дисперсионного анализа. Значение критерия Фишера составило  $F = 1,42$  при  $F$  критическом, равном 3,96.

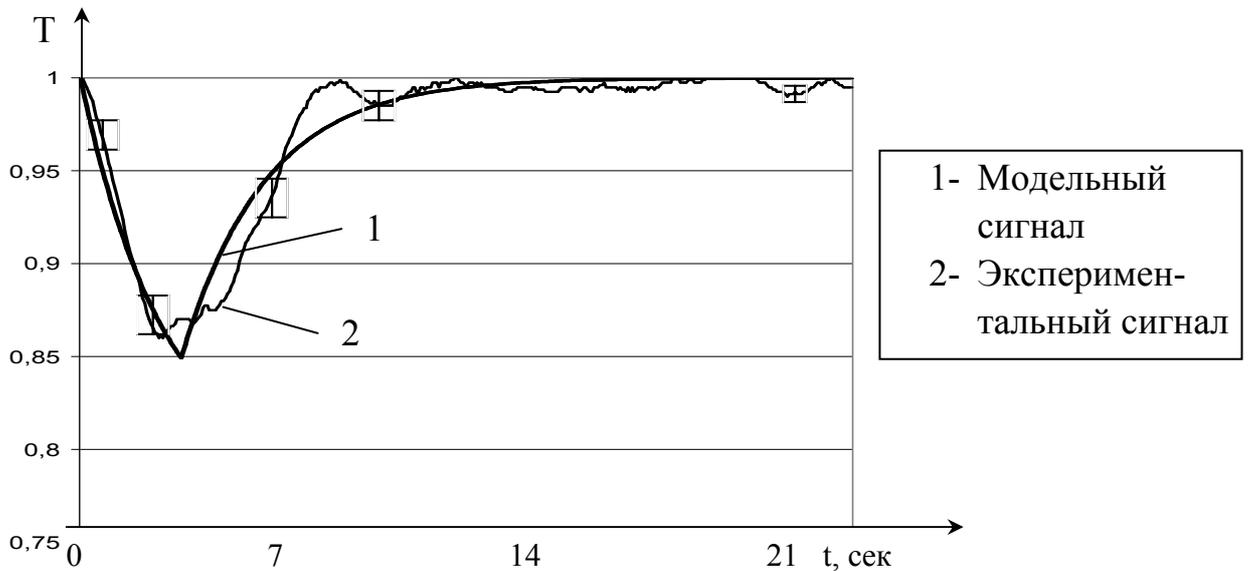


Рис. 6. Графики экспериментальных и модельных гальванотаксических сигналов.

Исследование фаз гальванотаксических сигналов методами регрессионного анализа показал, что первая фаза сигнала близка к линейной зависимости, а вторая к экспоненциальной.

При разработке метода определения токсичности необходимо учитывать, что появление ионов загрязняющих веществ изменяет процесс гальванотаксиса, так как они создают действующий фактор, который изменяет какой-либо физиологический процесс в организме, в том числе биение ресничек.

Метод контроля токсичности водных сред состоит из следующих этапов:

1. Подготовка материалов и принадлежностей: в вертикальную фотометрическую кювету (13x13x45) помещаются два электрода, которые имеют плоскую форму размером 10x10 мм.

2. Подготовка инфузорий осуществляется согласно стандартным методикам культивирования;

- объем взвеси исследуемых микроорганизмов составляет  $V = 0,9$  мл;

- концентрация инфузорий предварительно подсчитывается и составляет  $C=1000\pm 200$  клеток/мл;

- в опытах используется культура через 4 дня после последнего кормления микроорганизмов;

3. Подготовка контрольной (культуральная среда Лозины-Лозинского) и анализируемой пробы: в 2 кюветы со взвесью инфузорий добавляется соот-

ветственно контрольная и токсичная среда объемом  $V=0,1$  мл; выдержка микроорганизмов в контрольной и токсичной пробе в течение 5 мин.

4. Регистрация коэффициентов пропускания производится согласно разработанному *алгоритму проведения измерений* (рис. 5).

5. Выделение информативных характеристик токсичности из сформированных массивов значений коэффициентов пропускания для контрольной и анализируемой пробы; изменение реакции гальванотаксиса при воздействии токсичных веществ наиболее информативно отражает изменение амплитуды сигнала анализируемой пробы –  $I_{АП}$  по отношению к амплитуде сигнала контрольной пробы –  $I_K$ , (рис. 6).  $I_{АП}$  уменьшается при увеличении концентрации токсичных веществ.

6. Расчет коэффициента токсичности по формуле:

$$K_{ТОХ} = 1 - \frac{I_{АП}}{I_K} \quad (7)$$

Исследование разработанного метода определения токсичности водных сред включало серию предварительных опытов с модельными токсикантами  $CuSO_4$  и  $NiSO_4$ .

Результаты экспериментов по определению зависимости коэффициента токсичности от концентрации модельных токсикантов по формуле (7) представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Зависимость коэффициента токсичности от концентрации модельного токсиканта  $CuSO_4$

Концентрация $CuSO_4$ мг/л	0,01	0,05	0,10
Коэффициент токсичности	0,25±0,04	0,31±0,14	0,61±0,04

Таблица 2.

Зависимость коэффициента токсичности от концентрации модельного токсиканта  $NiSO_4$

Концентрация $NiSO_4$ мг/л	1	5	10
Коэффициент токсичности	0,35±0,04	0,39±0,03	0,67±0,09

Как показывают результаты проведенных исследований, при использовании нового метода и системы контроля токсичности водных сред по реакции гальванотаксиса инфузорий позволит повысить экспрессность

биотестирования и отразить воздействие токсичных водных сред на тест-реакцию. Это позволяет рекомендовать данный метод для применения при контроле токсичности природных вод.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Предложено использование гальванотаксиса в качестве тест-реакции для экспресс-контроля токсичности водных сред, что позволяет уменьшить время обнаружения вредных веществ.
2. Исследовано влияние технических и биологических факторов на реакцию гальванотаксиса.
3. Разработана математическая модель гальванотаксической тест-реакции, позволяющая описать формирование реакции в безвредной и токсичной среде.
4. Разработана система контроля тест-реакции гальванотаксиса включающая метод и устройство и выделены информативные характеристики гальванотаксического импульса, отражающие воздействие токсичных водных сред на тест-реакцию.
5. Разработан новый способ контроля токсичности водных сред на основе тест-реакции гальванотаксиса и разработанной биотехнической системы и проведены экспериментальные исследования, подтверждающие основные положения математической модели гальванотаксического сигнала.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Пожаров А.В., Захаров И.С., Ковалевская А.С., Голядкин С.В. Комплекс для исследования сигналов от взвесей инфузорий. Труды Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, SCM-2003. Санкт-Петербург, 25-27 июня 2003. – Т.2. – С. 200.
2. Захаров И.С., Пожаров А.В., Голядкин С.В., Ковалевская А.С. Влияние слабого электрического тока на популяцию микроорганизмов *P.Caudatum*. Труды III Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». Санкт-Петербург, 1-4 июля 2003. – С. 33.
3. Пожаров А.В., Захаров И.С., Ковалевская А.С. Перспективы применения гальванотаксиса для биотестирования. Труды научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». Санкт-Петербург, 2003. – С. 69-71.
4. Захаров И.С. Ковалевская А.С., Пожаров А.В. Применение мягких измерений при исследовании гальванотаксиса Труды Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, SCM-2004. Санкт-Петербург, 17-19 июня 2004. – Т.2. – С. 21.

5. Захаров И.С., Пожаров А.В., Ковалевская А.С., Страхов М.А. Оценка токсичности водных сред по реакции гальванотаксиса в неоднородных полях Труды научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». Санкт-Петербург, 24 ноября 2004. – С.84-86.
6. Пожаров А.В., Захаров И.С., Ковалевская А.С. Информативность экологического биотестирования с использованием гальванотаксиса инфузорий. Труды IX Санкт-Петербургской Междунар. конф. «Региональная информатика-2004», Санкт-Петербург, 22-24 июня 2004. – С.359-360.
7. Захаров И.С., Ковалевская А.С., Казанцева А.Г., Голядкин С.В. Измерение гальванотаксической реакции инфузорий с учетом ее самоорганизации. Труды Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, SCM-2005. Санкт-Петербург, 27-29 июня 2005. – Т.2. – С. 18-19.
8. Захаров И.С., Пожаров А.В., Голядкин С.В., Ковалевская А.С. Биотехническая биотестовая система с использованием реакции гальванотаксиса/ Известия СПбГЭТУ. – 2005. – Вып. 1: Биотехнические системы в медицине и экологии. – С. 44-48.
9. Захаров И.С., Ковалевская А.С. Перспективы применения гальванотаксиса в биотестировании и модель гальванотаксической реакции в токсичной среде/ Известия СПбГЭТУ. – 2005. – Вып. 2: Биотехнические системы в медицине и экологии. – С. 96-100.
10. Захаров И.С., Ковалевская А.С., Казанцева А.Г., Голядкин С.В. Модификация установки для контроля острой токсичности водных сред с использованием гальванотаксиса. Труды научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». Санкт-Петербург, 23 ноября 2005. – С.75-76.
11. Захаров И.С., Ковалевская А.С., Казанцева А.Г., Голядкин С.В. Аппаратурно-регистрируемые характеристики и математическая модель гальванотаксического сигнала / Известия СПбГЭТУ. – 2006. – Вып. 1: Биотехнические системы в медицине и экологии. – С. 52-57.
12. Захаров И.С., Ковалевская А. С., Казанцева А.Г., Петрова Д. И. Моделирование характеристик электрического поля при исследовании реакции гальванотаксиса. Труды IV Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». Санкт-Петербург, 4-7 июля 2006. – С. 96.