

Вишневецкая Нина Леонидовна – Пермский национальный исследовательский университет; e-mail: charry14@mail.ru; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29; тел.: 89082730120; кафедра безопасности жизнедеятельности; д.м.н.; профессор.

Черный Константин Анатольевич – e-mail: chernyy_k@mail.ru; тел.: 89024791211; кафедра безопасности жизнедеятельности; д.т.н.; профессор.

Плахова Лариса Викторовна – e-mail: larisa-2570@mail.ru; тел.: 89523364480; кафедра безопасности жизнедеятельности; к.б.н.; доцент.

Vishnevskaya Nina Leonidovna – Perm National Research University; e-mail: charry14@mail.ru; 29, Komsomolsky pr., Perm, 614990, Russia; phone: +79082730120; the department of life safety; dr. of med. sc.; professor.

Chernyi Konstantin Anatolievich – e-mail: chernyy_k@mail.ru; phone: +79024791211; the department of life safety; dr. of eng. sc.; professor.

Plakhova Larisa Viktorovna – e-mail: larisa-2570@mail.ru; phone: +79523364480; the department of life safety; cand. of biol. sc.; associate professor.

УДК 534

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-270-281

И.С. Захаров, А.Г. Казанцева, В.Ю. Вишневецкий**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ГАЛЬВАНОТАКСИСА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МИКРОБИОТЕСТА**

Изучается перспективный новый вид микробиотестирования – динамика гальванотаксиса инфузорий. Даются пояснения к этому эффекту, как к многократному перемещению популяции инфузорий при изменении полярности электродов. Приводятся материалы, показывающие актуальность и интерес к методу со стороны специалистов в области биотехнологии, токсикологии и юриспруденции. Ставится вопрос о необходимости и сложности математической модели этого метода. Рассматриваются модели, отражающие различные аспекты гальванотаксиса инфузорий, при этом охватывается диапазон научных исследований от XIX до XXI вв. Делается вывод о необходимости создания новой модели с учетом прежних, но имеющую специфику микробиотеста на основе эксперимента, с популяционным движением инфузорий. Эксперимент проводился на спектрофотометре СФ-56, и на держателе кювет для получения сигнала возле электрода. Сформулированы задачи создания модели, и сделан вывод о рекуррентной модели. Рассмотрены особенности рекуррентных процессов и параметры, позволяющие использовать их для выявления адекватности модели и эксперимента. Принципы рекуррентной модели положены в основу формул расчета количества частиц в зонах кювет, что дало возможность создать несколько разновидностей компьютерных программ, позволивших получить импульсную амплитудную последовательность, управляемую коэффициентами перехода частиц. При рекуррентном моделировании процесса динамики гальванотаксиса было доказано, что огибающая амплитуд сохраняет функцию при разных воздействиях: при модели контроля и токсичности, что адекватно функции, полученную в эксперименте. Также было проверено, что исходные распределения частиц не влияют на корреляцию функции огибающей, что характерно для рекуррентных моделей. Предложены подходы к проблеме токсичности по функции огибающей.

Гальванотаксис; динамика; инфузории; модели гальванотаксиса; рекуррентность; эксперимент; спектрофотометр; токсичность; импульсные функции; огибающие амплитуд.

I.S. Zakharov, A.G. Kazantseva, V.Yu. Vishnevetsky

STUDY OF THE GALVANOTAXIS DYNAMICS MATHEMATICAL MODEL FOR MICROBIOTEST DEVELOPMENT

A studied is a promising new kind of microbiotesting: the dynamics of galvanotaxis of infusorians. Explanations are given to this effect, as to the repeated movement of the population of infusorians when the polarity of the electrodes is changed. Materials showing the relevance and interest to the method by experts in the field of biotechnology, toxicology and law are presented. The question about the necessity and complexity of the mathematical model for this method is raised. Models reflecting various aspects of galvanotaxis of infusoria are considered, and the range of scientific studies from XIX to XXI centuries is covered. The conclusion is made that it is necessary to create a new model taking into account the former ones, but having a specific microbiota test based on the experiment, with the population movement of infusorians. The experiment has been carried out using a SF-56 spectrophotometer and a cuvette holder to obtain a signal near the electrode. The tasks of creating a model are formulated, and a conclusion is made about the recurrent model. The features of recurrent processes and parameters which allow using them to determine the adequacy of the model and experiment are considered. The principles of the recurrent model are used as the basis for the formulas for calculating the number of particles in the cuvette zones, which made it possible to create several types of computer programs which allowed obtaining a pulse amplitude sequence controlled by the particle transition coefficients. In recurrent simulation of the galvanotaxis dynamics process it was proved that the envelope of the amplitudes retains the function under different influences: with a control model and toxicity, which is adequate to the function obtained in the experiment. It was also verified that the initial particle distributions do not affect the correlation of the envelope function, which is typical for recurrent models. Approaches to the problem of toxicity according to the function of the envelope are proposed.

Galvanotaxis; dynamics; infusoria; galvanotaxis model; recurrence; experiment; spectrophotometer; toxicity; impulse functions; amplitude envelopes.

Актуальность биотестовой реакции гальванотаксиса инфузорий. Загрязнение отходов, стоков, воды питьевой и природной тяжелыми металлами и их соединениями, создают опасность токсичности среды, что требует дополнение аналитического контроля биологическим тестированием. Эффекты синергизма и антагонизма уже не позволяют сводить проблему токсичности проб водных сред к суммированию ПДК. Необходимо использовать интегральное восприятие вредных факторов организмами и при этом учитывать чувствительность, экспрессность, удобство статистического контроля, регистрации процесса и вместе с тем малую трудоемкость тестов и экономичность. Современная концепция микробiotестирования основана на принципе использования организмов малых размерах и малых объемов проб [1].

Этим свойствам отвечает новый метод биотестирования – динамика гальванотаксиса инфузорий, основанная на многократном перемещении популяции под действием электрического поля и токсичных факторов.

Возможность создания биотеста основано на эффекте передвижения инфузорий к катоду. Гальванотаксис основан на биологическом эффекте массового перемещения инфузорий-туфельек (*P. caudatum*) в кювете со слабым электролитом, где внутри по краям помещены электроды, подключенные к источнику постоянного напряжения (параметры электрода и источника обеспечивают жизнеспособность организмов [2]).

При многократной перемене полярности инфузории образуют из однородной взвеси слой и меняют направление.

Упомянутые инфузории двигаются к катоду. При этом организмы движутся, независимо находятся они в неопасной или в опасной зоне. Описанное биологическое явление обнаружил российский ученый в начале XX в. П.Г. Статкевич [3]. Это позволяет рассматривать сегодня с точки зрения экотоксикологии, данный процесс как аналог реакции доза–эффект.

Первые статьи на тему динамики гальванотаксиса были опубликованы И.С. Захаровым и А.Г. Казанцевой [4, 5]. Вместо одного результата контроля реакции популяции на токсичность пробы, в течение одного опыта получается целая выборка результатов. В исследовательских работах для регистрации был использован оптический эффект частиц в приближении геометрической оптики. Применение и исследование гальванотаксиса для биотестов продолжены в работах кафедры Д.О. Виноходова [6]. Были опубликованы статьи обзор о практическом использовании реакции нового эффекта в токсикологических исследованиях [7], статья об ингибиторах гальванотаксиса [8]. При этом биотесте достигалось получения 100–240 прогонов.

Поддержка метода высказана со стороны юристов: А.В. Волков, написал статью об экологическом контроле [9]. Все это показывало актуальность и интерес к новому методу.

Проведение эксперимента. Эксперимент для получения импульсов динамики гальванотаксиса проводился на созданных оптических устройствах [7–8].

В работах [5, 6] опыты выполнялись на спектрофотометре СФ-56, для эксперимента были разработаны держатели, с помощью которых фиксировались кюветы разной длины, которые позволяли получать сигналы от разных зон кюветы и генераторы для подачи напряжения необходимой полярности. Для биотехнологических опытов инфузории были выращены и подготовлены по методам, приведенных в [5]. На этих технологиях авторы статьи акцентируют свои последующие исследования модели.

Задачи для моделирования связаны с результатами экспериментов.

При опытах были получены результаты, показывающие функциональные зависимости между амплитудами сигналов при контрольных условиях и при воздействии токсичности (рис. 1).

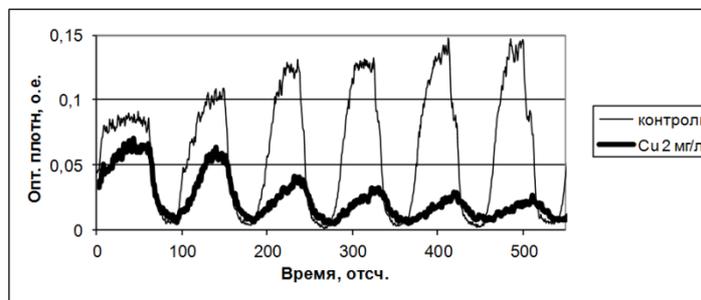
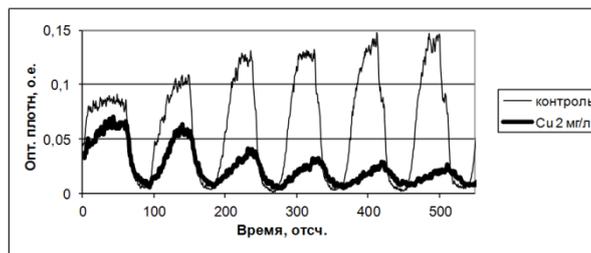


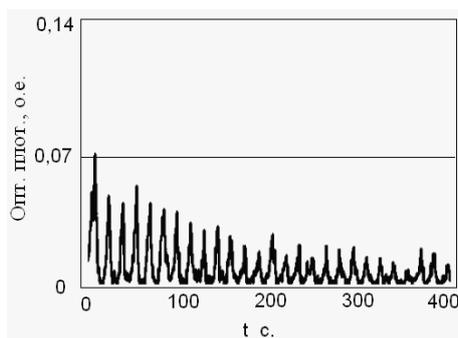
Рис. 1. Результаты экспериментов с применением динамики гальванотаксиса при воздействии контрольной и токсичной пробы [2]

На рисунке после выдержки инфузорий в нетоксичной среде (в контрольной пробе) отмечается направленное увеличение концентраций у катода и, соответственно, амплитуд импульсов вверх при воздействии контрольной пробы. Вниз — при воздействии токсиканта.

Таким же свойством обладают амплитуды нового микробиотеста на основе динамики гальванотаксиса, где за 400 с. образуется 27 амплитуд (рис. 2 и выявляется фаза переходного процесса и установившегося.



а



б

Рис. 2. а – динамика гальванотаксиса при выдержке инфузорий в безвредной среде; б в токсичной среде (с $CuSO_4$)

Эти явления надо было объяснить существующей или новой моделью.

Прежние модели. Научное исследование дает новое развитие, когда эксперимент опирается на математические модели, но выбрать их весьма сложно, так как биотесты относятся к биотехническим системам, где очень многое связано с моделями разного уровня сложности.

Эффект гальванотаксиса инфузорий был открыт в XIX в. М. Ферворном [10] и для описания движения инфузорий в электрическом поле К. Лудлофф выявил асимметрию движения ресничек – движителей инфузорий и сенсоров [11]. Позже ученые XX в. реализовали эту модель математическую [12], но для единичных объектов, не для популяции и тем более при воздействии токсиката. В начале XX в. попытку объяснить гальванотаксис сделал Б.И. Бируков [13], который сравнивал движение инфузорий одновременно как физиологическое, так и вызываемое электрофорезом, но последнее оказалось неподтвержденным. Т.Л. Джан. в 1960-е [14] создал модель, основанную на представлении клетки как кабельном проводнике [15], что объясняло только частично физику явления и не объясняло одностороннее движение инфузорий к катоду. Важную работу в области движения инфузорий при гальванотаксисе выполнил Н.В. Котов, исследовавший в докторской диссертации 2002 г. локомоции (перемещения организмов в пространстве) и влияющие факторы, в том числе ВЭП – внешнего электрического поля [16]. Н.В. Котовым изучается разворот, прямолинейное движение, хаотическое движение угол поворота, а также воздействие на движение макроэлементов, но локомоции не сводятся к суммированию движений популяции. Развитие стохастических методов [17], развитое К.В. Гардинером, побудила Ионидесаи др. в XXI в. предложить в 2004 г. описание движение инфузорий согласно модели Орнштейна-Уленбека, где получена функция движения частиц на электрод [18], но другие фазы процесса не затронуты моделью.

Математическая модель динамики гальванотаксиса. Биотестирование требует для математической модели не описание движения отдельных частиц, а популяции, поэтому разработчики биотестов опираются на прежние модели, но при этом должны моделировать реакции организмов на популяционном уровне.

А.В. Волков выразил основу биотестирования, как биологическое моделирование [9] – переноса знаний систем разного уровня от лабораторного к природному.

Математическое моделирование аппаратного микробиотеста – это еще один уровень, который требуется разработчикам для возможности создания биотеста, при этом аппаратного, т. е. опирающегося на средства контроля.

Для научного исследования процесса требуются математические модели, в которых должны быть увязаны тест-объекты, тест-реакции и средства неразрушающих контрольных методов, как аппаратных, так и программных.

Целью модели является создание математического обоснования нового аппаратного микробиотеста на основе динамики гальванотаксиса.

К основным задачам относятся следующие:

- ◆ объединение в одной модели–системе тест-объектов, тест-реакции, стимулы, которые исследуются как токсичные факторы, а также средства контроля – как общее целое, изменяющееся от каждого элемента системы;
- ◆ проигрывания тестовых сценариев, не проводя при этом множества экспериментов на организмах – тест-объектах, но учитывая природные эффекты и факторы;
- ◆ исследование форм сигналов, образующихся в результате биологических реакций в разных местах, где продвигается популяция от анода к катоду, регистрируемых средствами контроля;
- ◆ выявление путем сценариями наиболее устойчивых информативных параметров сигналов;
- ◆ изучение сценариями воздействие токсикантов разных видов на тест-объекты.

Теперь рассмотрим возможности решения сформулированных задач.

- ◆ Объединяющей основой и пронизывающей всю систему являются концентрации инфузорий, меняющиеся по мере развития процесса гальванотаксиса в разных частях кюветы. Концентрации инфузорий для моделирования процесса преобразуются в частицы с приближением геометрической оптики.
- ◆ Замещения природных явлений моделями широко распространились в разных областях науки, где признают биоэтику, например для исследования тканей человека используются фантомы [19].
- ◆ Форма импульсов зависит во многом от их последовательности.
- ◆ Амплитуда импульса и его фронты зависят от расположения в кювете, следует учесть, что импульсы в центре обладают свойством нестационарности, поэтому важно их расположение в кювете, что определяет, импульсы возле электродов – должны отличаться от прикатодной зоны.

Обоснование рекуррентности модели. Очень важная проблема разработки биотеста – устойчивость результатов тест-реакции при разных начальных условиях, для которой был выбран метод рекуррентности. Эта цель была поставлена при моделировании динамики гальванотаксиса при воздействии на инфузорий контрольной пробы и токсичной пробы.

Рекуррентность основана на принципе связи между предыдущим и последующим числом или элементом чисел Фибоначчи до образования до фракталов, исследуется как механизм развития эпидемий, скрещивание для получения гибрида, связывается с миграцией фауны и флоры, с самоорганизацией. Объединение в

исследовании таксисов бактериальных волн, самоорганизации и популяции стала темой докторской диссертации Цыганова М.А. [20]. Менее обращают внимание на рекуррентности таксисов – движение популяции под воздействием какого-либо фактора, которые перечислены, например, в [21]. Следует учитывать, что таксисы не просто движения многих отдельных организмов под действием какого-либо стимула. Этот термин уже с греческого языка означает «расположение в порядке».

Воздействие электрического поля также создает таксис у инфузорий, поэтому необходимо обосновать динамику гальванотаксиса как рекуррентный процесс, но этот процесс не только природный, но и также управляемый, поэтому ближе к рекуррентному.

Когда перемещаемая популяция организмов между электродами создает слой инфузорий возле катода, этот слой накапливается из предыдущих организмов в кювете. Если происходит переключение полярности напряжения, то слой возле катода уменьшается из-за ухода предыдущих организмов. При контроле процесса возле одной из зон кюветы образуется процесс накопления и ухода и образованию оптического импульса с подъемом и спадом. Рекуррентность изменений, но связанных с прежними концентрациями, преобразуется в оптические параметры оптической плотности. Многократное повторение процесса – подтверждение свойства его рекуррентности.

Для динамики гальванотаксиса инфузорий, который проходит в кювете за достаточно короткое время, в математической модели не требуется учета размножения организмов, как это требуется для моделей эпидемий.

Полезный подход к рекуррентности изложен в работе [22], где предлагается метод изучения влияния геомагнитного поля на электроэнцефалограмму как близость состояний, оцениваемую предложенными математическими мерами, в частности, корреляционными оценками. Такой метод был использован авторами для проверки адекватности математической модели микробиотеста.

Принципы построения модели. Главный принцип – рекуррентный процесс, показанный на диаграмме:

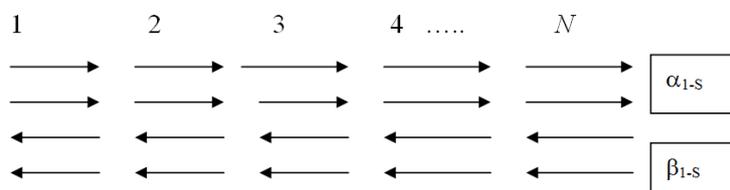


Рис. 3. Схема движения частиц при динамике гальванотаксиса

Кювета с частицами делится на N зон, в каждой зоне n , частиц.

α – доля частиц, переходящая от 1-й (анода) до N (катода).

Повторение длится S раз. При $S+1$ направление меняется.

Доля α сменяется на β и движение от зоны N к зоне 1.

Так повторяется после превышения до pS , где p – количество фаз смены полярности напряжения на электроде.

Изменение фаз и отсчетов определяется коэффициентами.

Первым подходом к проблеме был выбран «табличный метод» [23], при котором фаза ухода инфузорий от анода описывается таблицей, в которой зоны – номера столбцов, а повторения – номера отсчетов. Для расчетов были применены формулы ухода частиц и их прихода, что дало возможность получить набор функций для описания процесса распределения инфузорий по 5-ти зонам кюветы и при разных отсчетах (рис. 3). Недостатком такой модели была сложность учета прежнего распределения, и многократности переключений.

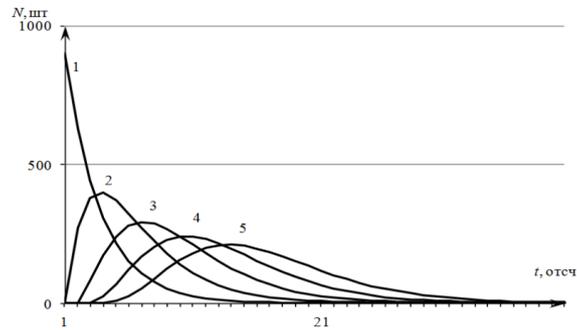


Рис. 4. Функции изменения концентрации инфузорий по зонам

Следующая рекуррентная модель была разработана на основе компьютерной модели. В ней распределение частиц по зонам сначала может быть равномерным или неравномерным. При этом сумма частиц должна быть постоянной.

Производится пересчет количества частиц в оптическую плотность в ячейках при отсчете $k=0$, зависящая от длины волны источника излучения (считается, что достигнуто оптическое согласование) $D(\lambda)$ получена из параметров концентрации частиц, площади сечения ослабления для частицы и толщины слоя, k – количества отсчетов, l – зоны.

$$D_{l_1 0}(\lambda) = D_{l_2 0}(\lambda) = \dots D_{l_q 0}(\lambda) = n_0 \eta \cdot$$

где η – пересчетный коэффициент для количества частиц.

У зоны № N (имитация зоны у электрода) проводится контроль процесса.

Имитация движения достигается несколькими формулами:

Для крайней зоны слева № 1:

$$D(\lambda)_{l_1 k} = D(\lambda)_{l_1 (k-1)} (1 - \alpha_k);$$

Частицы из нее только перемещаются в соседнюю.

Для средних зон между 1-й и последней применяется формула:

$$D(\lambda)_{l_{\text{внт}} k} = D(\lambda)_{(l_{\text{внт}}-1)(k-1)} \alpha_k + D(\lambda)_{(l_{\text{внт}}-1)(k-1)} (1 - \alpha_k),$$

где внт – внутренние зоны.

Для крайней зоны N – накопление, выражаемое формулой:

$$D(\lambda)_{l_N k} = D(\lambda)_{l_N (k-1)} + D(\lambda)_{l_{(k-1)}} \alpha_k$$

(Более сложная модель описана в []).

Количество фаз определяется максимумом Z , после чего синтезируется сигнал в виде последовательности импульсов.

Реализация модели. Программа «Динамика 9» в приложении Excel была реализована в виде матрицы 5×1080 , где 5 – количество зон, при этом каждая фаза была в формате 5×60 , где 60 – количество S для получения 18 фаз и 9 импульсов, из которых образовывалась их последовательность. Дополнительно были введены столбцы для отсчетов и строки для комментариев и расчетов оптических параметров сигнала.

Для управления математической моделью использовались 2 пары по 9 коэффициентов для α и β -фаз. Такая программа была ориентирована на изучение теста для получения 9-ти импульсов.

В новой версии «Динамика 27» основной упор был сделан на моделирование последовательностей амплитуд, что соответствовало разработки нового биотеста, поэтому модель реализована в виде матрицы 54x10 (54 фазы и S=10), увеличены возможности изменять значения коэффициентов, а их количества – исследование функций, огибающих амплитуды и средних величин для последних 5-ти амплитуд. Особое внимание обращается на описание данных функций при токсичности среды. Также применяется корреляционный контроль функции огибающей амплитуд для изучения адекватности эксперимента и модели.

Свойства фронтов импульсов. При компьютерном моделировании следует искать близкие к реальному процессу значения параметров модели. Опыт исследования динамики гальванотаксиса в эксперименте показал, что контроль процесса наиболее удобен в области электрода. (При использовании «Динамики-9» – 5 зона контроля).

При этом форма сигнала определяется накоплением инфузорий в фазе α , что обуславливает разнообразие амплитуд импульсов. В фазе β уход инфузорий создает одинаковый фронт спада импульса, описываемый степенным трендом $R^2 > 0,88$. Это упростило трактовку процесса.

Устойчивость огибающих амплитуд. При разных исходных количествах частиц в каждой из зон (см. табл. 1) сходство огибающей проверялась корреляционным методом.

Таблица 1

Исходные параметры динамики

Вариант/зоны	1	2	3	4	5
1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
2	0,15	0,07	0,15	0,07	0,11
3	0,01	0,24	0,01	0,24	0,05
4	0,25	0,02	0,01	0,02	0,25

По табл. 1 видно, что исходные распределения сильно варьируют, тем не менее результатом модели при подборе коэффициентов стали огибающие функции, коррелированные с $r > 0,9$. (Расчеты на «Динамике-9»).

Надо отметить, что коэффициенты подбираются одни для всех 4-х вариантов. Это можно объяснить тем, что при длительном относительно движении инфузорий при гальванотаксисе собираются к катоду. Тогда исходные распределения организмов объединяются у катода и при переключении полярности вместе перемещаются к другому электроду. При этом процесс при многократном переключении полярности даже малые доли α и β приводит к общей огибающей функции. Применение модели позволило сделать вывод об устойчивости этой функции, что подтверждает принцип рекуррентности.

Огибающие функции были смоделированы на основе подбора коэффициентов для воздействий, ранее представленных на рис. 2, которые показаны на рис. 5 («Динамика-9»).

При контрольной пробе коэффициенты α , определяющие накопление частиц, от 1 до 6 возрастают, при этом коэффициент β , определяющий уход частиц также возрастает с 1 до 2 коэффициента, а затем остаются стабильными. Увеличение коэффициентов β по сравнению с α , отражает быстрый уход частиц из зоны при переключении полярности электродов, что подтверждается экспериментами (рис. 2).

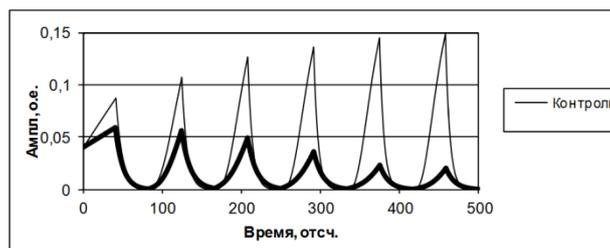


Рис. 5. Модели импульсных последовательностей при контроле и токсичности

При токсичной пробе накопление меньше, и характерен быстрый уход даже слабых инфузорий, этот процесс моделируется спадом амплитуд импульсов и позже стабильностью. При контроле и токсичности адекватность модели и эксперимента составила $r=0,9$.

Модель «Динамика-27» с большим количеством импульсов для исследования последовательностей амплитуд дает возможность анализировать гипотезы о воздействии токсичности, ведь визуально или даже с применением спектрофотометра источники токсичных воздействий очень трудно обнаружить. Рекуррентная модель при изменении начальных коэффициентов показывает резкое изменение направления огибающей функции рис. 6. Отличия заключаются лишь в нескольких коэффициентах.

При контроле: $\alpha_1=0,08$; $\alpha_2=0,06$; $\alpha_3=0,07$; $\alpha_4=0,072$. $\beta_1=0,07$, $\beta_{2-27}=0,06$.

При токсичности: $\alpha_1=0,5$; $\alpha_2=0,04$; $\alpha_{3-27}=0,05$; $\beta_1=0,07$, $\beta_{2-27}=0,06$.

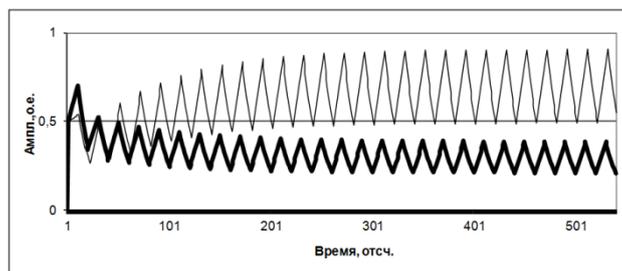


Рис. 6. Функции при воздействии контрольной (—) среды и токсичной (---)

Значения коэффициентов корреляции между опытом и экспериментом для амплитуд при контроле и токсичности составили $r>0,9$. В данной модели не учитывается образование верхнего «плато» импульса и флуктуации, которые видны на рис. 2.

Для проверки модели на токсичность, были также использованы исходные распределения из рисунка. Был получен набор коэффициентов, который создавал корреляцию между экспериментом и моделью на уровне $r>0,9$. Это приводит к гипотезе о том, что инфузории, которые выдерживались в токсичной среде, при воздействии гальванотаксиса реагируют сначала повышением энергии, а затем резким снижением, после чего эта энергия остается стабильно пониженной, что и отражает воздействие токсиканта.

Выводы. Подытоживая результаты, можно сделать следующие выводы о том, что в статье было обосновано развитие новой тест-реакции динамики гальванотаксиса и необходимость математической модели для биотестирования. Были кратко проанализированы существовавшие модели, начиная с XIX в. по XXI в. и их достоинства и недостатки.

Был сделан вывод об особенностях модели для биотестирования на основе динамики популяции и принципа рекуррентности. На этой основе были получены модели сигналов и зависимости их функций от токсичности, исследована адекватность функций огибающих амплитуд. Были предложены подходы для изучения факторов токсичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаров И.С., Алешин И.В. Методы и средства микробиотестирования токсичности сточных вод. Обзор // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 75-95.
2. Казанцева А.Г., Захаров И.С. Исследование влияния биологических и технических факторов на тест-реакцию гальванотаксиса // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2010. – № 5. – С. 109-114.
3. Статкевич П.Г. Гальванотропизм и гальванотаксис реснитчатых инфузорий: дис... д-ра мед. наук. – М.: Физиологический ин-т Моск. ун-та., 1903.
4. Захаров И.С., Казанцева А.Г. Разработка и экспериментальная проверка математических моделей динамики гальванотаксиса инфузорий для биотестирования водных сред // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2011. – № 10. – С. 99-105.
5. Казанцева А.Г., Захаров И.С. Разработка аппаратного метода контроля токсичности водных сред по тест реакции динамики гальванотаксиса инфузорий // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2011. – № 7. – С. 116-124.
6. Попов А.В., Виноходов Д.О., Рутто М.В. Практическое использование реакции гальванотаксиса простейших в токсикологических исследованиях для автоматизации оценки острой токсичности сред // *Экологическая химия*. – 2013. – Т. 22, № 4. – С. 203-214.
7. Попов А.В., Виноходов Д.О., Рутто М.В. Гальванотаксис как средство автоматизации процедуры биотестирования // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2015. – № 29 (55). – С. 70-75.
8. Руссу А.Д., Попов А.В., Виноходов Д.О. Изучение ингибиторов гальванотаксиса *Parameciumcaudatum* // *Молодой ученый*. – 2015. – № 9. – С. 480-483.
9. Волков А.В. Экологический контроль за окружающей природной средой // *Юридический мир*. – 2014. – № 3 (207). – С. 29-33.
10. Verworm M. Untersuchungen ueber die polare Errung der Protistendurch den constanten Strom // *Pfluger' Archive?* – 1897. – Vol. 45. – S. 47.
11. Ludloff K. Untersuchungen ueber Galvanotropismus // *Pfluger' Archive?* – 1897. – Vol. 59. – S. 525-554.
12. Dynamic modelling of real-time observation of galvanotaxis *Paramecium caudatum* / Ogawa N, Oku H., Hishimoto K. At al In: Cato N, Kamimura S, (eds) *Bi0-mechanisms of Swimmings and Flying*; Springer, Tokyo. Proceeding P02.
13. Бирюков Б.И. О движениях инфузорий в определенном направлении под влиянием гальванотаксического тока. – М.: Физиологический ин-т Моск. ун-та 1902. – Т. 5. – Вып. 6.
14. Jahn T.L. The mechanism of cillary movement. I. Cillary reversal and actvation by electric current; the Ludloff phenomenon in terms of core and volume conductors // *J. Protozool*. – Vol. 8. – P. 369-380.
15. Стейси Р., Уильямс Д., Уорден Р. и др. Основы биологической и медицинской физики. – М.: Изд-во ин. лит., 1959. – 607 с.
16. Котов Н.В. Двигательная активность *P. caudatum*: Автореф. дис... д-ра биол. наук. – Пущино, 2001. – 36 с.
17. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. – М.: Наука, 1985. – 528 с.
18. Ionides E.L., Fang K.S. Iseroff R.R. Stochastic models for cell for motion and taxis // *Math. Biol.* – 2004. – Vol. 48. – P. 23-27.
19. Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике: пер. с англ. В.В. Тучина. – М.: Физмалит, 2013. – 812 с.
20. Иваницкий Г.Р., Панфилов А.В., Цыганов М.А. Механизм пульсаций пространственного распределения численности делящихся биообъектов // *Биофизика*. – 1987. – Т. 32 (2). – С. 354-356.

21. Грин Н., Стаут У., Тейлор Д. Биология в 3-х т. Т. 2. Таксисы / под ред. Р. Сопера. – М.: Мир, 1996.
22. Кануников И.Е. Киселев Б.В. Влияние геомагнитного поля на рекуррентные характеристики электроэнцефалограммы // Экология человека. – 2014. – № 12. – С. 47-54.
23. Казанцева А.Г. Метод и средства контроля токсичности водных сред по тест-реакции динамики гальванотаксиса инфузорий Р. CAUDATUM: дис. ... канд. тех. наук. – СПб., 2010. – 13 с.

REFERENCES

1. Zakharov I.S., Aleshin I.V. Metody i sredstva mikrobiotestirovaniya toksichnosti stochnykh vod. Obzor [Methods and means of microbiotechnology wastewater toxicity. Review], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2015, Vol. 8, No. 2, pp. 75-95.
2. Kazantseva A.G., Zakharov I.S. Issledovanie vliyaniya biologicheskikh i tekhnicheskikh faktorov na test-reaktsiyu gal'vanotaksisa [A study of the influence of biological and technical factors on test-reaction of galvanotaxis], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2010, No. 5, pp. 109-114.
3. Statkevich P.G. Gal'vanotropizm i gal'vanotaksis resnitchatykh infuzoriy: dis... d-ra med. nauk [Galvanotherapy and galvanotaxis ciliated ciliates. Dr. of med. sc. diss.]. Moscow: Fiziologicheskii in-t Mosk. un-ta., 1903.
4. Zakharov I.S., Kazantseva A.G. Razrabotka i eksperimental'naya proverka matematicheskikh modeley dinamiki gal'vanotaksisa infuzoriy dlya biotestirovaniya vodnykh sred [Development and experimental verification of mathematical models of the dynamics of galvanotaxis of infusoria for biotesting of water environment], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2011, No. 10, pp. 99-105.
5. Kazantseva A.G., Zakharov I.S. Razrabotka apparaturnogo metoda kontrolya toksichnosti vodnykh sred po test reaktsii dinamiki gal'vanotaksisa infuzoriy [The development of instrumental method of monitoring the toxicity of aquatic environments for the test of the reaction dynamics of ciliates galvanotaxis], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2011, No. 7, pp. 116-124.
6. Popov A.V., Vinokhodov D.O., Rutto M.V. Prakticheskoe ispol'zovanie reaktsii gal'vanotaksisa prosteyshikh v toksikologicheskikh issledovaniyakh dlya avtomatizatsii otsenki ostroy toksichnosti sred [The practical use of the reaction of the simplest galvanotaxis in Toxicological research to automate the assessment of acute toxicity environments], *Ekologicheskaya khimiya* [Environmental chemistry.], 2013, Vol. 22, No. 4, pp. 203-214.
7. Popov A.V., Vinokhodov D.O., Rutto M.V. Gal'vanotaksis kak sredstvo avtomatizatsii protsedury biotestirovaniya [Galvanotaxis as a means automate the procedure biotesting], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 2015, No. 29 (55), pp. 70-75.
8. Russu A.D., Popov A.V., Vinokhodov D.O. Izuchenie ingibitorov gal'vanotaksisa Parameciumcaudatum [The study of inhibitors of galvanotaxis Parameciumcaudatum], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2015, No. 9, pp. 480-483.
9. Volkov A.V. Ekologicheskii kontrol' za okruzhayushchey prirodnoy sredoy [Environmental control of natural environment], *Yuridicheskii mir* [the Legal world], 2014, No. 3 (207), pp. 29-33.
10. Verworn M. Untersuchungen ueber die polare Errungung der Protisten durch den constanten Strom, *Pfluger' Archive?*, 1897, Vol. 45, pp. 47.
11. Ludloff K. Untersuchungen ueber Galvanotropismus, *Pfluger' Archive?*, 1897, Vo.1 59, pp. 525-554.
12. Dynamic modelling of real-time observation of galvanotaxis *Paramecium caudatum*, Ogawa N, Oku H., Hishimoto K. At al In: Cato N, Kamimura S, (eds) Bi0-mechanisms of Swimmings and Flying; Springer, Tokyo. Proceeding P02.
13. Birukov B.I. O dvizheniyakh infuzoriy v opredelennom napravlenii pod vliyaniem gal'vanotaksicheskogo toka [On movements ciliates in a certain direction under the influence of Gal-vantagescore current]. Moscow: Fiziologicheskii in-t Mosk. un-ta 1902, Vol. 5, Issue 6.

14. *Jahn T.L.* The mechanism of cillary movement. I. Cillary reversal and activation by electric current; the Ludloff phenomenon in terms of core and volume conductors, *J. Protozool*, Vol. 8, pp. 369-380.
15. *Steysi P., Uil'yams D., Uorden R. i dr.* Osnovy biologicheskoy i meditsinskoj fiziki [The basics of biological and medical physics.]. Moscow: Izd-vo in. lit., 1959, 607 p.
16. *Kotov N.V.* Dvigatel'naya aktivnost' P. caudatum: Avtoref. dis... d-ra biol. nauk [Motor activity of P. caudatum: the author's abstract dr. of biol. sc. diss.]. Pushchino, 2001, 36 p.
17. *Gardiner K.V.* Stokhasticheskie metody v estestvennykh naukakh [Stochastic methods in natural Sciences.]. Moscow: Nauka, 1985, 528 p.
18. *Ionides E.L., Fang K.S. Iseroff R.R.* Stochastic models for cell for motion and taxis, *Math. Biol.*, 2004, Vol. 48, pp. 23-27.
19. *Tuchin V.V.* Optika biologicheskikh tkaney. Metody rasseyaniya sveta v meditsinskoj diagnostike [Optics of biological tissues. Light scattering methods for medical diagnosis]: translation from English V.V. Tuchina. Moscow: Fizmatlit, 2013, 812 p.
20. *Ivanitskiy G.R., Panfilov A.V., Tsyganov M.A.* Mekhanizm pul'satsiy prostranstvennogo raspredeleniya chislennosti delyashchikh-sya bioob'ektov [The pulsation mechanism of spatial distribution of population numbers of dividing bioobjects], *Biofizika* [Biophysics], 1987, Vol. 32 (2), pp. 354-356.
21. *Grin N., Staut U., Teylor D.* Biologiya [Biology] in 3 vol. Vol. 2. Taksisy [Taxis], ed. by R. Sopera. Moscow: Mir, 1996.
22. *Kanunikov I.E. Kiselev B.V.* Vliyaniye geomagnitnogo polya na rekurrentnye kharakteristiki elektroentsefalogrammy [The effect of magnetic field on the recurrent characteristics of the electroencephalogram], *Ekologiya cheloveka* [Human ecology.], 2014, No. 12, pp. 47-54.
23. *Kazantseva A.G.* Metod i sredstva kontrolya toksichnosti vodnykh sred po test-reaktsii dinamiki gal'vanotaksisa infuzoriy P. CAUDATUM: dis. ... kand. tekh. nauk [Method and means for monitoring the toxicity of aquatic environments for a test of the reaction dynamics of galvanotaxis ciliates P. caudatum: cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg, 2010, 13 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Захаров Игорь Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: Sergeich188@gmail.com; 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, кор. Д; тел.: 88122349071; кафедра инженерной защиты окружающей среды; к.т.н.; доцент.

Казанцева Анна Геннадьевна – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); e-mail: kazanutik@mail.ru; 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67; тел.: 88124947024; кафедра медицинской радиоэлектроники; к.т.н.; ассистент.

Вишневецкий Вячеслав Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: vuvishnevetsky@sfn.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.; доцент.

Zakharov Igor'Sergeevich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; e-mail: Sergeich188@gmail.com; Professora Popova street 5, build. D, St. Petersburg, 197376, Russia; phone: +78122349071; the department of engineering environmental protection; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kazantseva Anna Gennad'evna – Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: kazanutik@mail.ru; 67, Bolshaya Morskaya street, Saint-Petersburg, 190000, Russia; phone: +78124947024; the department of medical electronics; cand. of eng. sc.; assistant.

Vishnevetsky Vyacheslav Yur'evich – Southern Federal University; e-mail: vuvishnevetsky@sfn.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371795; the department electrohydroacoustical and medical equipment; cand. of eng. sc.; associate professor.