

Раздел II. Методы диагностики экологического состояния

УДК 534

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-78-88

И.С. Захаров, А.Н. Величко, В.Ю. Вишневецкий

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОТАКСИСА ИНФУЗОРИЙ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ СРЕД

*Цель работы – разработка экспресс-метода контроля токсичности водных сред на базе тест-реакции термотаксиса инфузорий. Создание биологического мониторинга показывается как закономерный этап развития цивилизованного общества, которое на своем историческом опыте осознало, что технический прогресс может загрязнить акватории и воду, которая необходима как людям на суше, так и на море. Кратко объясняется необходимость для этого координации государственной власти, региональной, частной инициативы и идей ученых. Важным становится идеологический переход от токсикологии, защищающей человека к защите экосистем и развитию экотоксикологии. В статье подчеркивается недостаточность нескольких тестов для решения задач экомониторинга, так как каждый организм имеет свои диапазоны адаптации, а также существует много видов токсичности. Подчеркивается, что идеи прежних времен полезны для новых разработок. Обращается внимание на работы конца XIX, где чаще обращали на опыты *in vivo*, поэтому изучали их в градиенте температур, в работах XX в – создавали технику, в XXI веке связывают реакцию на температуры с токсичностью водных сред. Обоснована актуальность разработки нового микробитеста *in vivo* из области экотоксикологии. Микробиотест основан на тест-реакции термотаксиса инфузорий, эффект которого зависит от токсичности водной среды. Выявлены основные условия возникновения термотаксиса. Разработаны средства формирования термотаксиса инфузорий *P. caudatum* и средства регистрации процесса на основе видеосъемки и программ для обработки данных. Приведены пояснения образования тест-реакции, выбор информативных параметров, график импульсов и зависимостей их элементов от концентрации тест-организмов. Создана экспериментальная установка для исследования воздействия ингибиторов клеточного дыхания и метаболизма. Впервые предложена методика определения токсичности водных сред на базе тест-реакции термотаксиса инфузорий, также эта методика была апробирована на водных растворах модельных токсикантов NaN_3 и CuSO_4 .*

*Биотестирование; экспресс-биотест; термотаксис; водные среды; *Paramecium caudatum*; bioassay; rapid-bioassay; thermotaxis; aqueous media.*

I.S. Zaharov, A.N. Velichko, V.Yu. Vishnevetsky

STUDY OF THE USE OF INFLUENZA THERMOTAXIS FOR WATER MEDIA EXPRESS MONITORING

The aim of the work is the development of an express method for the control of aquatic environments toxicity on the basis of test-reaction of the infusorians thermotaxis. The creation of biological monitoring is shown as a regular stage in the development of a civilized society, which, on its historical experience, realized that technological progress can pollute water areas and water necessary for people on land and at sea. The need for this coordination between state power, regional, private initiative and scientists' ideas is briefly explained. Important is the ideological

*transition from toxicology, which protects a human, to protection of ecosystems and the development of ecotoxicology. The article highlights the inadequacy of several tests for solving environmental monitoring problems, since each organism has its own adaptation ranges, and there are many types of toxicity. It is emphasized that the ideas of earlier times are useful for new developments. Attention is drawn to the work of the end of the XIX century, where in vivo experiments were more often, so they studied them in a temperature gradient, in the works of the XX century, a technique was created, in the XXI century the reaction to temperatures was linked to the toxicity of aquatic environments. The urgency of the development of a new microbiotest in vivo from the field of ecotoxicology is substantiated. MicrobiotaTest is based on the test-reaction of thermotaxis of infusorians, the effect of which depends on the toxicity of the aquatic environment. The main conditions for the appearance of thermotaxis are revealed. The means for the formation of the thermotaxis of *P. caudatum* infusorians and the means for recording the process on the basis of video recording and data processing programs have been developed. The explanations of the test reaction formation, the selection of informative parameters, the graph of the impulses and the dependencies of their elements on the concentration of test organisms are given. An experimental device for investigating the effects of inhibitors of cellular respiration and metabolism has been created. For the first time, a method for determining the toxicity of aqueous media based on the test-reaction of infusoria thermotaxis has been proposed, and this technique has been tested on aqueous solutions of model toxicants NaN_3 and CuSO_4 .*

Biotesting; express biotest; thermotaxis; aqueous media; Paramecium caudatum; bioassay; rapid-bioassay; thermotaxis; aqueous media.

Актуальность. Проблема качества водных сред становится с каждым десятилетием сложнее вследствие расширения человечеством потребления и, соответственно, загрязнений отходами.

Современный мониторинг природных акваторий и питьевой воды, вследствие трудностей выявления множества химических элементов, а также их смесей, создающих эффекты антагонизма и синергизма, сложность образования помимо загрязнения и процесса самоочищения вод, требует дополнения аналитического контроля биологическим.

Биотестирование, как один из важных видов этого дополнения для тестирования качества воды возникло в 1960-е гг., когда развитые страны стали видеть при техническом прогрессе снижение качества жизни. В 1970-е гг. были созданы, например в США, государственные агентства защиты среды, объединяющих для этой цели государственных и частных лиц.

Считалось важным направлением политики государств и штатов создание новых средств биотестового контроля вредных факторов в водной среде.

Первым направлением было ограничение или сокращение производства самых опасных, высокотоксичных и тем более канцерогенных для людей веществ. Здесь и потребовалось обнаружение особо опасных токсикантов биологическими методами, и для этого общества развитых стран были согласны на дорогостоящие методы. Первоначально для обнаружения токсичности водных сред и биотестового мониторинга использовали крупных рыб, таких как радужную форель, известную многим рыбакам как рыбы, живущей в чистой воде. Следующим этапом развития борьбы с загрязнением вод стала забота об экономичности. В 1980-е гг. было создано направление микробиотестирования, которое основано на использовании организмов малых размеров. Но этого недостаточно, так как очень большие средства требовали отбор, перевозку, хранение – проб большого объема, поэтому необходимо было уменьшить объемы проб. В 1980-е также развивалось не только направление защиты человека от токсичности водных сред, но и водных организмов экотоксикология, причем они многое своими реакциями предсказывали людям, так как сходство организменных уровней физиологических процессов живого изучали еще ученые конца XIX в.

Возможности поиска новых биотестов. Микробиотестирование, вызвавшее в 1990-е ожидание решения всех задач несколькими тестами, имеет при этом ограничения для всех искусственно-полученных организмов (тест-объектов). Все живое имеет разные диапазоны адаптивности (или верхние и нижние пороги закона толерантности Шелфорда), а множество видов токсичности (интегральная токсичность, фитотоксичность, цитотоксичность, мутагенность, тератогенность и др.) побуждает исследователей и разработчиков искать новые виды биотестов для контроля токсичности водных сред. Поиск организмов и новых реакций, которые может решить прежние или новые задачи.

Основные известные биотесты упомянуты в ссылках [1–16], а в данной статье будет рассмотрены возможности нового биотеста на базе тест-реакции термотаксиса инфузорий для контроля токсичности водных сред.

Сами понятия «таксисов» в биологии появились преимущественно в конце XIX в начале XX, когда многие биологи разных стран изучали коллективные движения цельных организмов под действием каких-либо химических или физических факторов. Также иногда наряду с «таксисами» употреблялось понятие «тропизм», когда под влиянием факторов изменялись какие-либо части организма. Когда идет речь о классификации одноклеточных организмов с ресничками, перемещающимися в водной среде, то биологи по-разному трактуют термины. Самым существенным в трактовке составляет зависимость движений от какого-либо фактора, поэтому упомянутый прежде термотаксис и термотропизм одинаково зависят от температуры, и здесь самое важное – нахождение биологических эффектов, которые могут быть полезны для микробиотеста. Аппаратное биотестирование – область биотехнологии, где наиболее важную роль играют организмы и их свойства, а для разработчиков организм – биохимический преобразователь, параметры которого измеряет прибор в зависимости от свойств эффектов.

Зарождение термотаксиса. Первым исследователем зависимости биологических эффектов инфузорий от температуры водной среды считается известный биолог Мендельсон. Чтобы пояснить эффект, следует привести его некоторые записи [2].

Термотропизмом назвал Мендельсон процесс, который 6 часов наблюдал и описывал, как инфузории *Paramecium* собирались в конце трубки, в которой установились разные температуры. Трубки с инфузориями в водной среде поддерживались нагревом и охлаждением – у одного конца 38 град. и 26 град. у другого. В окончании опыта, инфузории собрались у другой стороны с более низкой температурой.

Если температура воды концов трубки изменялась противоположно, то организмы двигались к противоположной стороне. Если один конец трубки имел температуру 10 град, а другой 25, то все двигались снова к холодной воде. Когда изменяются температуры, организмы уходят внезапно из области комфортных температур к низким, активность их проявляется в перемещении обратно, но их движение назад не в старом направлении, а с отклонением (девиацией).

Известный физиолог Дженнингс обратил внимание на то, что многие виды инфузорий уходят от «тропических» для них мест, и в этом случае мы можем ожидать с большой вероятностью уменьшения количества организмов, а само движение парамеций описано известным физиологом Дженнингсом. Статьи Мендельсона указаны в [2, 3].

В записях очень полезное для экспрессного биотестирования наблюдение в том, что организмы при изменении температур движутся с большей скоростью, чем при первичном распределении.

Прежние возможности ученых были отмечены высокой наблюдательностью, но у них не было современных приборов, которые могли бы измерить концентрацию кислорода в воде, так как многие виды инфузорий микроаэрофилы, и поэтому прерывание дыхательной клеточной цепи приведет их к поиску еще более низкой температуры.

В 1934 г. Гертером были поставлены опыты, которые давали возможность изучать термотаксис, воздействие температуры на ползучих организмов (червей). Принцип прибора был близок к примененному Мендельсоном, но использовались нагреватель с кипящей водой и льдом, которые с двух сторон создавали перепад температур на металлической ленте, на которые помещали червей, после чего изучался диапазон комфортных температур для видов организмов.

Интерес к прежним идеям возродился в 2000-е гг., когда было обнаружена общая зависимость многоклеточных (например, лягушек) или одноклеточных (инфузорий) в перемещении в области низких температур при уменьшении концентрации кислорода в водной среде. Были проведены опыты по принципу Мендельсона [2, 3] и Гертера [1], которые показали, что одноклеточные в течение довольно долгого времени (1 ч и больше) находят комфортные температуры, но их смещение при воздействии токсиканта азид натрия по температуре происходит к низким.

Эти работы дали возможность авторам нового подхода (Захарова и Величко, 2014) разработать новый микробиотест.

Разработка биотеста. Главной задачей такого нового микробиотеста было выявить главные условия, при которых термотаксис проявляется, т. е. при изменении разности температур одноклеточные движутся к определенным температурным зонам. В отличие от ученых-исследователей, создатели биотеста должны добиться воспроизведения эффекта. После длительных опытов было установлено, что самым главным фактором воспроизведения для инфузории-туфельки фаза роста – насыщения [17]. При этих условиях термотаксис, как зависимость реакции организмов на перепад температур, может быть получен и в течение часов [1], и за 10 мин [18].

Так появилась возможность создания экспресс-микробиотеста.

Прежние устройства для изучения термотаксиса были ориентированы только на поиск комфортного диапазона температур, но важна была зависимость между воздействием токсикантов на инфузорий и термотаксисом популяции [18].

Тест-реакция. Она основывалась на движении популяции инфузорий, при воздействии безвредного состава водной среды и с добавлением токсиканта (выдержка 5 мин). После выдержки популяция подвергалась изменению температур охлаждающим элементом (2 мин).

Была применена кювета из теплопроводного стекла, в которую наливалась взвесь тест-объектов (инфузорий).

Инфузории, если они не подвергались токсиканту, перемещаются к элементу и через 2 мин элемент убирают и популяция снова возвращается к однородному состоянию.

Если инфузории подвергались токсиканту, то после перемещения к элементу и через 2 мин удаления элемента к прежнему состоянию популяция не возвращается [19].

Контроль тест-реакции. Объединение выбора тест-реакции и методов вместе с выбранными средствами измерения называется за рубежом «эндпойнт» (что позволяет получать гранты и инвестиции). В качестве метода, выбранном для био-

теста на базе термотаксиса инфузорий, была выбрана установка со средствами фотосъемки и видеосъемки, системой освещения, и обработкой оцифрованных кадров, которые обрабатываются разработанными программами [20].

На рис. 1. показаны импульсы, которые образуют функции линейного тренда распределения популяции инфузорий по кювете.

Концентрация инфузорий в 2000 ± 100 кл. создает близкое к равномерному распределение тест-объектов, параметр биотеста – угол наклона близок к нулю. Длительная регистрация приводит к увеличению мелких отклонений.

При воздействии охлаждающего элемента инфузории быстро накапливаются возле холодной стенки кюветы с изменениями температуры на -8 °С. Другая стенка имеет температуру 24 °С.

При этом угол распределения популяции увеличивается до 2 мин пока не удаляют охлаждающий элемент. После этого организмы движутся медленнее, угол становится отрицательным, уменьшается и доходит до близкого к нулю.

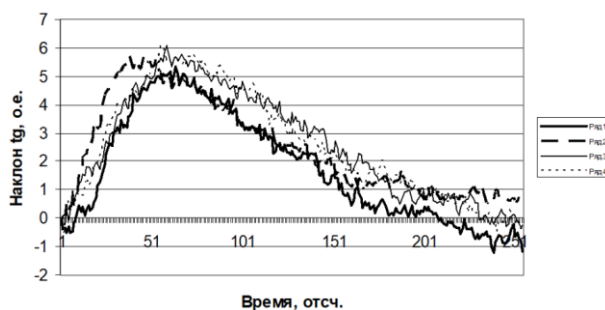


Рис. 1. Термотаксический импульс в безвредной среде

В этом процессе восстанавливается распределение концентрации. Коэффициент корреляции между импульсами $r=0,90 \dots 0,98$ (250 измерений), среднее значение максимума импульса $5,8 \pm 0,4$. Были проведены исследования, параметра наклона от концентрации инфузорий (рис. 2) при термотаксисе.

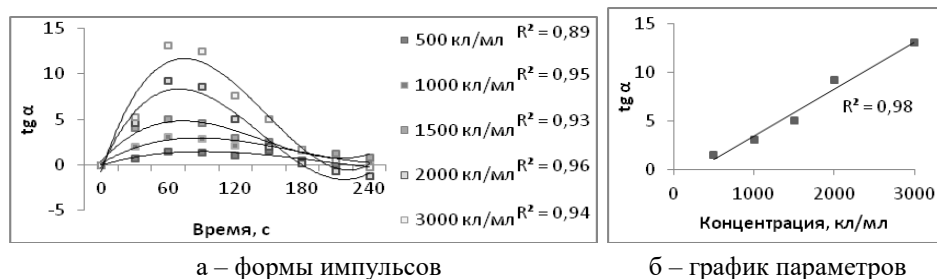


Рис. 2. Зависимость максимума tg распределения от концентрации инфузорий

Для измерений максимумов для удобства наблюдения удаляют тренды исходного распределения. Для обработки данных достаточно получить амплитуду импульса.

Обработка данных. На рис. 3 показана схема цифровой обработки изображений.

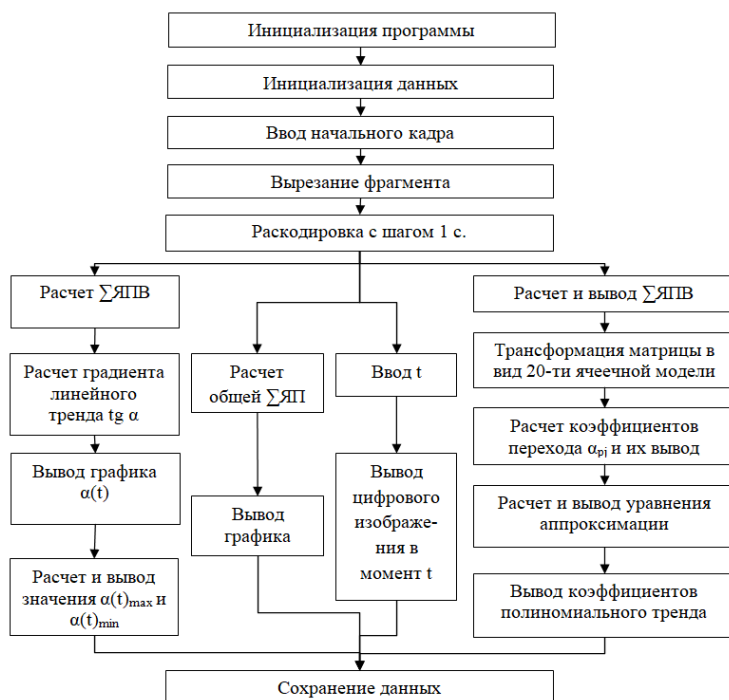


Рис. 4. Схема обработки и сохранения данных, где ЯПВ – сумма яркостей пикселей вертикальных, α – угол наклона (см. рис. 2, 3), r_j – коэффициенты перехода (показывают изменения распределений при перемещении инфузорий)

Разработанная комплексная программа (рис. 5) реализует следующие функции: загрузки исходных видеофайлов; выбора начального фрагмента видеозаписи; демонстрации заданного начального фрагмента видеозаписи; автоматической раскодировка видеофайлов; выделения интересующую область кадра; построения термотаксической реакции (градиент наклона в зависимости от времени); построения индикации; просмотра кадра во введенный момент времени; расчета максимальной и минимальной точки термотаксической реакции; построения гистограммы; построения графика коэффициентов перехода; сохранения данных.

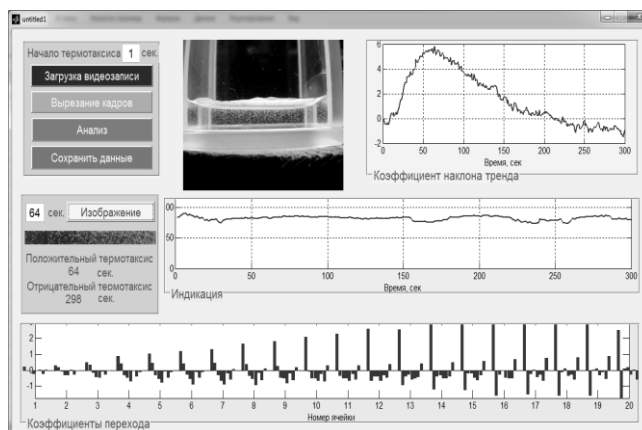


Рис. 5. Окно программы после выполнения функции «Анализ»

Апробация метода на модельных токсикантах – ингибиторах клеточного дыхания и метаболизма на тест-реакцию термотаксиса инфузорий. Подготовка инфузорий осуществлялась согласно стандартным методам культивирования. В опытах используется культура через 7 дней после кормления микроорганизмов.

В эксперименте исследуются ингибиторы клеточного дыхания и метаболизма, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Концентрации анализируемых веществ

Анализируемое вещество	Анализируемая концентрация		
	NaN_3	1 ммоль/л	10 ммоль/л
CuSO_4	0,01 мг/л	0,1 мг/л	1 мг/л

С помощью разработанного аппаратно-программного комплекса были впервые получены зависимости (рис. 6) информативных параметров термотаксиса от концентрации модельного токсиканта – азидата натрия, который является ингибитором клеточного дыхания ($y = -0,98x + 3,42$ при $R^2 = 0,91$).

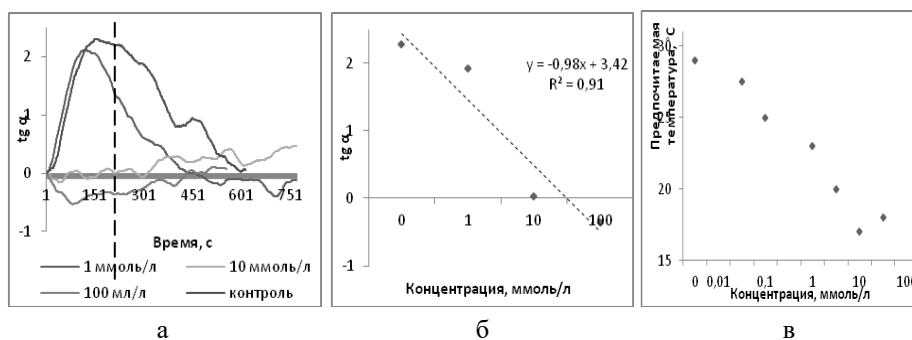


Рис. 6. Исследование воздействия ингибитора клеточного дыхания NaN_3 на термотаксическую реакцию инфузорий (а – результаты цифровой обработки; б – зависимость информативного параметра от концентрации NaN_3 , в – зависимость, полученная по методу Гертера за 60 мин (Малвин Г.М., 1994))

Зависимости информативных параметров термотаксиса от концентрации модельного токсиканта CuSO_4 , который является ингибитором метаболизма, характеризуется линейной аппроксимацией $y = -0,35x + 1,44$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,97$ (рис. 7).

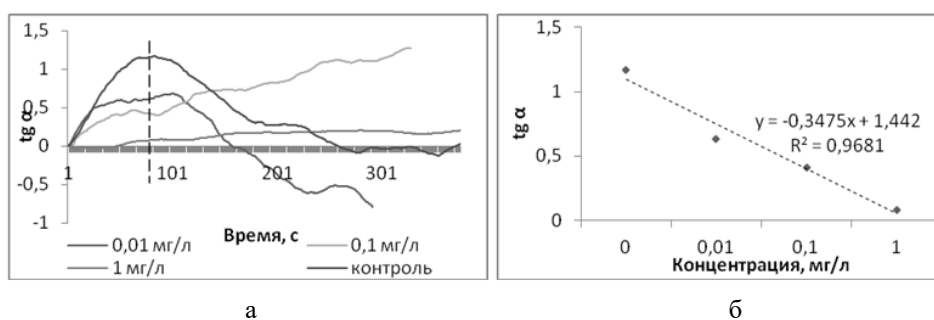


Рис. 7. Исследование воздействия ингибитора метаболизма CuSO_4 на термотаксическую реакцию (а – результаты цифровой обработки; б – зависимость информативного параметра от концентрации CuSO_4)

Методика определения токсичности различных сред, разрабатываемая на базе тест-реакции термотаксис, основана на контроле хемотаксической и термотаксической реакций взвеси инфузорий, т.е. уходе культуры от опасного химического вещества в градиенте температур.

Для определения токсичности водных сред обоснован расчет индекса токсичности:

$$T = \frac{tg \alpha_{\text{контроль}}(t) - tg \alpha_{\text{исслед}}(t)}{tg \alpha_{\text{контроль}}(t)}$$

где $tg \alpha_{\text{исслед}}(t)$ и $tg \alpha_{\text{контроль}}(t)$ – значение градиента наклона популяционного распределения инфузорий в исследуемой и контрольной кюветах соответственно в момент точки перегиба для контрольной пробы t .

Апробация предложенной методики биотестирования была проведена на модельных токсикантах – азиде натрия в концентрациях 1, 10, 100 ммоль/л (рис. 8,а) и сульфате меди в концентрациях 0,01, 0,1 и 1 мг/л (рис. 8,б).

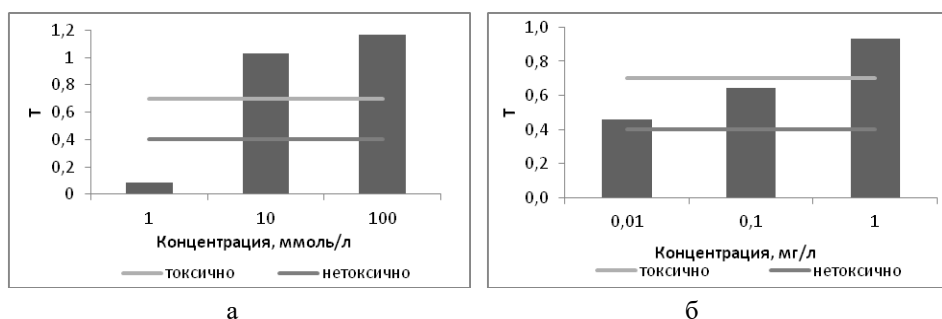


Рис. 8. Зависимость индекса токсичности от концентрации NaN_3 (а) и CuSO_4 (б)

Эксперименты показали возможность использования данного метода для контроля токсичности водных растворов ингибиторов клеточного дыхания.

Выводы. В данной статье предложены разработанные авторами метод и средство определения токсичности водных сред на базе термотаксиса инфузорий, который начали изучать еще в конце XIX – начале XX века как биологический эффект. Авторы связали термотаксис с токсичностью водных сред, разработали аппаратное и программное обеспечение, что позволило создать экспресс-биотест, который успешно прошел апробацию на водных растворах модельных токсикантов NaN_3 и CuSO_4 для контроля водных сред.

При подготовке статьи были использованы материалы, собранные в результате работы в рамках проекта "Разработка биотехнической системы для экспресс-контроля токсичности водных сред на основе тест-реакции термотаксиса *P. caudatum*" конкурсной программы "У.М.Н.И.К."

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dr. Konrad Herter.* Untersuchungen über den temperatursinn einiger insekten // Ausdem zoologischen Institut der Universität GSttngen und dem zoologischen Institut der Universität Berlin. Germany, 1923. – P. 221-288.
2. *Mendelssohn M.* Über den Thermotropismus in zeller Organismen // Pflüger's Arch. Ges. Physiol. – 1895. – Vol. 60. – P. 1-27.
3. *Mendelssohn M.* Recherches sur l'interference de la thermotaxie avec d'autres tactismes et sur le mechanism du mouvement thermotactique // Journal de Physiologie. – 1902. – No. 4. – P. 475-488.
4. *Malvin G. M. et al.* Nitric Oxide Production and Thermoregulation in *Paramecium caudatum* – Acta Protozoologica // Internation Journal on Protistology. – 2003. – Vol. 42. – P. 259-267.

5. *Gordon C.J.* Temperature and toxicology: an integrative, comparative, and environmental approach. – CRC Press, 2005. – P. 256-257. – 289 p.
6. *Jennings H.S.* Behavior of the Lower Organisms. – Bloomington: Indiana University Press, 1906. – P. 47-72.
7. *Tawada K., Oosawa F.* Responses of Paramecium to temperature change // *Protozoo*. – 1972. – No. 19. – P. 53-57.
8. *Tawada K., Miyamoto H.* Sensitivity of Paramecium Thermotaxis to Temperature Change // *Protozoo*. – 1973. – No. 20. – P. 289-292.
9. *Kuriu T., Nakaoka Y., Oosawa Y.* Cold-sensitive Ca²⁺ influx in Paramecium // Национальная библиотека медицины PubMed. – 1997. – Vol. 22, No. 5.
10. *Imada C., Oosawa Y.* Thermoreception of Paramecium: Different Ca²⁺ Channels Were Activated by Heating and Cooling. // Национальная библиотека медицины PubMed. – 1999. – Vol. 168, No. 3.
11. Marie Jeffroya, Dr Hanna Salmanb, Pr Albert Libchaberb. Thermotaxis in Escherichia Coli. 2004-2005
12. *Todd Hennessey, Nelson D.L.* Thermosensory Behaviour in Paramecium tetraurelia: a quantitative assay and some factors that influence thermal avoidance // *Journal of General Microbiology*. – 1979. – Vol. 112. – P. 337-347.
13. *Takashi Tominaga, Yutaka Naitoh.* Membrane potential responses to thermal stimulation and the control of thermoaccumulation in Paramecium caudatum. Institute of Biological Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305, Japan, 1992. – Vol. 164. – P. 39-53.
14. *Nakaoka Y., Oosawa F.* Temperature-sensitive behaviour of Paramecium caudatum // *J. Protozool.* – 1977. – Vol. 24. – P. 575-580.
15. *Naitoh Y., Kaneko H.* Reactivated Triton-extracted models of Paramecium: Modification of ciliary movement by calcium ions. Science, N.Y., 1972. – Vol. 176. – P. 523-524.
16. *Marée A.F. M., Panfilov A.V., Hogeweg P.* Migration and Thermotaxis of Dictyostelium discoideum Slugs, a Model Study // *Journal of theoretical Biology*. – 1999. – No. 199. – P. 297-309.
17. *Величко А.Н., Захаров И.С.* Исследование методов формирования тест-реакции термотаксиса инфузорий // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Биотехнические системы в медицине и экологии. – 2014. – № 1. – С. 69-73.
18. *Velichko A., Zakharov I., Zavgorodny A.* Bioengineering systems for P. caudatum thermotaxis test reaction study // Сб. докладов международной конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники (2016 ElConRusNW). – Санкт-Петербург, 2016.
19. *Величко А.Н.* Анализ результатов исследования реакции термотаксиса Paramecium caudatum // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 4. – С. 50-56.
20. *Величко А.Н., Захаров И.С.* Система контроля тест-реакции термотаксиса Paramecium caudatum // Сб. докладов III научно-технической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего». – Санкт-Петербург, 2015. – С. 93-95.

REFERENCES

1. *Dr. Konrad Herter.* Untersuchungen über den temperatursinn einiger insekten, *Ausdem zoologischen Institut der Universität GSttlngen und dem zoologischen Institut der Universität Berlin. Germany*, 1923, pp. 221-288.
2. *Mendelsohn M.* Uber den Thermotropismuse in zeller Organismen, *Pflüger's Arch. Ges. Physiol.*, 1895, Vol. 60, pp. 1-27.
3. *Mendelsohn M.* Recherches sur l'interference de la thermotaxie avec d'autres tactismes et sur le mechanism du mouvement thermotactique, *Journal de Physiologie*, 1902, No. 4, pp. 475-488.
4. *Malvin G. M. et al.* Nitric Oxide Production and Thermoregulation in Paramecium caudatum – *Acta Protozoologica, Internation Journal on Protistology*, 2003, Vol. 42, pp. 259-267.
5. *Gordon C.J.* Temperature and toxicology: an integrative, comparative, and environmental approach. – CRC Press, 2005. – P. 256-257. – 289 p.
6. *Jennings H.S.* Behavior of the Lower Organisms. Bloomington: Indiana University Press, 1906, pp. 47-72.
7. *Tawada K., Oosawa F.* Responses of Paramecium to temperature change, *Protozoo*, 1972, No. 19, pp. 53-57.

8. Tawada K., Miyamoto H. Sensitivity of Paramecium Thermotaxis to Temperature Change, *Protozool*, 1973, No. 20, pp. 289-292.
9. Kuriu T., Nakaoka Y., Oosawa Y. Cold-sensitive Ca²⁺ influx in Paramecium, *Natsional'naya biblioteka meditsiny PubMed* [National library of medicine PubMed], 1997, Vol. 22, No. 5.
10. Imada C., Oosawa Y. Thermoreception of Paramecium: Different Ca²⁺ Channels Were Activated by Heating and Cooling, *Natsional'naya biblioteka meditsiny PubMed* [National library of medicine PubMed], 1999, Vol. 168, No. 3.
11. Marie Jeffroya, Dr Hanna Salmanb, Pr Albert Libchaberb. Thermotaxis in Escherichia Coli. 2004-2005.
12. Todd Hennessey, Nelson D.L. Thermosensory Behaviour in Paramecium tetraurelia: a quantitative assay and some factors that influence thermal avoidance, *Journal of General Microbiology*, 1979, Vol. 112, pp. 337-347.
13. Takashi Tominaga, Yutaka Naitoh. Membrane potential responses to thermal stimulation and the control of thermoaccumulation in Paramecium caudatum. Institute of Biological Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305, Japan, 1992, Vol. 164, pp. 39-53.
14. Nakaoka Y., Oosawa F. Temperature-sensitive behaviour of Paramecium caudatum, *J. Protozool*, 1977, Vol. 24, pp. 575-580.
15. Naitoh Y., Kaneko H. Reactivated Triton-extracted models of Paramecium: Modification of ciliary movement by calcium ions. Science, N.Y., 1972, Vol. 176, pp. 523-524.
16. Marée A.F. M., Panfilov A.V., Hogeweg P. Migration and Thermotaxis of Dictyostelium discoideum Slugs, a Model Study, *Journal of theoretical Biology*, 1999, No. 199, pp. 297-309.
17. Velichko A.N., Zakharov I.S. Issledovanie metodov formirovaniya test-reaktsii termotaksisa infuzoriy [Study of the methods of forming a test reaction thermotaxis ciliates], *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. Ser. Biotekhnicheskie sistemy v meditsine i ekologii [Izvestiya Etu "LETI". A series of Biotechnical systems in medicine and ecology], 2014, No. 1, pp. 69-73.
18. Velichko A., Zakharov I., Zavgorodniy A. Bioengineering systems for P. saudatum thermotaxis test reaction study, *Sb. dokladov mezhdunarodnoy konferentsii molodykh issledo-vateley v oblasti elektrotekhniki i elektroniki (2016 ElConRusNW)* [Collection of reports of international conference of young researchers in the field of electrical and electronics engineering (2016 ElConRusNW)]. Saint-Petersburg, 2016.
19. Velichko A.N. Analiz rezul'tatov issledovaniya reaktsii termotaksisa Paramecium caudatum [The analysis of the results of reaction of Paramecium caudatum thermotaxis], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya Etu "LETI"], 2016, No. 4, pp. 50-56.
20. Velichko A.N., Zakharov I.S. Sistema kontrolya test-reaktsii termotaksisa Paramecium caudatum [Control system test of reaction of Paramecium caudatum thermotaxis], *Sb. dokladov III nauchno-tekhnikeskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Nauka nastoyashchego i budushchego»* [Collection of papers of the III scientific-technical conference with international participation "Science of the present and the future"]. Saint-Petersburg, 2015, pp. 93-95.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. К.А. Черный.

Захаров Игорь Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: Sergeich188@gmail.com; 195112, Санкт-Петербург, пр. Шаумяна, 33 кв. 49; тел.: +79213316303; кафедра инженерной защиты окружающей среды; к.т.н.; доцент.

Величко Анна Николаевна – Ленинградское областное государственное казенное учреждение "Леноблэкоконтроль" (Государственная инспекция экологического надзора Ленинградской области); e-mail: anveli@bk.ru; 197343, г. Санкт-Петербург, Ланское шоссе, 43 кв. 77; тел.: +79215910789; к.т.н.; главный специалист по биотестированию.

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

Zakharov Igor Sergeevich – St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; e-mail: sergeich188@gmail.com; 195112, St. Petersburg, Shahumyan Avenue, 33-49; phone: + 79213316303; cand. of eng. sc.; associate professor.

Velichko Anna Nikolaevna – Leningrad regional state institution "Lenoblecocontrol" (State Inspection of Environmental Supervision of the Leningrad Region); e-mail: anveli@bk.ru; 197343, St. Petersburg, Lanskoeye highway, 43-77; phone: + 79215910789; cand. of eng. sc.; chief expert in biotesting.

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

УДК 581.1

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-88-97

И.А. Кипнис, Ю.М. Вернигоров**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ВОДЫ В КАПИЛЛЯРЕ ПРИ НАЛИЧИИ
В НЕМ ПОПЕРЕЧНЫХ СПЛОШНЫХ И ПЕРФОРИРОВАННЫХ
ПЕРЕГОРОДОК***

В большинстве публикаций, связанных с писанием подъема воды в растениях не учитывается строение ксилемы, обеспечивающей подъем и распределение воды. Сосуды листовых растений формируются из пористых трахеид, форма которых влияет на образование простых либо лестничных и эфедронидных перфорационных пластинок. Перфорационные пластинки находятся на концах сосудов и связывают их между собой. Перегородки повернуты в пространстве на некоторый угол друг относительно друга. В работе впервые описана модель подъема воды в вертикальном капилляре с поперечными сплошными и перфорированными перегородками. Показано, что наличие наклонных перфорационных перегородок обеспечивает большую площадь перфораций. Произведена оценка угла наклона лестничных перфорированных перегородок к горизонтали для разных радиусов капилляра и показано, что углы наклона находятся в пределах от 55° до 88° . При этом площади перегородок могут быть от 2 до 28 раз больше площади поперечного сечения капилляров, что даёт возможность в этой же пропорции увеличить площадь, занимаемую перфорацией и снизить сопротивление продвижению воды. При углах наклона перфорированных перегородок близких к 90° вода в капилляре поднимается, как в обычном капилляре с внутренней продольной вертикальной прозрачной для воды перегородкой. Показано, что различная пространственная ориентация перегородок приводит к увеличению высоты подъема воды в капилляре. Получено аналитическое выражение оценки влияния перфорированных перегородок на высоту подъема воды в ксилеме, что позволяет объяснить реальный подъем воды в листовых деревьях, который в действительности во много раз выше, чем рассчитанный по классической формуле Жюрена. Показано, что с увеличением непрозрачной площади перегородки, уменьшением угла ее наклона и высоты расположения относительно поверхности воды высота подъема воды увеличивается. Система перегородок в ксилеме растений, как и любая открытая система, проявляет свойство мультипликативности: действие каждой из подсистем (каждой перегородки) суммируется

Растение; ксилема; сосуд; капилляр; модель

I.A. Kipnis, Yu.M. Vernigorov**MODELING THE WATER RISE IN THE CAPILLARY
IN PRESENCE OF TRANSVERSE SOLID AND PERFORATED PARTITIONS**

In most publications related to the water rise in plants the structure of the xylem, which provides rise and distribution of water, is not taken into account. Vessels in leafy plants are formed from porous tracheids, which affects the formation of simple or stair and average perforation plates. Perforation plates are located at the ends of the vessels and connect them with each other. Partitions

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.