

11. Molchanov D.A. Samoorganizuyushchiesya seti i problemy ikh postroeniya [Self-organizing networks and problems of their construction], *Elektrosvyaz'* [Electrosvyaz], 2006, No. 6, pp. 20-22.
12. IEEE 802.15.4-2003 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
13. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks, *Communications Magazine, IEEE*, 2002, Vol. 40.
14. Akyildiz I.F. Key Wireless Networking Technologies in the Next Decade, *NEW2AN 2006, St. Petersburg, Russia, June 2006. Keynote Speech*.
15. Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks Journal, Elsevier*, May 2005, Vol. 3, Issue 3.
16. Akyildiz I.F., Vuran M.C., Akan O.B., Su W. Wireless Sensor Networks: A Survey revisited, *Computer Networks Journal*. 2005.
17. Akyildiz I.F. Key Wireless Networks Technologies in the Next Decade, *WWIC 2005 Keynote Speech, Xanthi, Greece. May 2005*.
18. Akyildiz I.F., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: a survey, *Computer Networks and ISDN Systems*, March 2005, Vol. 47, No. 4.
19. Hossain E., Leung K. *Wireless Mesh Networks Architectures and Protocols*, Springer. 2007.
20. Koucheryavy A., Prokopiev A. Quality of Service (QoS) classes for Ubiquitous Sensor Networks, *The 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2009). IEEE Proceedings. February 2009 Korea*.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.П. Милешко.

Сергусhev Алексей Геннадьевич – ОАО «Авангард»; e-mail: ags@pochta.ru; 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72; тел.: 88125439076; к.т.н.; начальник сектора «Широкополосных сенсорных сетей».

Sergushev Alexey Gennadievich – JSC “Avangard”; e-mail: ags@pochta.ru; 72, Kondrat'evskiy pr., Saint-Petersburg, 195271, Russia; phone: +78125439076; cand. of eng. sc.; chief of sector of broadband sensor networks.

УДК 543.9+621.3.082.73+57.083.3

В.Ю. Вишневецкий, Т.П. Строчан

ПОСТРОЕНИЕ БИОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ БИОСЕНСОРА

Обозначены основные задачи и требования проведения экологического мониторинга для экспресс методов обработки проб водных объектов. Из проведенного анализа и характеристик техники такого уровня выделен кластер биосенсорных систем (БСС). Разработана общая структурная схема БСС, наглядно отражающая особенности и взаимодействия блоков всей структуры конструкции. На основе математической модели, полученной из соотношения Заурберера, связывающего резонанс датчика относительно изменения его массы, строится компьютерная имитационная модель пьезокварцевого биосенсора. Исходя из полученных результатов моделирования, проведены обзор различной конфигурации биосенсоров и оценка отклики по трем элементам: хлору, кадмию и цинку. Рассмотрены способы построения биосенсорной системы и ее основные параметры, такие как подача пробы и конфигурация биосенсорного моста. Определены взаимовоздействия сенсоров в системе, а также возможность детектирование ряда загрязнителей одним элементом. Предложены варианты обработки полученных данных, а так же способы их отображения в зависимости от количества биосенсоров. Построена диаграмма откликов БСС, состоящей из двух биосенсоров для хлора, кадмия и цинка. В полученной имитационной модели биосенсорной системы реализовано отображение всего спектра значений по каждому элементу. При увеличении количества определяемых веществ и увеличении сенсоров на n штук, отображаются

либо усредненные результаты измерений, либо только их максимальные значения. Для построения компьютерной имитационной модели использовалась программа Visual Studio 2012, так как она обладает широкими возможностями программирования и гибкостью представления результатов. Разработана программная реализация системы (BioResours), которая включает в себя несколько имитационных моделей биосенсоров. Проведена разработка интерфейса компьютерной имитационной модели, а именно отображение полученных результатов производится графически в одном рабочем окне. Обозначена актуальность моделирования и перспективы полученных конфигураций. Рассмотрены возможные перспективы развития БСС, их преимущества и недостатки по отношению к традиционным методам мониторинга.

Биосенсор; биосенсорная система; мониторинг; модель; пьезоэлемент.

V.Yu. Vishnevetskiy, T.P. Strochan

CONSTRUCTION OF BIOSENSOR SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING BASED ON COMPUTER SIMULATION MODEL BIOSENSOR

Outlines the main tasks and requirements for conducting environmental monitoring for rapid methods of processing samples of water bodies. The analysis and characteristics of equipment of this level allocated cluster biosensor systems (BSS). Developed a General block diagram of the FSU, reflecting clearly the characteristics and interaction of blocks of the whole structure. On the basis of mathematical models obtained from the Zaurberay's ratio of , which associates the resonance of the sensor relative to the change of its mass, builds a computer simulation model of the piezoelectric biosensor. Based on the simulation results, conducted a review of various configurations of biosensors and evaluation feedback on three elements: chlorine, cadmium and zinc. The methods of constructing a biosensor system and its basic parameters, such as the filing of a sample and a biosensor configuration of the bridge. Definition of mutual influence of sensors in the system, and the ability to detect a number of pollutants by a single element. The proposed options of data processing, as well as ways to display them depending on the number of biosensors. The diagrams of the responses of the BSS, consisting of two biosensors for chlorine, cadmium and zinc. The resulting simulation model biosensor system sold display the entire spectrum of values for each element. By increasing the number of analytes and increase the sensors into n pieces, displayed or averaged measurement results, or only their maximum values. To construct a computer simulation model to use Visual Studio 2012 program because it offers a variety of programming and flexibility of presenting the results. Developed software implementation of the system (BioResours), which includes several simulation models of biosensors. Conducted usability testing of computer simulation models, namely the display of the results obtained is graphically displayed in one view window. It emphasizes the relevance of modeling and perspectives of the obtained configurations. The possible prospects of development of the BSS, their advantages and disadvantages relative to traditional monitoring methods.

Biosensor; adsorption; immobilization; monitoring; model; piezoelectric element; strain.

Введение. При наблюдающемся росте антропогенной нагрузки на окружающую среду и увеличении количества видов выявляемых загрязняющих веществ характерно повышение требований, предъявляемых к методам и средствам контроля качества природной среды. Современные достижения технических наук и биотехнологий позволили создать специализированные приборы и устройства – биодатчики и биосенсорные системы (БСС) для решения актуальных природоохранных задач.

Действующая в настоящее время система химико-аналитического контроля качества окружающей среды нуждается в совершенствовании. К сожалению, к настоящему времени применяемый на практике экоаналитический мониторинг основан на учете малого количества веществ.

Оценка качества воды производится по ограниченному числу специфических и интегральных показателей. В подобном случае выбор основных показателей, необходимых для контроля, часто является не вполне верным, так как проведен без учета идентификации действительного компонентного состава загрязнений и не-

редко включает анализ зачастую гигиенически малозначимых соединений. За основу большей части всех методов контроля, используемых как в нашей стране, так и в ряде других государств, взят принцип целевого или единичного определения искомым веществ или групп соединений. При проведении аналитического мониторинга данный подход будет недостаточным. Водные объекты (вода из рек и озер, вода питьевая, бутилированная, обработанная различными технологиями водоподготовки) с точки зрения химико-аналитического исследования – это объект неизвестного состава, в котором можно ожидать присутствия практически любых соединений. Это создает необходимость перехода от гигиенической оценки качества воды к оценке компонентного состава с учетом соединений, по сути содержащихся или образующихся в результате процессов обеззараживания или очистки исследуемой пробы [1].

Научная задача. Биосенсорные системы (БСС) представляют собой совокупность миниатюрных устройств биосенсоров, которые либо дублируют друг друга в системе, тем самым уменьшая погрешность измерения, либо расширяют спектр измерений всей системы. [2] В биосенсорах между реагентом и определяемым веществом проходит специфическая химическая реакция. Это может быть либо прямое взаимодействие реагента с определяемым веществом, как в случае реакции антиген/антитело, либо каталитическое взаимодействие иммобилизованного фермента с определяемым веществом с образованием легко определяемого продукта. Пьезокварцевые биосенсоры могут применяться для анализа водных растворов в достаточно широком диапазоне концентраций [3].

Очевидно, что измерение показателей состава и свойств воды в системах экологического контроля должно опираться на количественные показатели, являющиеся основанием для определения соответствия качества воды требованиям тех или иных ее «потребителей», включая обитателей водных объектов.

На рис. 1 представлена общая структурная схема БСС, биосенсорный мост может состоять из n количества биосенсоров, но уменьшение их числа целесообразно как с экономической точки зрения, так и при технической реализации.

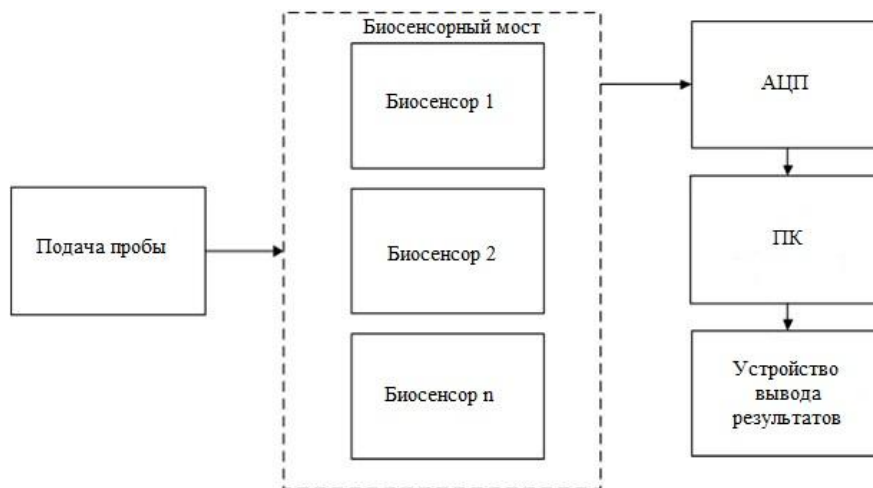


Рис. 1. Структурная схема биосенсорной системы

Подача пробы осуществляется перистальтическим насосом на поверхность каждого биосенсора для обеспечения постоянного давления жидкости на детектирующей поверхности. Проба, поступая на биосенсорный мост, состоящий из n био-

сенсоров, взаимодействует с каждым биослоем, который зависит от функциональных характеристик самих биосенсоров в целом. Сигналы, полученные при измерении, оцифровываются при помощи АЦП, после чего полученные результаты поступают на ПК. Данные по каждому из искомого вещества можно представить в виде среднего значения, либо зафиксированных максимумов значений, а также в виде откликов по искомому веществу каждого из элементов биосенсорного моста.

Рассмотрим БСС для трех веществ: хлора, кадмия и цинка на примере имитационной компьютерной модели пьезокварцевого биосенсора. При осаждении вещества на поверхности этого устройства происходит понижение резонансной частоты пластины. Масса осажденного вещества связана с изменением резонансной частоты соотношением Заурбрея [4]:

$$C = \frac{A \sqrt{\rho_{кв} \mu_{кв}}}{2f_0^2},$$

где A – площадь пластины, $\rho_{кв}$ – плотность кварца, $\mu_{кв}$ – сдвиговый модуль упругости кварца, f_0 – исходная частота резонанса.

Далее биосенсор подключают к колебательному контуру, который, в свою очередь, калибрует ноль.

Следовательно, основными атрибутами биосенсора будут являться частота резонанса и площадь резонатора.

На основе математической модели, полученной из соотношения Заурбрея, строится компьютерная имитационная модель пьезокварцевого биосенсора. Модель была реализована в среде прикладного программного пакета, соответствующего характеру рассматриваемой задачи. Для решения математических задач и построения интерфейса использована программа Microsoft Visual Studio 2012, сочетающая в себе простоту работы и расширенные возможности представления результатов [5].

Полученная модель получила название BioResorse, создана для изучения отклика пьезокварцевого биосенсора и его отклика на загрязнители в водных средах. На ее основе и будет построена БСС.

В фиксированном объеме разбавлено 60 мкг/мл хрома, пьезокварцевый биосенсор с биослоем *Pseudomonas fluorescens* 2–79 способен определить количество примеси, равное 53,3 мкг/мл. В таком случае его погрешность в процентном соотношении будет около 12 %, а минимальное количество вещества, которое он способен обнаружить, – 7 мкг/мл. В данном подходе чем точнее мы можем определить концентрацию вещества в эталонной жидкости, тем точнее биосенсор будет откалиброван под искомое вещество.

На рис. 2 отображены входные параметры преобразователя пьезокварцевого биосенсора и определен порог его чувствительности в мкг/мл.

Из рис. 3, на котором показаны отклики преобразователей сигнала со штаммом *Pseudomonas putida* BS3701 и *Comamonastestosteroni*, видно, что возникает проблема определения принадлежности результата к конфигурации биосенсора. Также возникает сложность определения отклика по типу вещества, в БСС используются биосенсоры, реагирующие на несколько элементов [6].

Для этого каждый из биосенсоров снабжен характерным атрибутом, то есть цветом. В зависимости от реализации БСС атрибуты могут меняться. Так как один биослой реагирует на несколько загрязнителей одновременно, то может произойти ошибка определения поллютанта даже при использовании одного биосенсора.

The screenshot shows two panels in the BioResource application. The left panel, titled 'ПКБ', contains the following input fields: 'Частота резонатора' (Resonator frequency) set to 10 МГц, 'Площадь резонатора' (Resonator area) set to 1 см², and 'Коэффициент чувствительности' (Sensitivity coefficient) set to 53,2937. The right panel, titled 'Колебательный контур' (Resonant circuit), contains: 'Емкость' (Capacitance) set to 12 нФ and 'Индуктивность' (Inductance) set to 2,1129 мГн. Both panels have a 'Расчитать' (Calculate) button at the bottom.

Рис. 2. Входные параметры кварцевого преобразователя и определение порога чувствительности

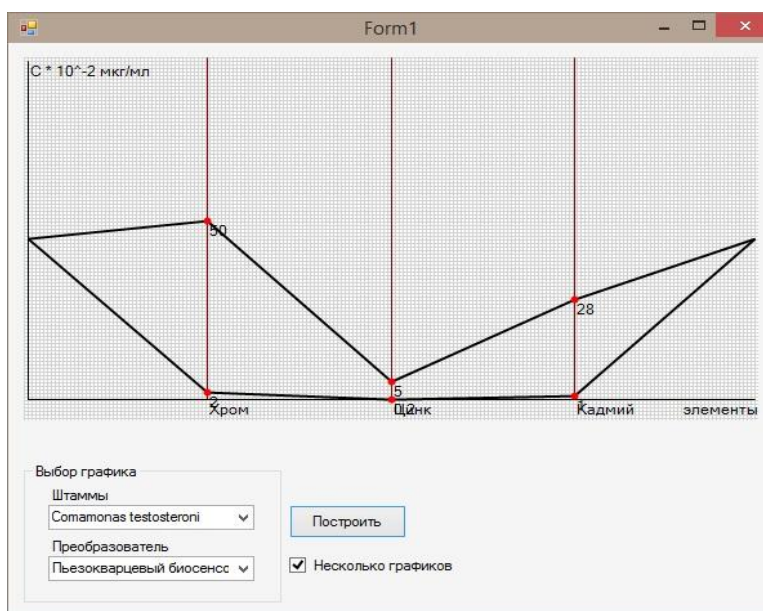


Рис. 3. Графики для экспериментальных значений пьезокварцевых биосенсоров

В рассматриваемой имитационной модели фиксированы значения по биослою, они являются табличными или эталонными, что исключает такую погрешность.

При построении реальной биосенсорной системы с биосенсором определяющим сразу несколькими элементами в жидкости, аналогично программной реализации, потребуется присвоить атрибут по каждому из веществ для исключения ошибки в обработке результата. Таким атрибутом будет временная экспоненциальная зависимость. По каждому из элементов чувствительность различна и для элемента с наибольшей чувствительностью экспонента будет более резко возрастать до насыщения за один и тот же интервал времени. При этом минимальный временной интервал должен определяться экспериментально по каждому из биосенсоров. На этапе программной реализации такой задачи не ставилось. [7]

Компьютерная имитационная модель снабжена функцией отображения нескольких графиков одновременно, различных биосенсоров. При отображении графиков используются разные цвета, что позволяет наглядно оценить результаты одновременно для нескольких комбинаций штаммов (рис. 4).

Штамм в данной биосенсорной системе является элементом биологически активного слоя для селекции и обнаружения искомого элемента [8].

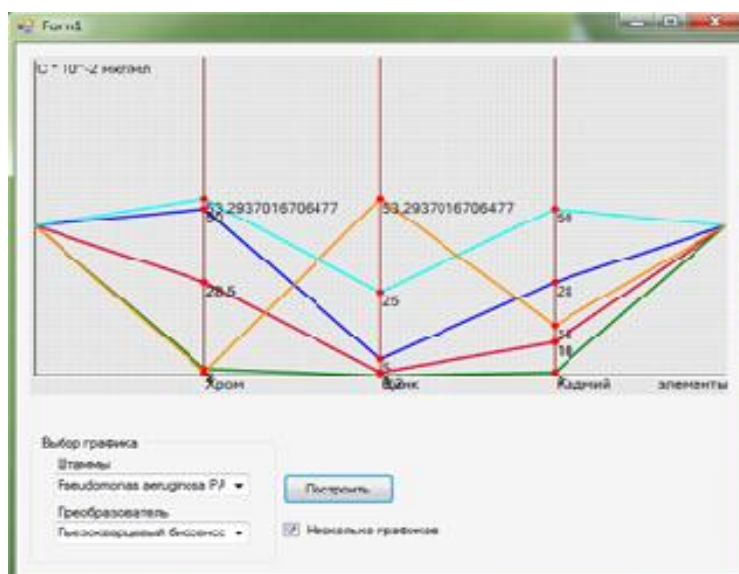


Рис. 4. Графики для экспериментальных значений пьезокварцевых биосенсоров с атрибутом по цвету

На графике несколько значений были заменены на значение коэффициента чувствительности преобразователя. Это связано с тем, что ограничение определения загрязнителя выбирается по меньшему значению чувствительности штамма [9].

Рассмотрим полученные результаты отклика биосенсоров, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения отклика биосенсоров, полученные с помощью программных средств

Конфигурации биосенсоров		Хром 10^{-2} мкг/мл	Цинк 10^{-2} мкг/мл	Кадмий 10^{-2} мкг/мл
Преобразователь	Штамм			
Пьезокварцевый биосенсор	Pseudomonasputida BS3701	2	0,2	1
Пьезокварцевый биосенсор	Comamonastestosteroni	50	5	28
Пьезокварцевый биосенсор	Pseudomonasputida mt-2	28,5	1	10
Пьезокварцевый биосенсор	Pseudomonas fluorescens 2-79	53,3	25	50
Пьезокварцевый биосенсор	Pseudomonas aeruginosa PAK NP1	1	53,3	15

При построении БСС из табл. 1 выберем ряд биосенсоров для эффективного обнаружения хрома, цинка и кадмия.

1. Пьезокварцевый биосенсор со штаммом *Pseudomonas fluorescens* 2-79, который показал высокую чувствительность к хрому и кадмию.
2. Со штаммом *Pseudomonas aeruginosa* PAK NP1, который был наиболее чувствителен к цинку.

Выбрано два биосенсора, которые в совокупности создают систему, не упускающую ни одного загрязняющего вещества из рассматриваемых. Значения откликов полученной биосенсорной системы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения откликов БСС

Конфигурации биосенсоров		Хром 10^{-2} мкг/мл	Цинк 10^{-2} мкг/мл	Кадмий 10^{-2} мкг/мл
Преобразователь	Штамм			
Пьезокварцевый биосенсор	<i>Pseudomonas fluorescens</i> 2-79	53,3	25	50
Пьезокварцевый биосенсор	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PAK NP1	1	53,3	15

Преимущество такой биосенсорной системы перед моносенсорной (состоящей из одного биосенсора) очевидна, так как моносенсорная система не способна обеспечить результат с погрешностью на уровне 15 % [10].

На рис. 5 отображена диаграмма откликов построенной БСС, состоящей из двух биосенсоров. Полученные отклики по каждому рассмотренному элементу (хрому, цинку, кадмию) инфицированы цветом и наглядно соотношены с установленной ранее необходимой 15 % погрешности.

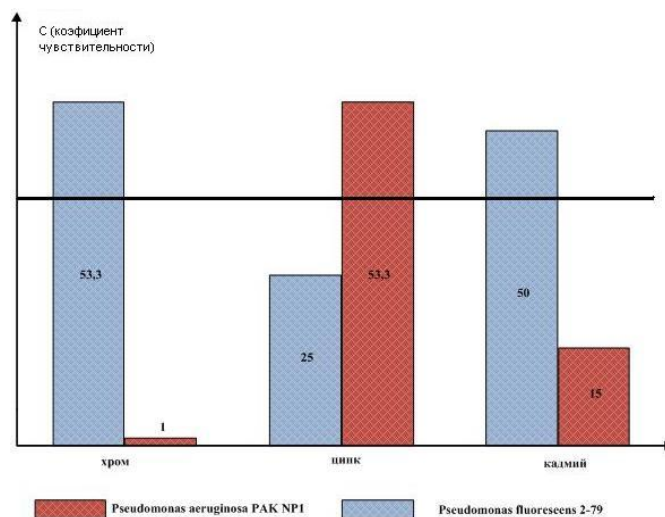


Рис. 5. Результаты полученной БСС по хрому, цинку и кадмию в соотношении к погрешности 15 %.

Как видно из рис. 5 биосенсоры компенсируют друг друга на плохо определяемых веществах и создают такую систему, заменить которую не способен ни один биосенсор, работая индивидуально. Усреднять полученные результаты по одному веществу не целесообразно, так как теряется смысл всей системы, направленной на выбор лучшего единичного определения.

Работая исключительно с максимумами значений, исключается помеха неоткалиброванного сенсора. Особенно это актуально для БСС с большим количеством биосенсоров [11, 12].

При увеличении количества определяемых поллютантов и увеличении сенсоров на n штук, в имитационной модели биосенсорной системы каждому сенсору присвоена строка в матрице и столбец значениям определяемых веществ этим сенсором. Из полученной матрицы значений одним из методов сортировки (быстрая сортировка, пузырьковая сортировка, сортировка Shell) выявляются максимумы в каждом столбце, т.е. наилучшие отклики биосенсора по веществу, и выводятся на график, идентифицируя каждое значение номером биосенсора в строке (рис. 6) [13–15].

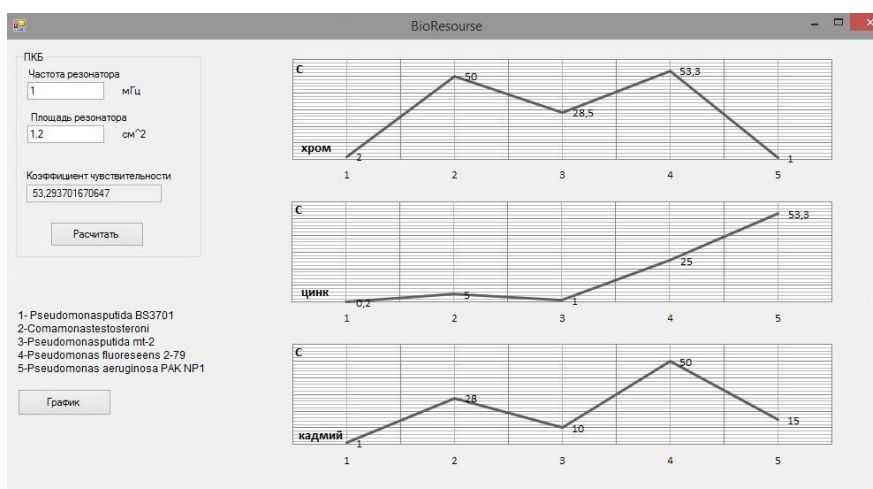


Рис. 6. Вывод результатов по веществам

В случае, когда количество биосенсоров в системе велико и отображение результатов по каждому из откликов становится невозможно, результаты могут быть представлены в виде усредненного значения или по определениям максимума [16].

При использовании разных типов преобразователей в биосенсорах можно создать систему, которая будет работать практически в любых условиях, к примеру, преобразователи механического типа очень чувствительны к температуре, проявляют большую погрешность измерения и обусловлены сложной калибровкой системы [17, 18]. При наличии дублирующего блока биосенсоров химического типа мы можем сохранить функциональность системы в условиях повышенных температур.

Заключение. Биосенсорная система обладает рядом преимуществ:

1) увеличение спектра мониторинга перед простыми моносенсорными системами [19];

2) система является универсальной, так как биосенсоры подбираются индивидуально в зависимости от количества определяемых веществ. Практически под любые требования можно создать систему, просто комбинируя биосенсоры.

Наряду с несомненными достоинствами предлагаемая система имеет и ряд недостатков:

1) сложности при создании программного обеспечения, поддерживающего обработку потока измерений [20];

2) так же вызывает определенные трудности создание универсальной платформы, на базе которой можно использовать различные типы биосенсоров;

3) требуется высокая квалификация специалистов для работы с данной системой.

Выводы. И все же данное направление является одним из самых перспективных в мониторинге загрязнения водных сред. По мере внедрения в практику и разработки программного обеспечения, все проблемы могут быть успешно решены.

Предложенная биосенсорная система, использующая биосенсорный мост, с чувствительностью по нескольким определяемым им веществам в несколько раз сокращает количество элементов в системе, упрощает обработку полученных результатов, и исключает возможность ошибки, так как все возможные отклики сенсоров будут учитываться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тернер Э., Карубе И., Уилсон Д. Биосенсоры: основы и приложения. – М.: Мир, 1992. – 614 с.
2. Вишневецкий В.Ю. Проектирование системы мониторинга водных ресурсов // Известия ТРТУ. 2004. – № 6 (41). – С. 207-209.
3. Егоров А.А. Систематика, принципы работы и области применения датчиков // Журнал радиоэлектроники. – 2009. – № 3. – С. 35-46.
4. Вишневецкий В.Ю., Строчан Т.П. Имитационная модель кварцевого биосенсора для экологических исследований // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1755>.
5. Вишневецкий В.Ю., Старченко И.Б., Ледеява В.С., Строчан Т.П. Моделирование биосенсоров для построения системы определения степени токсичности водной среды // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3. – С. 129-139.
6. Вишневецкий В.Ю., Строчан Т.П. Биосенсор для мониторинга водной среды // Материалы Шестой Всероссийской научной конференции «Экология 2011-море и человек». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 138-144.
7. Штугун Л.К. Проточно-инжекционный анализ // Журнал аналитической химии. – 1990. – Т. 45, № 6. – С. 1045-1091
8. Van der Linden. Classification and Definition of Analytical Methods Based on Flowing Media // Pure and Appl. Chem. – 1994. – Vol. 66, No. 12. – P. 2494-2500.
9. Trojanowicz M. Flow Analysis as Advanced Branch of Flow Chemistry // Mod Chem appl. – 2013. – No. 1: 104. doi:10.4172/mca.1000104.
10. Будников Г.К. Биосенсоры как новый тип аналитических устройств // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 12. – С. 26-32.
11. Юрченко М.А., Шиккульская О.М. Разработка математического и информационно-программного обеспечения для исследования влияния тяжелых металлов на состояние водной экосистемы // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 2 (18). – С. 85-93.
12. Kröger S., Law R.J. Biosensors for marine applications: We all need the sea, but does the sea need biosensors? // Biosensors and Bioelectronics. – 2005. – Vol. 20, Issue 10. – P. 1903-1913.
13. Bogdanovskaya V.A., Tarasevich M.R. Electrochemical biosensors for medicine and ecology // Biosensors and Bioelectronics, 1996. – Vol. 11, Issue 9. – P. 853-861.
14. Korpan Y.I., Dzyadevich S.V., Zharova V.P., El'skaya A.V. Conductometric biosensor for ethanol detection based on whole yeast cells // Ukr Biokhim Zh. – 1994. – Vol. 66 (1). – P. 78-82.
15. Mwinjihija M., Strachan N.J.C., Meharg A., Killham K. Biosensor based toxicity dissection of tannery and associated environmental samples // Journal of the American Leather Chemists Association. – 2005. – Vol. 100 (12). – P. 481490.
16. Sakaguchi T., Kitagawa K., Ando T., Murakami Y., Morita Y., Yamamura A., Yokoyama K., Tamiya E. A rapid BOD sensing system using luminescent recombinants of Escherichia coli // Biosens. Bioelectron. – 2003. – Vol. 19 (2). – P. 115-121.
17. Van der Linden. Classification and Definition of Analytical Methods Based on Flowing Media // Pure and Appl. Chem. – 1994. – Vol. 66, No. 12. – P. 2494-2500.
18. Ruzicka J., Elo H. Hansen Flow injection analysis principles, applications and trends // Chem. Papers. – 1980. – Vol. 114, No. 15. – P. 19-44.
19. Кузнецов В.В. Проточно-инжекционный анализ // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 11. – С. 56-60.
20. Merlos Rodrigo M.A., Zitka O. Analysis of Cadmium-Phytochelatin 2 Complexes Using Flow Injection Analysis Coupled with Electrochemical Detection Mass Spectrometry. Sci. 8. – 2013. – P. 4409-4421.

REFERENCES

1. *Terner E., Karube I., Uilson D.* Biosensory: osnovy i prilozheniya [Biosensors: fundamentals and applications]. Moscow: Mir, 1992, 614 p.
2. *Vishnevetskiy V.Yu.* Proektirovanie sistemy monitoringa vodnykh resursov [Design of monitoring system of water resources], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2004, No. 6 (41), pp. 207-209.
3. *Egorov A.A.* Sistematika, printsipy raboty i oblasti primeneniya datchikov [Systematics, principles of operation and applications of sensors], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2009, No. 3, pp. 35-46.
4. *Vishnevetskiy V.Yu. Strochan T.P.* Imitatsionnaya model' kvartsevoogo biosensora dlya ekologicheskikh issledovaniy [A simulation model of the quartz biosensor for environmental studies], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2013, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1755>.
5. *Vishnevetskiy V.Yu., Starchenko I.B., Ledyayeva V.S. Strochan T.P.* Modelirovanie biosensora dlya postroyeniya sistemy opredeleniya stepeni toksichnosti vodnoy sredy [Modeling biosensors to build a system of determining the degree of toxicity of the aquatic environment], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2013, No. 3, pp. 129-139.
6. *Vishnevetskiy V.Yu., Strochan T.P.* Biosensor dlya monitoringa vodnoy sredy [Biosensor for monitoring of the aquatic environment], *Materialy Shestoy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Ekologiya 2011-more i chelovek»* [Materials of the Sixth all-Russian scientific conference "Ecology 2011-the sea and man"]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, pp. 138-144.
7. *Shpigun L.K.* Protochno-inzheksionnyy analiz [Flow-injection analysis], *Zhurnal analiticheskoy khimii* [Journal of Analytical Chemistry], 1990, Vol. 45, No. 6, pp. 1045-1091.
8. *Van der Linden.* Classification and Definition of Analytical Methods Based on Flowing Media, *Pure and Appl. Chem.*, 1994, Vol. 66, No. 12, pp. 2494-2500.
9. *Trojanowicz M.* Flow Analysis as Advanced Branch of Flow Chemistry, *Mod Chem appl.*, 2013, No. 1: 104. doi:10.4172/mca.1000104.
10. *Budnikov G.K.* Biosensory kak novyy tip analiticheskikh ustroystv [Biosensors as a new type of analytical devices], *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1996, No. 12, pp. 26-32.
11. *Yurchenko M.A., Shikul'skaya O.M.* Razrabotka matematicheskogo i informatsionno-programmnogo obespecheniya dlya issledovaniya vliyaniya tyazhelykh metallov na sostoyanie vodnoy ekosistemy [Development of mathematical and software for studying the effects of heavy metals on the aquatic ecosystem], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2012, No. 2 (18), pp. 85-93.
12. *Kröger S., Law R.J.* Biosensors for marine applications: We all need the sea, but does the sea need biosensors?, *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, Vol. 20, Issue 10, pp. 1903-1913.
13. *Bogdanovskaya V.A., Tarasevich M.R.* Electrochemical biosensors for medicine and ecology, *Biosensors and Bioelectronics*, 1996, Vol. 11, Issue 9, pp. 853-861.
14. *Korpan Y.I., Dzyadevich S.V., Zharova V.P., El'skaya A.V.* Conductometric biosensor for ethanol detection based on whole yeast cells, *Ukr Biokhim Zh.*, 1994, Vol. 66 (1), pp. 78-82.
15. *Mwinyihija M., Strachan N.J.C., Meharg A., Killham K.* Biosensor based toxicity dissection of tannery and associated environmental samples, *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2005, Vol. 100 (12), pp. 481-490.
16. *Sakaguchi T., Kitagawa K., Ando T., Murakami Y., Morita Y., Yamamura A., Yokoyama K., Tamiya E.* A rapid BOD sensing system using luminescent recombinants of *Escherichia coli*, *Biosens. Bioelectron.*, 2003, Vol. 19 (2), pp. 115-121.
17. *Van der Linden.* Classification and Definition of Analytical Methods Based on Flowing Media, *Pure and Appl. Chem.*, 1994, Vol. 66, No. 12, pp. 2494-2500.
18. *Ruzicka J., Elo H.* Hansen Flow injection analysis principles, applications and trends, *Chem. Papers.*, 1980, Vol. 114, No. 15, pp. 19-44.
19. *Kuznetsov V.V.* Protochno-inzheksionnyy analiz [Flow-injection analysis], *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1999, No. 11, pp. 56-60.

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

Вишневецкий Вячеслав Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: vvu@fep.tti.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; к.т.н.; доцент.

Строчан Тимур Петрович – e-mail: strochan.timur@rambler.ru; аспирант.

Vishnevetskiy Vyacheslav Yur'evich – Southern Federal University; e-mail: vvu@fep.tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; cand. of eng. sc.; associate professor.

Strochan Timur Petrovich – e-mail: strochan.timur@rambler.ru; postgraduate student.

УДК 581.1

И.А. Кипнис, Ю.М. Вернигоров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ВОДЫ В МНОГОУРОВНЕВОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ*

В литературе отсутствует единое мнение о природе сил, обеспечивающих подъем и распределение воды в ксилеме растений. В ряде работ показано, что, исходя из капиллярной модели, подъем воды в ксилеме происходит силами поверхностного натяжения в мениске капилляра ксилемы и линия, соединяющая мениски воды в капиллярах, образует фигуру, соответствующую форме кроны дерева или листа. Диаметр ветвей деревьев обычно меньше диаметра ствола. Также соотносятся и водопроводящие структуры, содержащиеся в стволах и ветвях. Но до настоящего времени в литературных источниках не рассматривался вопрос о закономерностях продвижения, и распределения воды в ветвящихся капиллярных системах с различным соотношением параметров ветвей разного уровня. В работе рассмотрена модель с капиллярами разного радиуса. Рассчитано продвижение воды в капиллярах, радиусы которых уменьшаются с ростом номера уровня и определено продвижение воды при условии, что углы наклона капилляров в разных уровнях различны, а расстояние между уровнями расположения капилляров не постоянно. Описанная капиллярная модель позволяет изучить распределение воды при различных диаметрах капилляров, расстояниях между уровнями, а также углах наклона капилляров к горизонтали. Показано, что продвижение воды в наклонных ветвях зависит от параметров капиллярной системы. Распределение воды в капиллярах ксилем растений при всем их многообразии может быть описано и изучено с помощью построенной модели многоуровневой системы капилляров с переменными параметрами, исходя из того, что подъем воды в ксилеме происходит силами поверхностного натяжения в мениске капилляра. Показано, что подъем воды в вертикальном капилляре зависит от количества ветвей и соотношения их параметров и всегда больше, чем в одиночном вертикальном капилляре того же радиуса. Установлено, что высота подъема воды в наклонных капиллярных ветвях зависит от соотношения параметров системы, за исключением угла их наклона, и всегда меньше, чем в одиночном вертикальном капилляре равного радиуса.

Растение; капилляры; ксилема; модель; транспирация.

I.A. Kipnis, Yu.M. Vernigorov

MODELING OF THE ASCENT OF WATER IN CAPILLARY MULTILEVEL SYSTEM WITH VARIABLE PARAMETERS

In the literature there is no consensus about the nature of the forces ensuring the rise and distribution of water in the xylem of plants. In some works it is shown that, based on the capillary model, the rise of water in the xylem occurs by surface tension in the meniscus of the capillary xylem and the line connecting the water menisci in the capillaries, forms a shape corresponding to the shape of the crown of a tree or leaf. The diameter of the branches of trees is usually less than the

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.