

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382:615.47:004.8

**ВОРОБЕЙ**  
Евгений Анатольевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МИКРО-НАНОСИСТЕМЫ  
РАСПОЗНАВАНИЯ СЕНСОРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ  
БИОСРЕД**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальностям 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2012

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель Колешко Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Интеллектуальные системы» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: Пилипенко Владимир Александрович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Государственного центра физико-химических исследований «Белмикрoанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»

Давыдов Максим Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Белорусский государственный университет

Защита состоится «17» января 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач для успешного развития современного общества является разработка высокоэффективных и недорогих микро-наносенсорных систем для широкого практического назначения, в том числе в медико-фармацевтических и конструкторско-аграрно-биотехнологических предприятиях с индивидуальной диагностикой и поддержкой биобезопасности жизнедеятельности человека в любых условиях его местоположения.

В условиях современной жизни традиционные методы диагностики человека уступают место «осенсорным» и «омоторенным» устройствам из-за своей трудоемкости, длительности, низкого диагностического разрешения и ограниченных функциональных возможностей. Существующий широкий класс отечественных и зарубежных разработок ограничен использованием различных методов формирования информационного сигнала при решении одних и тех же задач, применением неинвазивных узкоспециализированных дорогих и высокоточных аппаратно-программных средств, требующих наличия высококвалифицированного персонала, не способных стать доступными для каждого человека.

Микро-наносенсоры лаборатории на кристалле отличаются портативностью, высокой чувствительностью, разрешающей способностью, низким энергопотреблением, большим сроком службы, совместимостью с микропроцессорными цифровыми системами обработки информации и контролем нескольких параметров биосреды. Наряду с ними активно разрабатываются методы анализа поглощающих и рассеивающих свойств объектов в ограниченном ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Однако они не всегда дают объективную оценку о составе, изменении и концентрации отдельных компонент, не учитывают изменения биосред во времени и значительно ограничены для широкого применения. Поэтому возникает необходимость в использовании нового класса перспективной элементной базы – микро-наносенсорных «систем на кристалле» («system on a chip», или SoC) «электронный нос» (е-нос), «электронный язык» (е-язык), «электронный глаз» (е-глаз) для медицины и здоровья человека с интеллектуальной программной средой для распознавания информационных образов биосред. SoC системы должны иметь искусственный интеллект с быстрым самообучением и использованием многоядерных технологий программирования, обладать самоорганизацией своих функционирующих узлов, способностью быстро мыслить и автоматически принимать решения при нестандартных и сложно формализованных задачах классификации в реальном времени, как это делает человек.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом Белорусского национального технического университета (БНТУ) от 11.02.2009 № 700, уточнена научным собранием машиностроительного факультета БНТУ от 26.09.2012, протокол № 1, соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь в области микро-наноэлектроники, медицины, экологии, промышленной биотехнологии, информационных и коммуникационных технологий. Работа выполнялась в БНТУ в период 2008–2012 гг. в рамках научно-исследовательских работ:

– государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «НАНОТЕХ» на 03.01.2006 – 31.12.2010 гг. по заданию 2.05 ГБ 06–89 «Исследование и разработка пьезоактивных сенсорных материалов распыляемых мишеней на основе микро- и нанопорошков нитрида алюминия и оксида цинка с микродобавками соединений редкоземельных элементов для получения многофункциональных сенсорных систем» (инвентарный номер № Н-7571, регистрационный номер № 20064250) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.youtube.com/?v=BVtk\\_9kGLRQ](http://www.youtube.com/?v=BVtk_9kGLRQ);

– НИР ГБ 06–264 «Математическое и физическое моделирование микро-наноструктур и процессов, разработка интеллектуальных технологий и многомерных сенсорных микроэлектромеханических систем и сетей широкого спектра назначения» на 03.01.2006–31.12.2010 гг. (инвентарный номер Н-7480) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.youtube.com/?v=4UblWomXfMQ>;

– гранта Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов ГБ 11-160 «Разработка интеллектуальной системы распознавания информационных образов биосред на основе многоядерной технологии параллельного программирования» на 2011 г. (1.01.2011–31.12.2011 гг. № ГР 20110990 от 23.05.2011 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/1836>;

– НИР ГБ-11-220 «Моделирование наноматериалов, микро-наноструктур и физических процессов, микро-наносенсоров и многомерных МЭМС/НЭМС, разработка интеллектуальных технологий кодирования и распознавания информационных образов и беспроводных интеллектуальных сенсорных сетей» на 2011 г. (инвентарный номер № Н-7571, регистрационный номер № 20064250).

## Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка интеллектуальных микро-наносистем на кристалле «электронный нос» (е-нос), «электронный язык» (е-язык) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и «электронный глаз» (е-глаз) для распознавания информационных образов биосред человека (кровь, слюна, пот) и поддержки его здоровья, продуктов питания и почв для их выращивания и биобезопасности жизнедеятельности, сенсорных микро- и наноматериалов для прогнозирования их количественных и качественных характеристик.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать технологию и конструкции ПАВ микро-наносенсорных систем на кристалле е-язык и е-нос на основе  $\text{Si}_{<001>\{100\}}\text{SiO}_2\text{ZnO(AlN)}$  с углеродными нанотрубками (УНТ), исследовать тензо-и сенсорные свойства микро- и наноматериалов под влиянием внешних условий и биосред.
2. Разработать LED регистрацию на кристалле е-глаз для анализа коэффициентов отражения оптического излучения (380–2400 нм) для биосред.
3. Разработать гипер-метаэвристическую интеллектуальную систему для представления и классификации информационных образов биосред.
4. Исследовать информационные образы биосред человека и биобезопасность продуктов питания.

Объект исследования – биологические жидкости человека (кровь, слюна, пот), продукты питания и почвы для их выращивания, сенсорные микро- и наноматериалы.

Предмет исследования – информационные образы биосред, построенные по данным е-носа, е-языка и е-глаза.

## Положения, выносимые на защиту

1. Исследованы электрофизические и сенсорно-чувствительные свойства материалов и тонкопленочных структур для производства сенсоров на поверхностных акустических волнах (ПАВ), используемых с целью развития научных основ методологии сенсорных информационных образов для управляемого синтеза перспективных сенсорных микро- и наноматериалов электронной техники, что позволило разработать портативную высокопроизводительную ПАВ микро-наносенсорную лабораторию на кристалле СИС-5 «электронный язык» (е-язык) и «электронный нос» (е-нос) на основе структур  $\text{Si}_{<001>\{100\}}\text{SiO}_2\text{ZnO(AlN)}$  с углеродными нанотрубками при рабочих частотах 100–1000 МГц и с ПАВ ретранслятором частотой 2,4 ГГц для широкого практического назначения.

2. Теоретически и экспериментально обоснован оптико-электронный метод контроля параметров углеродных нанотрубок (УНТ) для «электронного языка» (е-язык) и «электронного носа» (е-нос) портативной микро-наносенсорной системы СИС-5, основанный на использовании «электронного глаза» (е-глаз) на кристалле для неинвазивной регистрации информационных образов сенсорных микро- и наноматериалов в широкополосном спектральном диапазоне длин волн 380–2400 нм и самоорганизующейся многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией, что позволило прогнозировать количественные и качественные характеристики УНТ (концентрация легирующих добавок, максимальный и средний диаметры УНТ, количество УНТ размерами 0,02–0,07 мкм) и пьезокерамических материалов ZnO и легирующих добавок  $YFe_3$ , 5 %  $Y_2O_3$ .

3. Доказана эффективность разработанной метаэвристической интеллектуальной системы, метода классификации, контроля и отображения карт-знаний медико-биологических параметров любых биосред в виде их сенсорных информационных образов, синтезируемых по данным «электронного языка» (е-язык), «электронного носа» (е-нос), «электронного глаза» (е-глаз) СИС-5 с использованием самоорганизующейся многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией (МГИНС), что позволило достичь их высокоэффективного прогнозирования (до 1,5–10 раз) по критерию ошибки и (до 650 раз) по скорости самообучения при поддержке жизнедеятельности человека и определении поражающего влияния различных физических факторов в отличие от существующих вероятностных и нейросетевых алгоритмов классификации.

4. Разработана инновационная концепция самооптимизации нейроархитектуры многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией в виде гиперэвристической интеллектуальной системы, способной для каждой биосреды подобрать свой способ эффективного многоядерного самообучения (до 1,5–8 раз) по качеству прогнозирования путем оценки значимости сенсорных признаков «электронного языка» (е-язык), «электронного носа» (е-нос), «электронного глаза» (е-глаз) СИС-5 или их совокупностей с высокоориентированным поиском глобальной максимизации точности при автоматическом принятии решений.

5. Разработана методология анализа и представления сенсорных информационных образов биосред для получения комплексных результатов исследований биологических жидкостей человека (кровь, слюна, пот) и биобезопасности продуктов питания, что позволило доказать возможность и эффективность описания количественных и качественных характеристик внутреннего состояния биосистемы, причем для прогнозирования отдельного свойства биосреды подходит только определенная технотекстура распознавания многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией.

## **Личный вклад соискателя**

В диссертации изложены результаты работ, выполненных автором самостоятельно. Хмурович Н.В – начальник отдела науки и инноваций «Белбиофарм», заместитель директора научно-производственного республиканского УП «ЛОТИОС» Департамента фармацевтической промышленности Министерства здравоохранения Республики Беларусь – участвовала в выборе биосред для исследования и интерпретации вопросов анализа биологических и фармацевтических сред. Определение целей, научных и инновационных идей, обсуждение полученных результатов исследований проводилось совместно с научным руководителем, д-м техн. наук, профессором В.М. Колешко.

## **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на II Международной научной конференции «Современные информационные и телемедицинские технологии для здравоохранения (АІТН'2008)» (Минск, Беларусь, 2008 г.), V, VI Международных конференциях-форумах «Информационные системы и технологии (IST)» (Минск, Беларусь, 2009, 2010 гг.), 5<sup>th</sup>, 6<sup>th</sup> IEEE International Conferences «Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)» (Zakarpattyа, Ukraine, 2009, 2010 гг.), II Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь–Россия–Украина (НАНО – 2010)» (Киев, Украина, 2010 г.), VI Международной научнотехнической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии (Медэлектроника – 2010)» (Минск, Беларусь, 2010 г.), I, II Korea-Belarus Science and Technological Seminars (Minsk, Belarus 2010, 2011 гг.), I Научно-практической Интернет-конференции «Актуальные проблемы биохимии и бионанотехнологий» (Казань, Россия, 2010 г.), II Всероссийском научном семинаре «Оптика нано- и микроструктур» (Самара, Россия, 2010 г.), Международном студенческом кубке технологий Imagine Cup в конкурсе проектов «Региональные командные студенческие соревнования Imagine Cup 2009 в категории Software Desing» (Минск, Беларусь, 2009 г.), IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (Coimbatore, India, 2012 г.), IEEE-EMBS International Conference on Micro- and Nanoengineering in Medicine (Ka'aanapali, USA, 2012 г.), 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, the 13<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Intelligent Systems (Kobe, Japan, 2012 г.), III Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы медицины» (Москва, Россия, 2012 г.).

## **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 34 работы, в том числе 1 монография (1,95 авторских листа), 2 зарубежные коллективные монографии (4,23 авторских листа), 10 работ в рецензируемых научных журналах и сборниках научных трудов (7,82 авторских листа), 12 статей в сборниках материалов научных конференций, конгрессов, 8 тезисов докладов.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения. В первой главе приведен анализ литературных данных по методам анализа и распознавания биосред. Во второй главе изложена технология производства микро-наносенсорных систем на кристалле е-язык, е-нос на ПАВ и е-глаз с LED регистрацией. Третья глава посвящена разработке интеллектуальных гипер-метаэвристических способов исследования, построения и распознавания информационных образов биосред с быстрым самообучением, интуитивным распознаванием и картами-знаний полного разума. Четвертая глава содержит результаты распознавания количественных и качественных свойств сенсрных микро- и наноматериалов (УНТ, порошковые соединения на основе ZnO, легирующие добавки  $YFe_3$ , 5%  $Y_2O_3$ ). В пятой главе приведены комплексные результаты исследований е-языком, е-носом, е-глазом биологических жидкостей человека, продуктов питания и почв для их выращивания.

Общий объем диссертационной работы составляет 154 страниц, из них 76 страниц основного текста, 56 иллюстраций на 29 страницах, 40 таблиц на 13 страницах, библиографический список из 239 наименований на 19 страницах, который включает 34 собственные публикации автора на 6 страницах, и 2 приложения на 11 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложена ее краткая характеристика, сформулированы основные задачи, объект и предмет исследований.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору по теме диссертации, выбору и обоснованию направления исследований. Биобезопасность



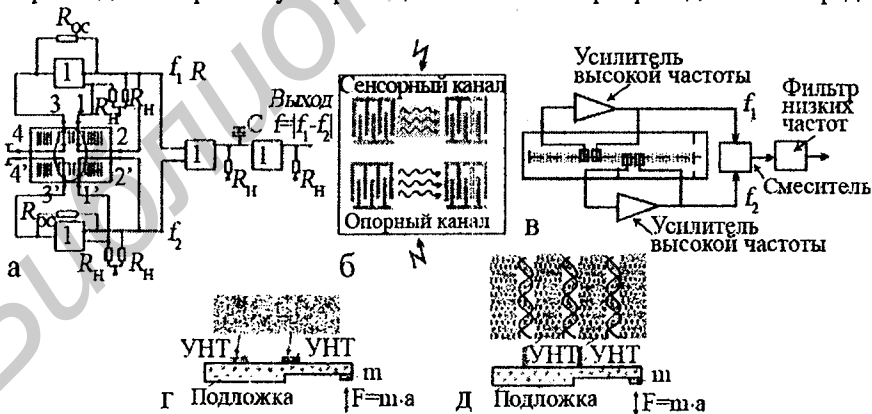
жизнедеятельности человека зависит от условий его проживания, питания, используемых им предметов гигиены, эмоциональной и психической окружающей обстановки. Необходима неинвазивная медицина для всех и каждого в отдельности человека с целью индивидуального мониторинга его здоровья и жизнедеятельности с помощью портативных микро-наносенсоров.

Во второй главе изложена технология проектирования микро-наносенсорных систем на кристалле е-язык, е-нос на ПАВ и е-глаз с LED регистрацией. Разработаны е-язык и е-нос на ПАВ на основе слоистой структуры  $\text{Si}_{1-x}\text{O}_2/\text{ZnO}(\text{AlN})$  при рабочих частотах 100–1000 МГц с гибридной технологией, включающей ПАВ резонаторы и линии задержки или дифференциальную схему из двух резонаторов, двух линий задержки или одной линии задержки и одного резонатора (рисунок 1).



Рисунок 1 – Е-язык и е-нос для анализа биосред

На рисунке 2 показаны е-язык и е-нос на ПАВ с двумя линиями задержки и с металлизацией Ni и Cu для создания термостойких микро-наноструктур с вертикально/горизонтально ориентированными УНТ. Одна линия задержки измеряет механические параметры (вязкость, массу, импеданс), а вторая – диэлектрическую проницаемость и электропроводность биосреды.



а, б, в – на ПАВ генераторах; г, д – варианты размещения УНТ и биосред на ПАВ линии задержки

Рисунок 2 – Структурная схема е-языка и е-носа

Разработана лаборатория на кристалле размерами  $32 \times 20$  мм с резервуаром для биосреды  $6,8 \times 2,5 \times 8$  мм в центре и объемом 136 мкл, с ПАВ ретранслятором частотой 2,4 ГГц и мощностью 10 Вт. Реализована LED регистрация с е-глазом для исследования внутренних свойств биосреды путем анализа коэффициентов ее отражения в широкополосном диапазоне длин волн 380–2400 нм. Микросветодиоды испускают оптическое излучение, а отраженный световой поток регистрируется микрофотодиодами е-глаза, обрабатывается микроконтроллером и через приемопередатчик передаются в линию связи (рисунок 3).



а – система на кристалле е-нос и е-язык; б – лабораторная мультисенсорная система СИС-5 на ПАВ; в, г – мультисенсорная система СИС-5 с е-глазом

Рисунок 3 – Разработанные устройства с е-языком, е-носом и е-глазом

В третьей главе впервые в мире описана методология анализа информационных образов СИС-5 с е-языком, е-носом и е-глазом посредством электронного полного разума с интуицией и гипер-метаэвристическим принятием решений. Метаэвристика – метод улучшенной оптимизации при принятии суб- и оптимальных решений отдельным алгоритмом эвристического поиска. Гиперэвристика – метод универсальной оптимизации при выборе оптимальных решений из нескольких различных алгоритмов метаэвристического поиска. Эвристика – знания, приобретаемые в процессе интуитивного принятия решений. Полный разум – это гипер-метаэвристическая многокомпонентная гиперсферная интеллектуальная нейронная сеть

(МГИНС) с логическим и интуитивным ускоренным распознаванием сенсорных информационных образов е-носа, е-языка, е-глаза СИС-5, беспроводных сенсорных систем и сетей при классической метрологии. Интуиция – способность интеллектуальной системы чувствовать уже имеющиеся логические цепочки связанной информации и моментально находить ответ на вопрос.

МГИНС отличается от всех известных методов классификации благодаря эффективному самообучению, высокоориентированной самоорганизации, высокоточной самодиагностики и уникальной способности быстро находить решения для сложных задач, для которых решения не известны или таковые не существуют в природе. Это происходит за счет динамической генерации технотрактуры (МГИНС-ОРО, МГИНС-АЗО, МГИНС-ГФ, МГИНС-ГП), автоматического поиска оптимального для распознавания количества технослоев, технонейронов и весовых коэффициентов индивидуальной значимости, построения уравнений гиперплоскостей, гиперсфер и карт-знаний для текущего технонейронного слоя (рисунок 4).

Совокупность данных е-языка, е-носа и е-глаза характеризует информационный образ исследуемой биосреды. Для устранения разной размерности значений е-носа, е-языка и е-глаза МГИНС удаляет тренды методом наименьших квадратов и проводит нормирование сенсорных данных. Информационные образы автоматически формируются в процессе линейных ортогональных преобразований для получения собственных векторов с наибольшими собственными значениями:

$$ГК_{s=1j} = \sum_{i=1}^j w_{is} \cdot t_i, \quad (1)$$

где  $\{ГК_v\}$  – новая система координат, полученная ортонормированными линейными комбинациями исходного пространства  $\{t_j\}$  сенсорных признаков  $j (j>1)$ ;

$t_i$  – значение признака  $i$  после предобработки;

$w_{i=1,v}$  – собственные векторы ковариационной матрицы  $K=T' \cdot T$  с входными нормированными сенсорными данными  $T$ , где  $T'$  – транспонированная матрица.

Расчет собственных векторов и собственных значений матрицы  $K$  осуществляется путем ее сингулярного разложения на множители в виде

$$K=N \cdot D \cdot N, \quad (2)$$

$$Y=T \cdot N, \quad (3)$$

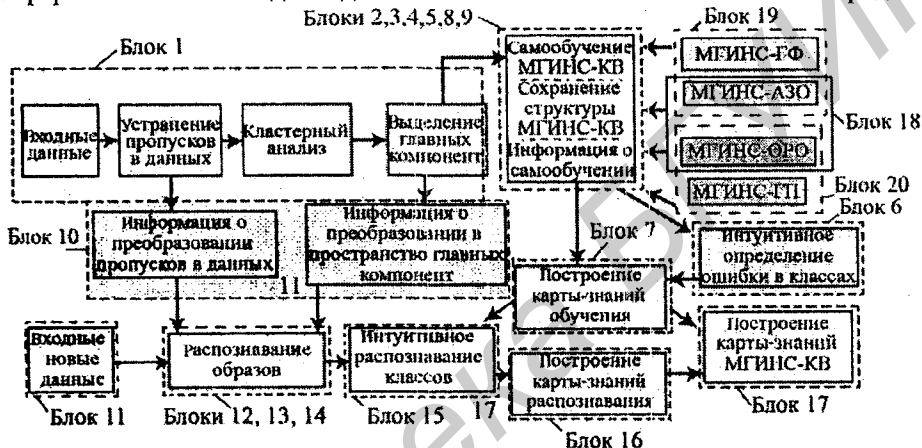
где  $D$  – диагональная матрица с упорядоченными по диагонали по убыванию

собственными числами – значения дисперсий главных компонент;

$N$  – ортогональная матрица собственных векторов матрицы  $K$ , которая позволяет перейти к главным компонентам;

$Y$  – образы исходных данных в пространстве новых компонент  $\{G_k\}$ .

При последовательном выделении главных компонент генерируются факторы с уменьшающейся дисперсией, которая свидетельствует о малой информативности исходных данных в компонентах более высокого порядка.



блок 1 – входные сенсорные данные; блок 2 – смеситель  $\{x_1, w_1, x_2, w_2, x_3, w_3, \dots, x_n, w_n\}$ ; блок 3 – сумматор  $x_1, w_1 + x_2, w_2 + x_3, w_3 + \dots + x_n, w_n + b_0$  с учетом общей величины задержки  $b_0$ ; блок 4 – нелинейный преобразователь; блок 5 – расчет ошибки на этапе обучения; блок 6 – расчет интуиции обучения; блок 7 – построение карт-знаний информационных образов; блок 8 – расчет ошибки самообучения; блок 9 – изменение весовых коэффициентов; блок 10 – сохранение информации; блок 11 – поступление новых данных; блоки 12, 13, 14 – распознавание информационных образов (умножитель, сумматор, нелинейный преобразователь), блок 15 – интуиция распознавания образов с вероятностной принадлежностью к одному из известных классов; блок 16 – построение карты-знаний распознавания; блок 17 – построение карты-знаний МГИНС; блок 18 – расчет оптимального размещения центроидов в многомерном пространстве признаков по МГИНС-АЗО и МГИНС-ОРО; блок 19 – построение уравнений гиперсфер по МГИНС-АЗО (МГИНС-ГФ); блок 20 – построение уравнений гиперплоскостей по МГИНС-ОРО (МГИНС-ГП)

Рисунок 4 – Функциональная схема работы самоорганизующейся МГИНС

Расчет оптимального количества кластеров проводят в следующем виде

$$F_0 = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{k_n} \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^s (x_{ji} - c_{il})^2}{s}} \right) / k_n \rightarrow \text{минимум}, \quad (4)$$

$$F_1 = 2 \cdot \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^s (c_{it} - c_{jt})^2}{s}} \right) / (n^2 - n) \rightarrow \text{максимум}, \quad (5)$$

$$F = \frac{F_1}{F_0} \rightarrow \text{максимум}, \quad (6)$$

где  $F_0$  – средняя величина внутрикластерного расстояния между образами, рассчитанная для всех центров кластеров  $n$  и  $s$  принадлежности к каждому центру кластера  $c_i$  информационных образов  $k_n$  в  $s$ -многомерном сенсорном пространстве;

$F_1$  – среднее межкластерное расстояние между всеми  $n$  кластерами;

$F$  – функционал кластеризации, который при  $F > 1$  приводит к размытию информационных образов в многомерном пространстве и длительному самообучению.

Функционал  $F$  снижает высокую чувствительность МГИНС к случайным искажениям, существенно уменьшает вероятность попадания градиента ошибки обучения в локальный минимум.

Для однослойной МГИНС-ОРО и МГИНС-АЗО имеет место построение уравнений гипербол в центре ассоциативных образов (МГИНС-ГФ) и разделяющих гиперплоскостей (МГИНС-ГП) вида  $b_0 + x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 = 0$ :

$$W = X^n \cdot Y, \quad (7)$$

где  $Y$  – вектор решений целевой функции  $[-1 \ 1]$ ;

$W = [w_1; w_2]$  – весовые коэффициенты для расчета, причем для вычисления  $b_0$  необходимо, чтобы первый столбец матрицы  $X$  состоял из единиц;

$X^n$  – псевдообратная матрица для двух признаков сенсорных данных.

Разработаны методы интуитивного самообучения МГИНС с определением принадлежности новых образов к ранее известным или неизвестным классам. Интуитивная картина на этапе самообучения для двух классов имеет вид

$$Y = (П1 + П2) / (П1 + П2 + Н1 + Н2), \quad (8)$$

где  $Y$  – уверенность распознавания образов;

$П1$  ( $TP$ ) – количество образов 1-го класса, которые отнесены к классу 1;

$П2$  ( $TN$ ) – количество образов 2-го класса, которые отнесены к классу 2;

$Н1$  ( $FP$ ) – количество образов 1-го класса, которые отнесены к классу 2;

$Н2$  ( $FN$ ) – количество образов 2-го класса, которые отнесены к классу 1.

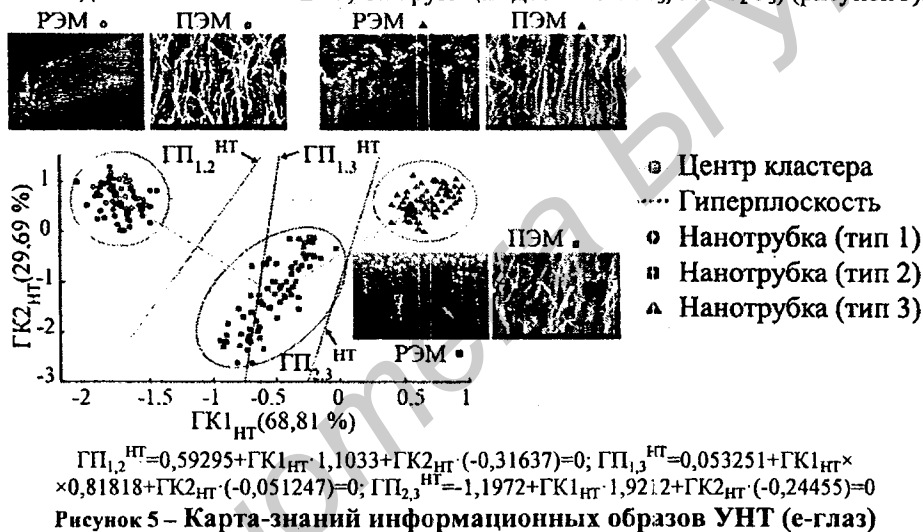
Для каждого из  $N$  сочетаний, например, класса 1 интуиция МГИНС:

$$P_1 = (П1_1 / (П1_1 + Н1_1 + П2_1 + Н2_1) + \dots + П1_n / (П1_n + Н1_n + П2_n + Н2_n)) / N. \quad (9)$$

МГИНС способна построить карту-знаний своего самообучения и распознавания.

Разработана гиперэвристическая интеллектуальная система, способная быстро осуществить ускорение многоядерного самообучения (МИНОА2, МИНОА3, МИНУА) путем анализа значимости сенсорных признаков е-носа, е-языка и е-глаза или их совокупностей с ориентированным поиском глобальной максимизации точности классификации.

В четвертой главе приведены комплексные результаты распознавания информационных образов сенсорных микро- и наноматериалов (УНТ, порошковые соединения на основе ZnO, легирующие добавки YFe<sub>3</sub>, 5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (рисунок 5).



Проекция гиперплоскости ГП<sub>1,2</sub><sup>НТ</sup> на рисунке 5 показана в пространстве первой ГК<sub>1,НТ</sub> и второй ГК<sub>2,НТ</sub> главных компонент в виде уравнения 0,59295 + ГК<sub>1,НТ</sub> · 1,1033 + ГК<sub>2,НТ</sub> · (-0,31637) = 0 и разделяет классы УНТ типа 1 и типа 2. Ее весовые коэффициенты: W<sub>12</sub> = [0,59295 1,1033 -0,31637]. Все три сочетания типов УНТ задают веса W для первого слоя МГИНС. Информативность каждой компоненты описывается процентом от общей дисперсии факторов. ГК<sub>1,НТ</sub> объясняет 68,81 % общей дисперсии, а ГК<sub>2,НТ</sub> – 29,69 %.

СИС-5 с самоорганизующейся МГИНС-ОРО осуществляет прогнозирование свойства F<sub>2</sub> для УНТ типа 2 после самообучения в виде

$$F_2 = (P_{21} \cdot F_1 + P_{23} \cdot F_3) / 2. \quad (10)$$

где F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> – количественные величины свойства УНТ типов 1, 2, 3;

$P_{21}$  и  $P_{23}$  – величина интуиции при правильной классификации образов УНТ при их отнесении к классам 1 и 3 ( $P_{21}=0,81623$ ,  $P_{23}=0,91812$ ).

Распределение УНТ типа 1 и 3 по диапазонам их диаметров  $n$  с расчетом количества УНТ ( $N$ ) и доли по массе ( $G$ ) имеет вид

$$N_1=0,57821 \cdot n^5 - 14,2748 \cdot n^4 + 132,4417 \cdot n^3 - 564,0784 \cdot n^2 + 1051,4603 \cdot n - 597, \quad (11)$$

$$N_3 = -0,29038 \cdot n^5 + 6,9863 \cdot n^4 - 61,5044 \cdot n^3 + 237,5603 \cdot n^2 - 375,8253 \cdot n + 193,5, \quad (12)$$

$$G_1 = -0,085535 \cdot n^6 + 2,6022 \cdot n^5 - 31,7337 \cdot n^4 + 196,7206 \cdot n^3 - 642,8054 \cdot n^2 + 1010,8026 \cdot n - 532,4987, \quad (13)$$

$$G_3 = 0,054964 \cdot n^7 - 1,8441 \cdot n^6 + 25,1305 \cdot n^5 - 178,0488 \cdot n^4 + 697,1435 \cdot n^3 - 1483,2921 \cdot n^2 + 1572,9361 \cdot n - 632,08. \quad (14)$$

Распределения  $N_2$  и  $G_2$  для УНТ типа 2 представлены в виде

$$N_2 = 0,10267 \cdot n^5 - 2,6186 \cdot n^4 + 25,8173 \cdot n^3 - 121,1544 \cdot n^2 + 256,5903 \cdot n - 154,8165, \quad (15)$$

$$G_2 = 0,025232 \cdot n^7 - 0,88145 \cdot n^6 + 12,5984 \cdot n^5 - 94,6861 \cdot n^4 + 400,3153 \cdot n^3 - 943,2586 \cdot n^2 + 1134,5958 \cdot n - 507,4834. \quad (16)$$

Установлено, что е-глаз СИС-5 с МГИНС способен прогнозировать с минимальными ошибками концентрацию ферроцена при синтезе УНТ (0,026 %), максимальный диаметр УНТ (0,14 %), сумму всех диаметров УНТ (1,76 %), средний диаметр (16,27 %), количество УНТ (15,5 %), общее количество УНТ по диаметрам 0,02–0,03 мкм и по их доли по массе (11,6398 % по диаметрам, 12,9343 % доли по массе), 0,03–0,04 мкм (0,74 % по диаметрам, 8,9148 % доли по массе), 0,06–0,07 мкм (0 % по диаметрам, 5,6966 % доли по массе), 0,07–0,08 мкм (8,1401 % по диаметрам). Обучение длится 3,3028 с на 450 образцах, время распознавания образа – 0,0072 с.

СИС-5 с е-глазом способна заменить длительные дорогостоящие методы исследования сенсорных микро- и наноматериалов.

В пятой главе приведены комплексные результаты распознавания информационных образов биологических жидкостей (кровь, слюна, пот) (рисунки 6, 7), продуктов питания и почв для их выращивания с целью индивидуального мониторинга здоровья, прогнозирования эмоционального состояний (рисунок 8) и биобезопасности жизнедеятельности человека (рисунок 9). Для каждой биосреды необходимо использовать только одну определенную или несколько технологий исследования (е-язык, е-нос, е-глаз) с объединением сенсорных данных и определением наилучшей ее техноструктуры (МГИНС-ОРО, МГИНС-АЗО, МГИНС-ГФ, МГИНС-ГП). При распознавании в среднем МГИНС-ГП в 5–10 раз, МГИНС-ОРО и МГИНС-АЗО в 1,5–2,5 раза, МГИНС-ГФ в 1,5–2 раза эффективнее по качеству прогнозирования, по скорости самообучения МГИНС-ГП в 300–650 раз, МГИНС-ОРО до 270 раз, МГИНС-ГФ в 1,5–70 раз и МГИНС-АЗО в

4–20 раз производительнее существующих вероятностных нейронных сетей и нейронных сетей с обратным распространением ошибки. Для каждой биосреды НИС подбирает свой способ ускорения многоядерного самообучения (МИНОА2, МИНОА3, МИНУА) путем оценки значимости сенсорных признаков е-носа, е-языка и е-глаза или их совокупностей.



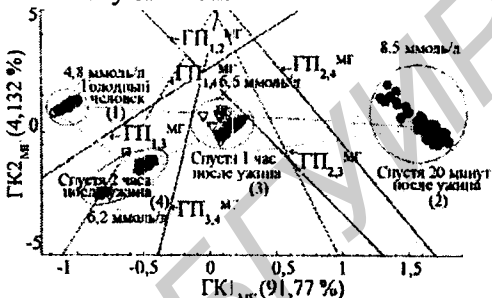
$ГП_{1,2}^{TM}: -0,14286 + GK1_{TM}(-0,53834) + GK2_{TM}0,1004 = 0$ ;  
ошибка распознавания МГИНС-ОРО 13,846 %;  
интуиция травмы мозга 11,77 %, МГИНС-ОРО с МИНОА3: ошибка распознавания 9,291 %,  
интуиция травмы 5,85 %, интуиция здорового состояния 14,83 %

Рисунок 6 – Образы крови при травме мозга (е-язык)



$ГП_{1,2}^{СТ} 0,20191 + GK1_{СТ} - 0,39674 + GK2_{СТ} 0,87894 = 0$ ;  
 $ГП_{1,3}^{СТ} 0,058937 + GK1_{СТ} 1,0923 + GK2_{СТ} 1,1887 = 0$ ;  
 $ГП_{1,4}^{СТ} - 0,38012 + GK1_{СТ} 0,48886 + GK2_{СТ} - 0,57796 = 0$ ;  
 $ГП_{2,3}^{СТ} - 0,066451 + GK1_{СТ} 0,71606 + GK2_{СТ} (-0,75733) = 0$ ;  
 $ГП_{2,4}^{СТ} 0,52184 + GK1_{СТ} 1,4306 + GK2_{СТ} (-0,73055) = 0$ ;  
 $ГП_{3,4}^{СТ} - 0,13982 + GK1_{СТ} (-0,37999) + GK2_{СТ} 0,92301 = 0$

Рисунок 8 – Мониторинг эмоций по слюне (е-язык и е-нос)



$ГП_{1,2}^{MГ}: -0,31144 + GK1_{MГ} 0,77723 + GK2_{MГ} - 0,14109 = 0$ ;  
 $ГП_{1,3}^{MГ}: 1,1846 + GK1_{MГ} 1,5872 + GK2_{MГ} (-0,44914) = 0$ ;  
 $ГП_{1,4}^{MГ}: 0,8181 + GK1_{MГ} 1,5146 + GK2_{MГ} (-0,17383) = 0$ ;  
 $ГП_{2,3}^{MГ}: 0,42952 + GK1_{MГ} (-0,85352) + GK2_{MГ} (-0,079322) = 0$ ;  
 $ГП_{2,4}^{MГ}: 1,2255 + GK1_{MГ} (-1,3205) + GK2_{MГ} (-0,20387) = 0$ ;  
 $ГП_{3,4}^{MГ}: 0,51462 + GK1_{MГ} - 3,1773 + GK2_{MГ} (-0,14574) = 0$

Рисунок 7 – Поддержка питания по слюне (е-глаз)



состав обезжиренного молока:  
0,05 % жира, 3,2 % белков,  
8,8 % сухого вещества

Рисунок 9 – Информационные образы продуктов питания из молока (е-язык)



Наиболее универсальным и подходящим для многих биосред является метод МИНОА2, позволяющий в 1,5–8 раз повысить качество прогнозирования по сравнению с ошибкой обучения МГИНС, в то время как МИНОА3 и МИНУА в 1,5 раза снижают ошибку обучения. Используя статистические данные, повышается точность принятия решений МГИНС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Исследованы электрофизические и сенсорно-чувствительные свойства материалов и тонкопленочных структур для производства сенсоров на поверхностных акустических волнах (ПАВ), используемых с целью развития научных основ методологии сенсорных информационных образов для управляемого синтеза перспективных сенсорных микро- и наноматериалов электронной техники, что позволило разработать портативную высокопроизводительную ПАВ микро-наносенсорную лабораторию на кристалле СИС-5 «электронный язык» (е-язык) и «электронный нос» (е-нос) на основе структур  $\text{Si}_{\langle 100 \rangle} / \text{SiO}_2 / \text{ZnO}(\text{AlN})$  с углеродными нанотрубками при рабочих частотах 100–1000 МГц и с ПАВ ретранслятором частотой 2,4 ГГц для широкого практического назначения [1–А, 2–А, 11–А, 18–А, 21–А, 22–А].

2. Теоретически и экспериментально обоснован оптико-электронный метод контроля параметров углеродных нанотрубок (УНТ) для «электронного языка» (е-язык) и «электронного носа» (е-нос) портативной микро-наносенсорной системы СИС-5, основанный на использовании «электронного глаза» (е-глаз) на кристалле для неинвазивной регистрации информационных образов сенсорных микро- и наноматериалов в широкополосном спектральном диапазоне длин волн 380–2400 нм и самоорганизующейся многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией, что позволило прогнозировать количественные и качественные характеристики УНТ (концентрация легирующих добавок, максимальный и средний диаметры УНТ, количество УНТ размерами 0,02–0,07 мкм) и пьезокерамических материалов ZnO и легирующих добавок  $\text{YFe}_3$ , 5 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [3–А, 4–А, 7–А, 8–А, 23–А].

3. Доказана эффективность разработанной метаэвристической интеллектуальной системы, метода классификации, контроля и отображения карт знаний медико-биологических параметров любых биосред в виде их сенсорных информационных образов, синтезируемых по данным «электронного языка» (е-язык), «электронного носа» (е-нос), «электронного глаза» (е-глаз)

СИС-5 с использованием самоорганизующейся многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией (МГИНС), что позволило достичь их высокоэффективного прогнозирования (до 1,5–10 раз) по критерию ошибки и (до 650 раз) по скорости самообучения при поддержке жизнедеятельности человека и определении поражающего влияния различных физических факторов в отличие от существующих вероятностных и нейросетевых алгоритмов классификации [3–А, 6–А, 10–А, 13–А].

4. Разработана инновационная концепция самооптимизации нейрoархитектуры многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией в виде гиперэвристической интеллектуальной системы, способной для каждой биосреды подобрать свой способ эффективного многоядерного самообучения (до 1,5–8 раз) по качеству прогнозирования путем оценки значимости сенсорных признаков «электронного языка» (е-язык), «электронного носа» (е-нос), «электронного глаза» (е-глаз) СИС-5 или их совокупностей с высокоориентированным поиском глобальной максимизации точности при автоматическом принятии решений [2–А, 9–А, 12–А, 14–А–16–А].

5. Разработана методология анализа и представления сенсорных информационных образов биосред для получения комплексных результатов исследований биологических жидкостей человека (кровь, слюна, пот) и биобезопасности продуктов питания, что позволило доказать способность и эффективность описания количественных и качественных характеристик внутреннего состояния биосистемы, причем для прогнозирования отдельного свойства биосреды подходит только определенная технoструктура распознавания многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сети полного разума с интуицией [1–А, 3–А, 5–А, 19–А, 20–А, 24–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Предложено использовать разработанную микро-наносенсорную систему СИС-5 с МГИНС и НИС для широкого практического назначения, в том числе в учебном процессе БНТУ, для медико-фармацевтических и конструкторско-аграрно-биотехнологических предприятий.

Основные результаты в виде шести актов внедрения включены в учебные программы семи дисциплин кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Монографии

1–А. Колешко, В.М. Мобильные телефоны, смартфоны и старение организма / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Н.А. Хмурович; под общ. ред. В.М. Колешко. – Минск: Техническая литература БНТУ, 2011. – 327 с.

2–А. Varabei, Y.A. Intelligent sensory micro-nanosystems and networks / Y.A. Varabei, N.A. Khmurovich, V.M. Koleshko // New perspectives in biosensors technology and applications / Ed. by P.A. Serra. – InTech, 2011. – P. 33–62.

3–А. Koleshko, V.M. Intelligent systems in technology of precision agriculture and biosafety / V.M. Koleshko, A.V. Gulay, E.V. Polynkova, V.A. Gulay, Y.A. Varabei // Intelligent systems / Ed. by V.M. Koleshko. – InTech, 2012. – P. 1–36.

### Статьи в научных журналах

4–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система анализа информационных образов жидких, твердых и гетерогенных сред / В.М. Колешко, А.В. Гулай, Е.А. Воробей, Е.В. Полюнкова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2009): IEEE proc. – Севастополь, Украина, 2009. – С. 863–864.

5–А. Koleshko, V.M. Electronic mind for human health support / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.V. Khmurovich // Soft computing and intelligent systems: IEEE proc. – Kobe, Japan, 2012. – P. 45–49.

6–А. Колешко, В.М. Е-язык и е-нос с нейронными сетями полного разума для наномедицины / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Н.В. Хмурович // Научная дискуссия: вопросы медицины. – М., 2012. – С. 67–72.

7–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система прогнозирования структуры и свойств наноматериалов / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Е.Л. Прудникова // Наука и техника. – 2012. – № 5. – С. 22–27.

8–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система распознавания информационных образов углеродных нанотрубок / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Е.Л. Прудникова // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 18–25.

9–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система распознавания информационных образов наноматериалов / В.М. Колешко, Е.А. Воробей,

Е.Л. Прудникова // Нано-и микросистемная техника. – 2012. – № 9. – С. 134–141.

10–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система биотестирования мыслей в производственном процессе / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, П.М. Азизов, А.А. Худницкий // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. Спец. вып. «Безопасность. Технологии. Управление». – Самара, 2008. – С. 254–261.

11–А. Koleshko, V.M. Biosensor intelligent system of rapid diagnosis / V.M. Koleshko, N.V. Khmurovich, Y.A. Varabei, E.V. Polynkova // Perspective technologies and methods in MEMS design: IEEE proc. – Lviv, Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine, 2009. – P. 26–30.

12–А. Koleshko, V.M. Multicore intelligent system of pattern recognition / V.M. Koleshko, Y.V. Varabei, N.A. Khmurovich // Perspective technologies and methods in MEMS design: IEEE proc. – Lviv, Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine, 2010. – P. 103–105.

13–А. Колешко, В.М. Биспектральный метод анализа функциональности мозга / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, П.М. Азизов // Современные направления в исследовании функциональной межполушарной асимметрии и пластичности мозга. – М., 2010. – С. 125–131.

#### **Статьи в сборниках материалов научных конференций, конгрессов**

14–А. Koleshko, V.M. Smart sensors and a whole mind intelligent system for healthcare // V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.V. Khmurovich // Computational Intelligence and Computing Research: IEEE International Conf., Coimbatore, 18–20 Sep. 2012 / Cape Institute of Technology. – Coimbatore, India, 2012. – P. 48–51.

15–А. Koleshko, V.M. Neural networks of a whole mind for diagnosis in nanomedicine / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.V. Khmurovich // Nanosciences & Nanotechnologies (NN12): IEEE 9<sup>th</sup> International Conf., Thessaloniki, 3–6 July 2012 / LTFN. – Thessaloniki, Greece, 2012. – P3–36.

16–А. Koleshko, V.M. Information pattern prediction of biomatters in nanomedicine / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.V. Khmurovich // Flexible Organic Electronics (ISFOE12): IEEE 5<sup>th</sup> International Symp., Thessaloniki, 2–5 July 2012 / LTFN. – Thessaloniki, Greece, 2012. – P. 64.

17–А. Koleshko, V.M. Intelligent system of a whole mind with e-eye in nanomedicine / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.V. Khmurovich // IEEE-EMBS

Micro- and Nanoengineering in Medicine: IEEE International Conf., Ka'aanapali, 01–07 Sep. 2012 / Harvard University. – Ka'aanapali, USA, 2012. – P. 87.

18–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система диагностики биохимических образцов крови / В.М. Колешко, Н.В. Хмурович, Е.А. Воробей, Е.В. Полинкова // Современные информационные и телемедицинские технологии для здравоохранения: сб. II Междунар. науч. конф., Минск, 1–3 окт. 2008 г. / ОИПИ НАН РБ.– Минск, 2008. – С. 202–204.

19–А. Koleshko, V.M. Micro-nanosensory recognition system of information patterns of human biomatters / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, E.V. Polynkova, N.A. Khmurovich // Медэлектроника–2010. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. – Минск: БГУИР, 2010. – С. 43–44.

20–А. Koleshko, V.M. Optical sensory recognition system of information patterns of human biomatters / V.M. Koleshko, A.V. Gulay, Y.A. Varabei, E.V. Polynkova // Медэлектроника–2010. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. – Минск: БГУИР, 2010. – С. 42–43.

21–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная сенсорная наносистема секвенирования генома / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Н.В. Хмурович // Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь–Россия–Украина (НАНО–2010): тезисы II Междунар. науч. конф., Киев, 19–22 окт. 2010 г. / Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. – Киев, 2010. – С. 653–654.

22–А. Varabei, Y.A. Intelligent sensory system for optical analysis of biomatters / Y.A. Varabei, A.V. Gulay, N.A. Khmurovich // Прогрессивные технологии и перспективы развития: II Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Тамбов, 5 нояб. 2010 г. / ГОУ ВПО ТГТУ. – Тамбов, 2010. – С. 120–121.

23–А. Воробей, Е.А. Интеллектуальная сенсорная микро-наносистема для анализа оптических образцов твердых, жидких, газообразных и гетерогенных биосред / Е.А. Воробей, Н.А. Хмурович // VIII Всерос. молодеж. Самар. конкурс-конф. науч. работ по оптике и лазерной физике: сб. курсных работ, Самара, 16–20 нояб. 2010 г. / СамГУ. – Самара, 2010. – С. 20.

24–А. Воробей, Е.А. Интеллектуальная информационная система прогнозирования повреждений мозга / Е.А. Воробей, В.М. Колешко //

Информационные системы и технологии (IST'2010): VI Междунар. конф., Минск, 24–25 нояб. 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 446–450.

25–А. Колешко, В.М. Многоядерная технология с параллельной обработкой информационных сенсорных образов / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Н.А. Хмурович // Информационные системы и технологии (IST'2009): сб. V Междунар. конф.-форум, Минск, 16–17 нояб. 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – Ч. 2. – С. 149–152.

#### Тезисы докладов

26–А. Koleshko, V.M. Intelligent sensory micro-nanosystems and networks for health, environment and biosecurity / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.V. Khmurovich // Belarus-Korea Science and Techn. Sem., Minsk, 27 June 2011 / BNTU. – Minsk, 2011. – P. 17.

27–А. Koleshko, V.M. Intelligent sensory recognition system of information patterns of solid, liquid, gaseous and heterogeneous human biomatters / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, E.V. Polynkova, N.A. Khmurovich // Belarus-Korea Science and Techn. Sem., Minsk, 25 Oct. 2010 / BNTU. – Minsk, 2010. – P. 35–36.

28–А. Koleshko, V.M. Nanosensory system of genom sequencing / V.M. Koleshko, Y.A. Varabei, N.A. Khmurovich // Belarus-Korea Science and Techn. Sem., Minsk, 25 Oct. 2010 / BNTU. – Minsk, 2010. – P. 37–38.

29–А. Колешко В.М. Интеллектуальная система экспресс-диагностики крови и защита информации / В.М. Колешко, Е.А. Воробей // Технические средства защиты информации: материалы VI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 мая 2008 г. / БГУИР. – Минск, 2008. – С. 37.

30–А. Koleshko, V.M. Intelligent recognition system of optical patterns of human biomatters / V.M. Koleshko, A.V. Gulay, Y.A. Varabei, E.V. Polynkova // Belarus-Korea Science and Techn. Sem., Minsk, 25 Oct. 2010 / BNTU. – Minsk, 2010. – P. 33–34.

31–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система распознавания информационных образов для защиты и безопасности жизнедеятельности человека / В.М. Колешко, А.В. Гулай, Е.А. Воробей, Т.Т. Гаджинский, А.С. Кукунов, Д.В. Мардас // Технические средства защиты информации: материалы VII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 июня 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 46–47.

32–А. Koleshko, V.M. Intelligent sensory systems for precision agriculture and biosafety / V.M. Koleshko, A.V. Gulay, E.V. Polynkova, V.A. Gulay, Y.A.

Varabei // Belarus-Korea Science and Techn. Sem., Minsk, 27 June 2011 / BNTU. – Minsk, 2011. – P. 126.

33–А. Колешко, В.М. Интеллектуальная система защиты от чрезвычайных ситуаций / В.М. Колешко, Е.А. Воробей, Е.В. Польшкова, П.М. Азизов, А.А. Худницкий // Технические средства защиты информации: материалы VII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 июня 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 45–46.

### Патенты

34–А. Способ и интеллектуальная система: пат. Респ. Беларусь / В.М. Колешко, Е.А. Воробей. – № а 20120653; заявл. 25.04.2012.



## РЭЗІЮМЭ

Верабей Яўген Анатольевіч

### Інтэлектуальныя мікра-нанасістэмы распазнавання сэнсарных інфармацыйных вобразаў біяасяроддзяў

**Ключавыя словы:** паверхневыя акустычныя хвалі, электронны язык, электронны нос, электронная вока, распазнаванне вобразаў, інтэлектуальная сістэма, біяасяроддзе.

**Аб'ект даследавання:** біяасяроддзе чалавека, прадукты харчавання і глебы для іх вырошчвання, сэнсарныя мікра- і нанаматэрыялы.

**Мэта працы:** распрацоўка інтэлектуальных мікра-нанасэнсараў на крышталі е-язык, е-нос, е-вока з апаратна-праграмным сродкам распазнавання многамерных інфармацыйных сэнсарных вобразаў біяасяроддзяў для падтрымкі здароўя чалавека і біябяспекі яго жыццядзейнасці.

**Метады даследавання:** ПАХ, LED рэгістрацыя, тэорыя распазнавання вобразаў.

**Атрыманія вынікі і іх навізна.** Прапанаваны канструкцыі мікра-нанасэнсараў на крышталі е-язык і е-нос на аснове структуры  $\text{Si}\backslash\text{SiO}_2\backslash\text{ZnO}(\text{AlN})$  з адчувальнымі сляямі вертыкальна і гарызантальна арыентаваных вугляродных нанатрубак, якія адрозніваюцца хуткім часам водгуку і рэгенерацыі, стабільнасцю частаты пад уплывам біяасяроддзяў і знешніх умоў. Распрацавана LED рэгістрацыя з е-вокам для даследавання ў шырокапалосным дыяпазоне даўжынь хваль 380–2400 нм інфармацыйных вобразаў сэнсарных мікра- і нанаматэрыялаў. Распрацаваны мета-гіперэўрыстычны спосаб уяўлення і класіфікацыі вобразаў біяасяроддзяў многамернай гіперсфернай інтэлектуальнай нейронавай сеткай поўнага розуму (МГІНС). Праведзены даследаванні па распазнаванні інфармацыйных вобразаў біяасяроддзя чалавека, прадуктаў харчавання і глеб для іх вырошчвання.

**Галіна ўжывання і рэкамендацыі па выкарыстанню.** Прапанавана выкарыстоўваць распрацаваную мікра-нанасэнсарную сістэму SIC-5 з МГІНС і НІС для шырокага спектра практычнага прызначэння, у тым ліку для розных канструктарска-тэхналагічных прадпрыемстваў, а таксама для медыцынскай, фармацэўтычнай, харчовай прамысловасці, сельскай гаспадаркі, экалогіі і іншых галін.



## РЕЗЮМЕ

Воробей Евгений Анатольевич.

### Интеллектуальные микро-наносистемы распознавания сенсорных информационных образов биосред

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, электронный язык, электронный нос, электронный глаз, распознавание образов, интеллектуальная система, биосреда.

**Объект исследования:** биосреда человека, продукты питания и почвы для их выращивания, сенсорные микро- и наноматериалы.

**Цель работы:** разработка интеллектуальных микро-наносенсоров на кристалле е-язык, е-нос, е-глаз с аппаратно-программным средством распознавания многомерных информационных сенсорных образов биосред для поддержки здоровья человека и биобезопасности его жизнедеятельности.

**Методы исследования и оборудование:** ПАВ, LED регистрация, теория распознавания образов.

**Полученные результаты и их новизна.** Предложены конструкции ПАВ микро-наносенсоров на кристалле е-язык и е-нос на основе структуры  $\text{Si/SiO}_2/\text{ZnO(AlN)}$  с чувствительными слоями вертикально и горизонтально ориентированных углеродных нанотрубок, отличающиеся быстрым временем отклика и регенерации, стабильностью частоты под влиянием биосред и внешних условий. Разработана LED регистрация с е-глазом для исследования в широкополосном диапазоне длин волн 380–2400 нм информационных образов сенсорных микро- и наноматериалов. Разработан гиперметаэвристический способ представления и классификации образов биосред многокомпонентной гиперсферной интеллектуальной нейронной сетью полного разума (МГИНС). Проведены исследования по распознаванию информационных образов биосред человека, продуктов питания и почв для их выращивания.

**Область применения и рекомендации по использованию.** Предложено использовать разработанную микро-наносенсорную систему СИС-5 с МГИНС и НИС для широкого спектра практического назначения, в том числе для различных конструкторско-технологических предприятий, а также медицинской, фармацевтической, пищевой промышленности, сельского хозяйства, экологии и других отраслей.

## SUMMARY

Varabei Yauhen Anatolevich

### Intelligent micro-nanosystems for sensory information pattern recognition of biomatters

**Keywords:** surface acoustic waves, electronic tongue, electronic nose, electronic eye, pattern recognition, intelligent system, biomatter.

**Object of investigation:** human biomatter, foodstuffs and soils for growing these ones, sensory micro- and nanomaterials.

**The purpose of research:** the development of intelligent micro-nanosensors on a chip of the type e-tongue, e-nose, e-eye with hardware and software for the recognition of multidimensional information sensory patterns of biomatters and for the human health support and the biosafety of his life activity.

**Research methods and equipment:** SAWs, LED registration, pattern recognition theory.

**Obtained results and their novelty.** A design of SAW micro-nanosensors on a chip e-tongue and e-nose based on the structure  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ZnO}(\text{AlN})$  with sensory layers of vertically and horizontally oriented carbon nanotubes differing a fast response time and a regeneration one, a frequency as affected by biomatters and environmental conditions is presented. A LED registration with e-eye is worked out to conduct researches of information patterns of sensory micro- and nanomaterials in the broadband wavelength range 380–2400 nm. A meta-hyperheuristic method of the representation and the pattern classification of biomatters using a multicomponent hypersphering intelligent neural network of a whole mind (MHINN) is realised. Researches were done on the recognition of human biomatters information patterns, foodstuffs, and soils for growing these ones.

**Field of application and using considerations.** It is recommended to use a developed micro-nanosensory systems SIS-5 with MHINN and NIS for the broad-spectrum practical application including different engineering and design enterprises, but also medical, pharmaceutical, food industry, for agriculture, ecology, technologies, and other fields.

*Научное издание*

**Воробей Евгений Анатольевич**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МИКРО-НАНОСИСТЕМЫ  
РАСПОЗНАВАНИЯ СЕНСОРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ  
БИОСРЕД**

По специальностям 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

---

Подписано в печать 06.12.2012.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 642.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛП №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6