

Живые организмы в киберпространстве – проект «Биодрайвер»

Р.Я. Пирмагомедов, доцент кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, к.т.н.; lts.pto@yandex.ru

Е.А. Кучерявый, профессор НИУ «Высшая школа экономики», к.т.н.; yk@cs.tut.fi

Р.И. Глушаков, старший помощник начальника отдела ФГБВОУ ВПО «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» МО России, к.м.н.; glushakovruslan@gmail.com

Р.В. Киричэк, заместитель заведующего кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, к.т.н.; kirichkek@sut.ru

А.Е. Кучерявый, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, д.т.н.; akouch@mail.ru

УДК 621.391

Аннотация. Рассматриваются вопросы интеграции живой материи в киберпространство. Представлена идея, определяющая общий принцип сопряжения живой материи с инфокоммуникационными системами. Предложена структурная схема системы «Биодрайвер», позволяющей измерять процессы, протекающие в живых организмах, и воздействовать на них. Анализируются некоторые аспекты взаимодействия элементов системы «Биодрайвер». Проведен обзор медицинских индикаторов состояния здоровья, которые могли бы использоваться для анализа процессов, протекающих в организме. Представлены приложения, которые могут быть реализованы с применением описанных в статье средств, а также научные задачи, требующие решения.

Ключевые слова: Интернет вещей, наносети, Интернет нановещей, биодрайвер.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нанотехнологий и концепции Интернета вещей [1] привело к появлению нового термина – Интернета нановещей [2, 3]. Этот термин используется для обозначения вычислительных сетей, в которых узлы имеют микроскопические размеры и позволяют взаимодействовать с процессами, протекающими на наноуровне [2–4].

Узлы в таких сетях базируются на использовании уникальных свойств инновационных материалов. Одним из наиболее ярких примеров подобных материалов можно по праву считать графен. Уникальные свойства графена послужили мощным импульсом для совершенствования электронных компонентов, в результате появилась возможность создавать миниатюрные электронные устройства (наномашин), обладающие существенными вычислительными возможностями.

Тема создания наномашин не ограничивается применением лишь электронных компонентов. Активно исследуются вопросы создания наносетей с использованием биологических компонентов – биологических наносетей. В [5, 6] представлены некоторые аспекты передачи информации с помощью бактерий. При этом бактерии играют роль курьера, перенося сообщения между двумя точками. В [7] рассмотрена возможность использования кальциевого обмена между клетками для передачи информации. Не оставлена без внимания ученых и идея использования нейронов для создания биологических наносетей [8].

Исследования в области применения биологических компонентов для создания телекоммуникационной сети не ограничиваются рассмотренными выше. В

целом, основываясь на анализе литературы по данной теме, можно сказать, что построение телекоммуникационной сети на основе живых организмов возможно.

ИДЕЯ ГАРМОНИЧНОЙ ИНТЕГРАЦИИ

Отдельно стоит выделить тему сопряжения биологических наносетей с традиционными телекоммуникационными сетями. Зададимся вопросом: подходят ли биологические наносети для передачи «традиционных» видов трафика (видео, картинки, аудио и др.). Способность сети передавать тот или иной тип трафика характеризуется в первую очередь задержкой в передаче сообщения, джитером, пропускной способностью и потерями. Возможно, в дальнейшем удастся достичь параметров передачи в биологических сетях, схожих с параметрами передачи традиционных сетей. Однако результаты исследований показывают, что на текущий момент параметры передачи в биологических сетях далеки от параметров традиционных сетей. На наш взгляд, текущую ситуацию с биологическими сетями можно представить следующими тезисами:

- параметры передачи в биологических наносетях нельзя назвать подходящими для передачи «традиционных» видов информации;
- функциональность целостного многоклеточного организма существенно превышает возможности его функционально дифференцированных структурных компонентов (органов и систем, тканей, клеток) и/или вступающих с ним в паразитические, симбиотические или комменсалистические взаимоотношения ми-

Рисунок 1

Сопряжение биологических наносетей с традиционными телеком-сетями на основе идеи гармоничной интеграции

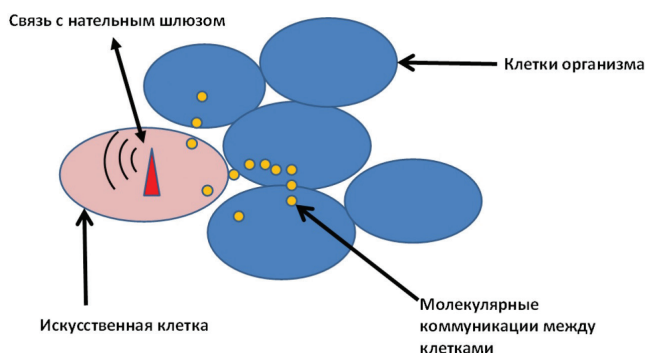
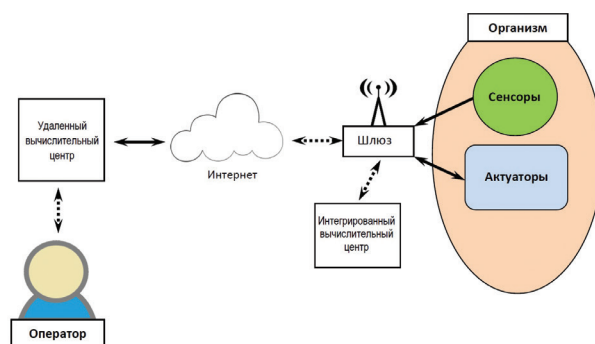


Рисунок 2

Структурная схема системы «Биодрайвер»



кроорганизмов. Все это реализуется благодаря эволюционно достигнутому взаимодействию между клетками (организменный уровень организации живой системы) или микроорганизмами (микробиом), входящими в состав многоклеточного организма;

- сети связи и способы передачи информации, существующие в многоклеточном организме и являющиеся продуктом длительного естественного процесса оптимизации, вполне эффективны для решения задач обмена информацией между клетками.

С учетом этих тезисов сформулирована идея гармоничной интеграции. Ее суть в следующем: сопряжение биологических наносетей с традиционными телекоммуникационными сетями должно осуществляться на основе использования естественных для биологических наносетей способов обмена информацией и естественного характера информации. Схематичный пример подключения организмов к традиционным сетям, базирующийся на идее гармоничной интеграции, проиллюстрирован на рис. 1. Другими словами, необходимо научиться понимать язык, на котором взаимодействуют биологические микроорганизмы, и использовать этот язык для подключения их к традиционным телекоммуникационным сетям.

ПРОЕКТ «БИОДРАЙВЕР»

Результаты исследований в области Интернета нановещей навели на мысль о создании гибридной биоэлектронной системы, в которой электронный вычислительный центр (ВЦ) участвует в управлении процессами, происходящими в живой материи. Мы назвали этот проект Биодрайвер». Основными элементами системы «Биодрайвер» являются сенсоры, актуаторы, нательный шлюз (НШ) и ВЦ (рис. 2).

Сенсоры необходимы для регистрации и измерения параметров, характеризующих функциональное состояние контролируемого организма. Задача актуаторов — осуществлять воздействия на организм с целью повлиять на протекающие в нем процессы. Цикл работы системы «Биодрайвер» представлен на рис. 3.

Принцип подключения сенсоров и актуаторов к НШ вытекает из описанной выше концепции гармоничной интеграции. Сенсором может быть как отдельная наномашина (искусственно созданная), так и наносенсорная сеть, состоящая из множества наномашин (в том числе биологических) и искусственной наномашин, которая передает информацию о процессах, протекающих в организме, на НШ (см. рис. 1). Таким образом, искусственная наномашина должна, с одной стороны, обеспечивать обмен информацией с НШ, с другой — взаимодействие с узлами наносенсорной сети с помо-

Рисунок 3
Цикл работы «Биодрайвер»

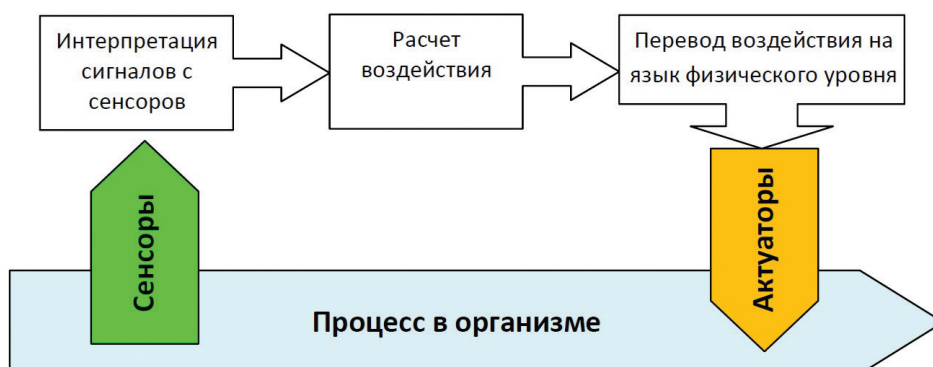
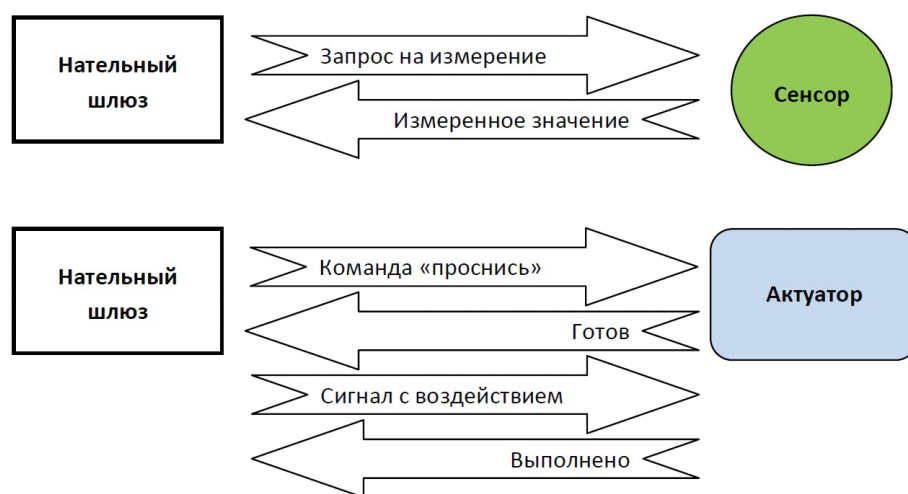


Рисунок 4
Сеансы связи нательного шлюза с наномашинами



стью существующих в организме способов передачи и типов сигналов, либо измерять параметры процессов, протекающих в организме.

Актуатор также представляет собой искусственную наномашину с обратной задачей — принять от НШ сигнал о воздействии, которое необходимо произвести на организм, и осуществить это воздействие. Характер воздействия актуатора на организм может иметь химическую, электрическую или иную природу. Для различных типов воздействий могут потребоваться различные модели-актуаторы.

Информация с сенсоров консолидируется в НШ, откуда она может быть передана на ВЦ. Далее ВЦ анализирует полученные данные и в зависимости от целей, для которых используется система «Биодрайвер», рассчитывает необходимое воздействие на организм. Стоит отметить, что воздействие на организм может быть нулевым, т.е. отсутствовать. При расчете воздействия, помимо информации от сенсоров, расположенных в организме, также могут учитываться и другие обстоятельства, которые прямо или косвенно влияют на достижение системой поставленной цели: температура окружающей среды, влажность, давление и т.д.

При расчете воздействия необходимо учитывать индивидуальные особенности организма. Для этого в случае первичного подключения организма к системе следует предусмотреть режим калибровки. При калибровке надо определить и зафиксировать контрольные значения параметров, характеризующих функциональное состояние организма в естественных условиях обитания, а также находящихся под воздействием различных факторов, в том числе экстремальных для данного биологического вида. В дальнейшем эти контрольные значения можно использовать для определения происходящих в организме изменений и расчета необходимого воздействия.

Помимо значения, автоматически рассчитанного ВЦ, воздействие на организм может быть инициировано человеком-оператором системы «Биодрайвер». В

этом случае ВЦ предоставляет оператору информацию о процессах в организме, собранную системой. Информация может быть представлена как в чистом виде, так и предварительно подготовленной. В таком режиме система «Биодрайвер» выполняет функцию поддержки принятия решений.

СВЯЗЬ МЕЖДУ НАТЕЛЬНЫМ ШЛЮЗОМ И ИСКУССТВЕННЫМИ НАНОМАШИНАМИ

Обеспечение взаимодействия искусственных наномашин с НШ — задача, от решения которой напрямую зависит работоспособность системы. Передачу данных между ними инициирует шлюз, позволяющий снизить энергопотребление наномашин. Сеанс связи между НШ и наномашинами (сенсор, актуатор) представлен на рис. 4.

Один из наиболее перспективных способов передачи данных между наномашинами и НШ — использование электромагнитного беспроводного канала связи, работающего в ТГц радиочастотном диапазоне [9, 10]. К основному преимуществу этого способа можно отнести миниатюрность антенн, необходимых для излучения и приема сигнала. Кроме того, по предварительным оценкам, излучение в ТГц диапазоне не оказывает негативного влияния на живые организмы. Главный недостаток — высокие потери сигнала при распространении в пространстве. Это существенно ограничивает дальность передачи: по некоторым оценкам, она ограничивается несколькими метрами.

Нельзя исключать возможность использования и других (помимо электромагнитного) способов связи наномашин с НШ. Канал связи может быть основан на применении химической, звуковой, электрической или иной коммуникации. Однако авторам неизвестны работы, посвященные исследованию этого вопроса.

Связь между нательным шлюзом и вычислительным центром. Можно выделить три варианта взаимодействия НШ с ВЦ.

1. Использование только удаленного ВЦ. Если систе-

Таблица 1

Преимущества и недостатки различных вариантов исполнения ВЦ

Тип вычислительного центра	Преимущества	Недостатки
Удаленный ВЦ	<ul style="list-style-type: none"> • Возможность осуществления достаточно сложных вычислений • Расчет воздействия на организм может учитывать внешние факторы, информация о которых недоступна локальному ВЦ • Сравнительно низкое энергопотребление НШ • Меньшие размеры НШ 	<ul style="list-style-type: none"> • Сравнительно высокий риск преднамеренного уничтожения, искажения или блокирования информации при передаче данных между ВЦ и НШ • Работоспособность системы сильно зависит от наличия и качества доступа в Интернет или иные промежуточные сети, которые требуются для связи с удаленным ВЦ
Локальный ВЦ	<ul style="list-style-type: none"> • Практически исключается риск преднамеренного уничтожения, искажения или блокирования информации при передаче данных между ВЦ и НШ • Работоспособность системы не зависит от наличия и качества доступа в Интернет или иные промежуточные сети, которые требуются для связи с удаленным ВЦ 	<ul style="list-style-type: none"> • Энергопотребление НШ выше по сравнению с первым вариантом • Размеры НШ несколько больше, чем в первом варианте • Производительность ВЦ сравнительно не высокая • Существенно ограничены возможности учета внешних факторов при расчете воздействия на организм
Комбинированное использование удаленного и локального ВЦ	<ul style="list-style-type: none"> • За счет предварительной обработки информации появляется возможность уменьшить объем данных, которые необходимо передать на удаленный ВЦ, что снижает нагрузку на сеть • Возможность оперативно воздействовать на организм в критической ситуации • Меньшая, по сравнению с первым способом, зависимость системы от промежуточных сетей, которые требуются для связи с удаленным ВЦ 	<ul style="list-style-type: none"> • Предварительная обработка информации вносит дополнительную временную задержку в цикл работы системы • Габариты и энергопотребление НШ хуже, чем во втором способе

ма «Биодрайвер» применяется для координации различных организаций, деятельность которых направлена на достижение общей цели, для адекватного вычисления воздействия на каждый конкретный организм может потребоваться предварительный сбор данных со всех организмов. В таком случае локальный ВЦ не подойдет для выполнения этой задачи. Данные с НШ необходимо передать на удаленный ВЦ, где будет консолидироваться информация от всех организмов, находящихся под контролем и участвующих в достижении общей цели. В связи с этим необходимо решить задачу оптимального сбора данных с НШ и ретрансляции полученных данных на удаленный ВЦ.

Сложно предложить универсальное решение этой задачи; каждую отдельную ситуацию следует рассматривать индивидуально. В зависимости от ограничений, которые накладываются на этот процесс, может быть реализован наиболее подходящий вариант для сбора данных с НШ. Возможностей для этого достаточно — от использования существующей телекоммуникационной

инфраструктуры (например, сети мобильной связи) до таких специфических решений, как беспилотные летательные аппараты [11].

2. Использование только локального ВЦ. В случае если решаемые с помощью «Биодрайвера» задачи не требуют очень сложных вычислений, можно ограничиться локальным ВЦ, интегрированным в НШ.

3. Комбинированный вариант — синтез первых двух вариантов. Он предполагает преимущественное использование удаленного ВЦ. Однако при этом также имеется и локальный (интегрированный с нателным шлюзом) упрощенный вариант ВЦ, который осуществляет первичную обработку данных, выполняет функции по защите информации, а также обладает базовым набором функций, позволяющих производить необходимые воздействия на организм в случае критической ситуации, когда реакция должна быть незамедлительной, а связь с ВЦ отсутствует.

Каждый из рассмотренных способов взаимодействия НШ с ВЦ имеет свои преимущества и недостатки (табл. 1).

Таблица 2

Основные интегральные показатели витальных функций человеческого организма

Физиологическое свойство организма	Метод исследования	Инвазивность по отношению к биологическому объекту
Электрофизиологическая активность миокарда	Электрокардиография	Контактный кожный электрод
Электрофизиологическая активность головного мозга	Электроэнцефалография	Контактный накожный электрод
	Электrokортикография	Инвазивный электрод, помещаемый на кору головного мозга
Микроциркуляция крови в тканях	Лазерная доплеровская флуометрия	Контактный световодный зонд и фотоприемник
Пульсовая волна периферического кровообращения	Пульсометрия	Контактный датчик
Артериальное давление в центральных и периферических сосудах	Тонометрия	Контактный круговой датчик, помещаемый вокруг конечности
Насыщение кислородом гемоглобина артериальной крови (оксигенация, сатурация)	Оксиметрия (неинвазивная медицинская спектрофотометрия)	Контактный оптический излучатель разного спектрального состава и регистратор

МЕДИЦИНСКИЕ ИНДИКАТОРЫ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

Отдельного внимания заслуживает задача сбора информации о процессах, протекающих в организме: в каких точках и каким образом эту информацию собирать. Способны ли клетки, находящиеся, к примеру, в руке, дать информацию о процессах, происходящих в ноге? Сложность организации структурных элементов и высокая специализация и дифференцировка клеточных элементов человека, как и любого другого высокоорганизованного многоклеточного организма, предполагает определение функционального состояния биологического объекта, в том числе и в режиме реального времени, только на уровне макроорганизма.

Несмотря на то что в поддержании гомеостаза макроорганизма участвует множество регуляторных систем (нервной, эндокринной, гуморальной) и подчеркнута значимость механизмов (генетических, иммунологических и детоксикационных), физиологами выделяются три основных системы: нейрогуморальная регуляция, объединяющая нервную систему и жидкие среды организма (кровь, лимфа, тканевая жидкость), и иммунитет. Однако из тысяч инструментальных и лабораторных значений (параметров) различных систем организма около двухсот имеют клиническое значение. Используются же в рутинной клинической практике не более 50 и около 10 имеют интегральное значение, характеризующие качественное состояние биологического объекта и состояние витальных функций — степень угрозы здоровью (табл. 2).

Мониторинг витальных функций или других показателей жизнедеятельности или метаболизма живого организма крайне необходим в следующих системах:

- в экспериментальной медицине и биологии (для отслеживания динамики изучаемых структур в режиме реального времени и/или на расстоянии);

- в медицине экстремальных состояний (для контроля за пилотами и отдельными категориями водителей, работающих в условиях повышенного давления, низкого парциального давления кислорода, а также работниками спасательных служб, правоохранительных органов, военнослужащими);
- в спортивной медицине (для контроля за параметрами витальных функций), при контроле в режиме реального времени за пациентами с хроническими заболеваниями (при нарушении ритма и проводимости, эпилепсии, сахарном диабете).

Кроме того, мониторинг необходим для эффективно-го контроля за соблюдением образа жизни у пациентов с той или иной физической или психической зависимостью (алкоголизм, булимия, наркомания), а также контроля при работах, ассоциированных с воздействием профессиональных вредных факторов (поступлением в организм токсических веществ).

Исходя из опыта, накопленного многими авторами, в экстремальных ситуациях танатогенез в той или иной степени затрагивает систему кровообращения. Наиболее интегральными показателями для оценки витальных функций являются частота сердечных сокращений и оксигенация крови (сатурация кислорода). Применение неинвазивного гемодинамического мониторинга на раненых и пораженных организмах безопасно, недорого и обеспечивает точную корреляцию с состоянием всего организма [12–14]. В медицине экстремальных состояний с целью мониторинга за витальными функциями организма применяются тиражированные приборы, для которых важны компактность, функциональность, надежность и простота в использовании.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ «БИОДРАЙВЕР»

Спектр областей, в которых возможно применение системы «Биодрайвер», весьма обширен. Первостепенная область применения — мониторинг и управление процессами организма человека. Здесь можно выделить несколько направлений, главное из которых — медицинские приложения. Внедрение системы «Биодрайвер» в медицинскую практику позволит:

- своевременно оказывать само- и взаимопомощь на догоспитальном этапе;
- в режиме реального времени проводить мониторинг общего количества живых субъектов в ситуациях с крайне высоким риском для жизни (боевые действия, пожары высокого уровня сложности, геоклиматические и техногенные катастрофы);
- оперативно оценивать необходимость сил и средств для оказания медицинской помощи и/или эвакуации раненых и пораженных;
- проводить первичную обработку информации и состояния здоровья контролируемого субъекта и осуществлять поддержку принятия решений специалистом;
- вести подробную историю болезни.

Еще одним направлением, где могут быть востребованы возможности системы «Биодрайвер», можно считать индустрию развлечений, в частности создание периферийных компьютерных устройств, компьютерные игры. Система «Биодрайвер» может применяться для создания дополнительного воздействия на организм игрока, тем самым позволяя сделать переживания и ощущения от игрового процесса более яркими и реалистичными.

Функциональные возможности системы «Биодрайвер» также могут быть востребованы для мониторинга контингента людей с высокими рисками нарушения здоровья, например, заключенных исправительных учреждений, пациентов психиатрических лечебниц и наркологических клиник.

Помимо мониторинга и управления процессами в организме человека, систему «Биодрайвер» можно применить и для других целей, предполагающих интеграцию киберпространства и живой материи, — их перечень ограничен лишь фантазией исследователей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка наномашин, позволяющих подключить живую материю к электронным вычислительным системам и сетям, открывает не только новые возможности для создания широкого спектра приложений, делающих жизнь более комфортной и безопасной, но и дает возможность поднять на новый уровень качество медицинского обслуживания. Именно для достижения этих гуманистических целей инициирован проект «Биодрайвер».

Тема этих исследований находится на стыке нескольких научных дисциплин: телекоммуникаций, электротехники, медицины, биологии и др. В реализации проекта участвуют специалисты по всем этим областям. Проведение совместных исследований заставляет участников проекта взглянуть на привычную предметную область под другим углом, что может привести к появлению новых задач, которые ранее не попадали в поле зрения исследователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Изд-во «Любавич», 2011. — 310 с.
2. Кучерявый А.Е., Баласубраманиям С. Интернет нановещей и наносети // Электросвязь. — 2014. — №4.
3. Кучерявый А.Е. Введение в наносети / Сб. трудов 66-й науч.-техн. конф. НТОРЭС им. Попова. — Апрель 2011. — С. 186–187.
4. Akyildiz I.F., Pierobon M., Balasubramaniam S., Koucheryavy Y. The Internet of Bio-Nanothings // IEEE Communications Magazine — Communications Standards Supplement. — March 2015. — P. 32–40.
5. Balasubramaniam S., Lio P. Multi-Hop Conjugation Based Bacteria Nanonetworks // IEEE Transactions on nanobioscience. — March 2013. — Vol. 12, №1. — P. 47–59.
6. Gregori M., Akyildiz I.F. A New NanoNetwork Architecture Using Flagellated Bacteria and Catalytic Nanomotors // IEEE Journal on selected areas in communications. — May 2010. — Vol. 28, №4. — P. 612–619.
7. Kuran M.S., Tugcu T., Edis O. Calcium signaling overview and research directions of a molecular communication paradigm // IEEE Wireless Communications. — October 2012. — P. 20–27.
8. Torimitsu K. Nanobiotechnology Research at NTT / Special Feature: Nanobiotechnology Research. — August 2009. — Vol. 7, № 8.
9. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band // IEEE Trans. Wireless Communication. — 2011. — Vol. 10, №1. — P. 3211–3221.
10. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Graphene-Based Plasmonic Nano-Antenna for Terahertz Band Communication in Nanonetworks // IEEE JSAC, Special Issue on Emerging Technologies for Communications. — 2013. — Vol. 31, №12. — P.685–694.
11. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. и др. Летающие сенсорные сети // Электросвязь. — 2014. — № 9.
12. Convertino V.A., Moulton S.L., Grudic G.Z. Use of advanced machine-learning techniques for noninvasive monitoring of hemorrhage // J Trauma. — 2011. — № 71(1 Suppl). — P.25–32.
13. Convertino V.A., Ryan K.L., Rickards C.A., Salinas J. et al. Physiological and medical monitoring for en route care of combat casualties // J Trauma. — 2008. — №64 (4 Suppl). — P.342–353.
14. Shoemaker W.C., Wo C.C., Lu K., Chien L.C. et al. Noninvasive hemodynamic monitoring for combat casualties // Mil Med. — 2006. — №171(9). — P.813–820.

Получено 30.07.2015