

На правах рукописи



ИСТОМИН Виктор Владимирович

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ
САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ГРУПП АВТОНОМНЫХ
АГЕНТОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.17 – теоретические основы информатики

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

Пенза – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский государственный технологический университет» на кафедре «Информационные технологии и системы».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Михеев Михаил Юрьевич.

Официальные оппоненты: **Селиванов Евгений Павлович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Пензенский
государственный технологический
университет», профессор кафедры
«Прикладная информатика»;
Мясникова Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Пензенский
государственный университет»,
профессор кафедры «Автоматика
и телемеханика».

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск.

Защита состоится 27 декабря 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 на базе ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ «Пензенский государственный технологический университет».

Автореферат разослан 27 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы одной из наиболее перспективных областей потенциального использования распределенных самоорганизующихся робототехнических систем стала биомедицина. Предполагается, что робототехническая система, состоящая из групп миниатюрных биомедицинских микророботов, будет способна решить комплексные задачи удаленной диагностики, терапии и хирургии, стоящие перед современной высокотехнологичной медициной.

В групповой робототехнике применяются большие группы миниатюрных роботов, образующих децентрализованные системы. Такие роботы являются автономными и действуют на основе доступной им локальной информации. Критическими факторами для реализации систем групповой робототехники в биомедицине являются физические размеры и стоимость микророботов. Следовательно, при проектировании таких систем особое внимание должно уделяться вопросам автономности и миниатюризации каждого из членов группы, что требует упрощения их структуры и поиска эффективных методов управления ими. Поэтому актуален подход, основанный на теории самоорганизации для достижения требуемого поведения агентов на уровне всей группы, а не на индивидуальном уровне отдельных микророботов.

Поскольку процедуры проведения экспериментальных исследований состоящих из автономных агентов систем в процессе их проектирования и испытаний весьма трудоемки, то, как с технической, так и с экономической точки зрения, оправдано проведение исследований многоагентных систем с помощью имитационного моделирования. Так как компьютерные методы имитации и моделирования поведения биомедицинских микророботов на данный момент все еще являются несовершенными и недостаточно разработанными, результаты их применения часто оказываются неточными. Остаются актуальными развитие теории и технических принципов построения многоагентных систем, включающих группы автономных агентов, совершенствование их моделей и методов моделирования их поведения.

Для получения адекватных оценок соответствия теоретической модели физической системе автономных агентов и прогнозирования поведения микророботов необходимо выработать объективные критерии эффективности моделей. Решение этой достаточно сложной задачи обеспечит выбор оптимальной структуры и параметров моделей.

Несмотря на то, что к настоящему времени уже разработаны несколько концепций математического описания и моделирования многоагентных систем, известных из трудов отечественных авторов В.И. Городецкого, Д.А. Пospelова и В.Б. Тарасова и зарубежных исследователей M. Wooldridge и N. Jennings, A. Rao и M. Georgeff, V.S. Subrahmanian, Y. Shoham и K. Leyton-Brown, в которых, в том числе, представлены и промышленные инструментальные средства реализации многоагентных систем, вопросам их использования в области биомедицинских приложений не уделено должного внимания. Так, в общеизвестных методиках описания поведения автономных агентов не учитываются ха-

рактеристики и условия функционирования элементов робототехнических систем внутри биообъектов. Кроме того, до сих пор не найдены формализованные специализированные алгоритмы поведения групп микророботов при их функционировании в биомедицинских системах, в то время как использование универсальных алгоритмов в подобных сложных системах обычно оказывается невозможным.

Все это обуславливает необходимость дополнительных исследований по поиску средств адекватного математического описания, разработки информационных моделей многоагентных систем, создания методов компьютерного моделирования поведения групп автономных агентов, что позволит повысить достоверность прогнозирования их поведения. Таким образом, тема диссертационного исследования **актуальна**.

Объект исследования – автономные роботы и их группы в биомедицинских системах удаленной диагностики, терапии и хирургии.

Предмет исследования – информационные модели, методы и алгоритмы моделирования поведения групп автономных агентов с помощью многоагентных систем на основе теории самоорганизации поведения.

Целью работы является разработка на основе принципов самоорганизации и теории многоагентных систем информационной модели поведения групп автономных агентов, предназначенных для выявления и обезвреживания пораженных клеток биообъектов в биомедицинских системах.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные **научные задачи**.

1. Разработка многоуровневой информационной модели поведения групп автономных агентов для биомедицинских систем, учитывающей процессы коллективной локализации для обезвреживания пораженных клеток в биообъектах.

2. Разработка алгоритма поведения групп автономных интеллектуальных агентов, решающего задачи коллективной локализации для обезвреживания пораженных клеток в биообъектах.

3. Имитационное моделирование поведения самоорганизующихся групп автономных агентов, а также алгоритмическая, структурная и программная реализации многоагентной системы.

4. Разработка системы критериев для оценки поведения групп автономных агентов, позволяющей эффективно прогнозировать их дальнейшие действия путем моделирования.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории многоагентных систем, принципы групповой робототехники и самоорганизации поведения автономных агентов. Имитационное моделирование проведено в среде *Matlab*.

Научная новизна работы состоит в развитии теоретических основ и технических принципов построения многоагентных систем биомедицинской диагностики и заключается в следующем:

– создана многоуровневая информационная модель многоагентной системы для описания функционирования микророботов в биообъекте, позволяющая повысить вероятность правильного прогнозирования поведения групп автономных агентов;

– разработан алгоритм поведения групп автономных агентов, позволяющий объединить выполнение функций коллективной локализации пораженных клеток и их обезвреживания в биообъектах;

– разработана структура многоагентной системы, отличающаяся применением алгоритма функционирования специализированных биомедицинских агентов с особыми характеристиками и свойствами, позволяющего объединить выполнение функций коллективной локализации пораженных клеток и их обезвреживания в биообъектах;

– разработана универсальная система критериев оценки эффективности алгоритмов поведения самоорганизующихся групп автономных агентов, реализованных на основе различных моделей, по результативности решения ими биомедицинских задач.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная многоагентная система, моделирующая поведение самоорганизующихся групп автономных агентов по предложенному алгоритму с использованием установленных критериев эффективности, обеспечивает необходимые предпосылки для разработки и практического применения систем биомедицинской групповой робототехники для диагностирования и лечения различных заболеваний человека.

На защиту выносятся:

1) многоуровневая информационная модель поведения самоорганизующихся групп автономных агентов для решения задач коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток биообъектов и прогнозирования поведения групп автономных агентов в биомедицинских системах;

2) алгоритм поведения самоорганизующихся групп автономных агентов с возможностью интеграции процедур коллективной локализации пораженных клеток в биообъектах и их обезвреживания;

3) структурная и программная реализация многоагентной системы, использующей алгоритм функционирования специализированных автономных агентов для решения задач биомедицинской диагностики;

4) система критериев для оценки достоверности прогнозирования поведения самоорганизующихся групп автономных агентов, обеспечивающая сравнение алгоритмов поведения групп автономных агентов в биомедицинских системах.

Реализация и внедрение результатов. Результаты проведенных исследований внедрены в ФГБУ «Саратовский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии» Министерства здравоохранения РФ, в ООО «БИОСОФТ-М» (г. Москва), а также использованы в научно-

исследовательских работах и образовательном процессе кафедр «Информационные системы и технологии» и «Информационные технологии и менеджмент в медицинских и биотехнических системах» Пензенского государственного технологического университета.

Достоверность результатов работы обоснована строгой аргументацией выдвигаемых научных положений, корректным использованием математического аппарата и общепризнанных научных методик, согласованностью результатов математического и имитационного моделирования, непротиворечивостью выводов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном симпозиуме «Надежность и качество» (г. Пенза, 2012), международных конференциях «Современные информационные технологии» (г. Пенза, 2010, 2009), всероссийских конференциях «Медицинские информационные системы» (г. Таганрог, 2012, 2010), «Методы обучения и организация учебного процесса в вузе» (г. Рязань, 2011), «Информационные и управленческие технологии в медицине и экологии» (г. Пенза, 2010), всероссийской научной школе «Нейробиология и новые подходы к искусственному интеллекту и к науке о мозге» (г. Ростов-на-Дону, 2011, 2010).

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из которых 4 – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. В работах, опубликованных в соавторстве, лично автором получены все результаты, составляющие содержание диссертации, в том числе теоретические обоснования и результаты математического и имитационного моделирования. Все приведенные в работе новые результаты получены лично автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по главам, заключения, библиографического списка из 70 наименований и приложений. Работа изложена на 151 странице основного текста, содержит 42 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна работы и практическая значимость, указаны методы исследования, перечислены основные выносимые на защиту положения.

В первой главе анализируются перспективы применения теории самоорганизующихся систем для решения прикладных задач, в том числе задач медицинской диагностики, а также рассматриваются существующие методы моделирования поведения больших самоорганизующихся групп автономных агентов (АА) для выявления ограничений на их применение в биомедицинских системах (БМС).

В зарубежной литературе неоднократно обсуждался подход к разработке самоорганизующихся систем с применением компьютерного моделирования.

Использование адекватных математических и имитационных моделей позволяет составить достаточно уверенный прогноз функционирования микророботов, сократить сроки и затраты на проектирование робототехнических систем, уточнить технические требования к их параметрам. Применение современных вычислительных средств позволяет оптимизировать систему по совокупности параметров.

Для прогнозирования поведения групп с успехом используется математический аппарат теории самоорганизующихся систем, на основе которого можно создать соответствующие модели, вычислительные методы и алгоритмы. Сравнительный анализ существующих алгоритмов дает основания для выбора модельного подхода к описанию формальных связей между АА на уровне агента и на уровне группы в системе с помощью точного отображения пространства. Системы, состоящие из групп микророботов, являются нелинейными и могут проявлять сложные формы поведения. Другая особенность таких систем обусловлена сложностью процессов взаимодействия между роботами, последствия которых в общем случае трудно оценивать и прогнозировать.

Сущность принципа самоорганизации таких групп заключается в формировании структур из неупорядоченных элементов внутри системы без какого-либо регулирующего воздействия извне. Вследствие этого многие самоорганизующиеся системы демонстрируют эффект появления признаков целенаправленного поведения там, где его сложно ожидать по причине примитивности элементов, составляющих самоорганизующуюся систему.

Для системного изучения поведения групп микророботов в БМС необходимы модели и алгоритмы, описывающие поведение группы с точностью, достаточной для качественного прогнозирования результата деятельности микророботов. При этом должны быть заданы только свойства отдельных членов группы как АА, способных к планированию и выполняющих в определенном порядке последовательность действий, приводящих АА в процессе их перемещения к целевой области биообъекта, что иллюстрируется рисунком 1.

Агентное моделирование реализуется на основе многоагентной системы (МАС), включающей АА, в роли которых могут выступать и модели микророботов. Данный метод имитационного моделирования позволяет исследовать поведение децентрализованных АА, а также то, как их функционирование отражается на поведении всей системы в целом. Если поведение АА определяется на индивидуальном уровне, то глобальное поведение их совокупности проявляется как результат деятельности полного множества АА.

Таким образом, для проведения агентного моделирования поведения самоорганизующихся групп биомедицинских микророботов необходима разработка МАС, при этом должна быть определена ее структура, а также детализированы функции и структура составляющих МАС АА. В заключении главы уточнены основные требования к составу и функциям МАС.

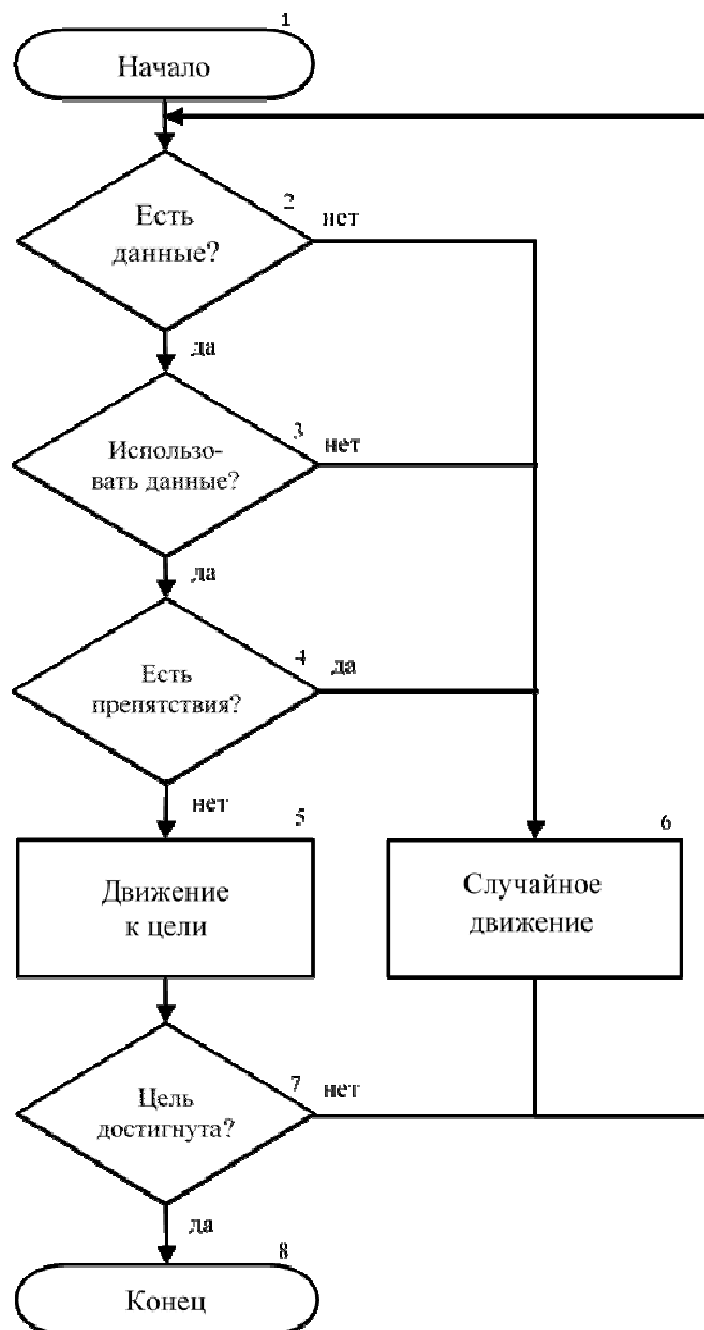


Рисунок 1 – Алгоритм, иллюстрирующий перемещение АА в условиях неопределенности

Вторая глава посвящена разработке математического аппарата для описания действий группы автономных микроботов в условиях фонового шума и математического моделирования их поведения. Основные требования к математическому аппарату, который должен составить основу для многоуровневой информационной модели поведения самоорганизующихся групп АА, сводятся к адекватности отображения процессов коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток биообъектов.

Для составления базовой модели локализации микроботов использованы физические принципы броуновского движения, описываемые уравнениями Ланжевена и Колмогорова. Конкретные траектории перемещения АА за интер-

вал времени dt описываются дифференциальным уравнением Ланжевена со стохастическими производными

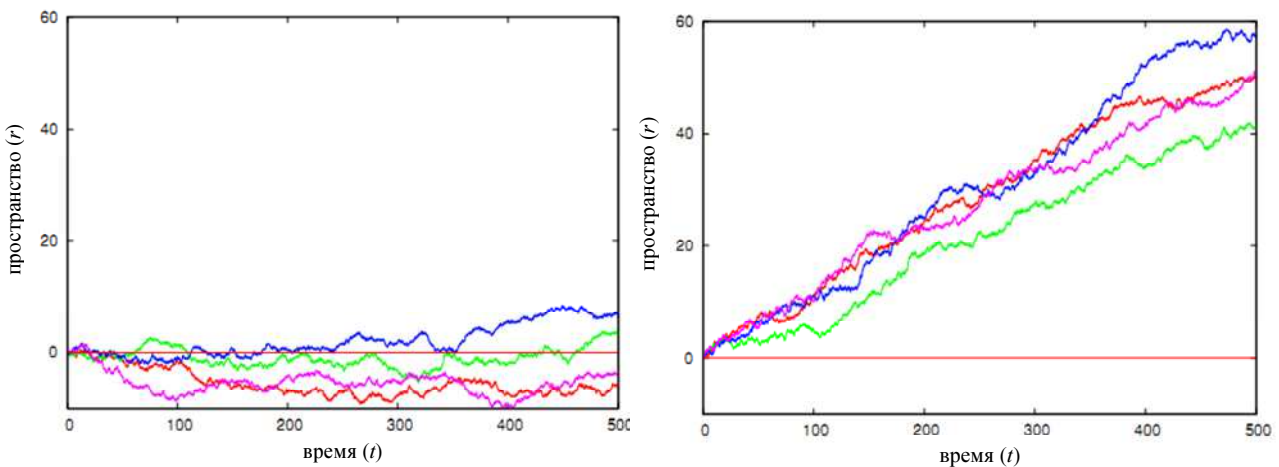
$$\frac{d\bar{R}}{dt} = A(\bar{R}, t) + B(\bar{R}, t)F(t), \quad (1)$$

где \bar{R} описывает положение микроробота в пространстве; t – время; $A(\bar{R}, t)$ – коэффициент дрейфа; $B(\bar{R}, t)$ – коэффициент диффузии; $F(t)$ – нормализованная шумовая составляющая. Из уравнения Ланжевена может быть получено дифференциальное уравнение в частных производных – прямое уравнение Колмогорова (уравнение Фоккера-Планка). С учетом плотностей распределения вероятностей появления частицы в локальной области уравнение дает глобальное описание ансамблей:

$$\frac{\partial \rho(\bar{r}, t)}{\partial t} = -\nabla(\bar{A}(\bar{r}(t), t)\rho(\bar{r}, t)) + \frac{1}{2}Q\nabla^2(B^2(\bar{r}(t), t)\rho(\bar{r}, t)), \quad (2)$$

где $\rho(\bar{r}, t)dxdy$ – вероятность появления частицы в местоположении \bar{r} внутри прямоугольника со сторонами dx и dy в момент времени t ; \bar{A} – дрейф; B – диффузия; Q – коэффициент корреляции; ∇ – дифференциальный оператор.

На рисунке 2 в качестве иллюстрации применения уравнения (1) представлены результаты расчета четырех одномерных траекторий движения отдельных агентов, начинающихся при $r = 0$, с дрейфом и без него.



а) четыре траектории при $A=0$

б) четыре траектории при $A=0,1$

Рисунок 2 – Траектории движения отдельных агентов, построенные с помощью уравнения Ланжевена в одном измерении

Пример решения уравнения (2) в графическом виде представлен на рисунке 3, изображающем плотность распределения вероятности ρ в одномерном пространстве с дрейфом $A=0,1$, диффузией $B=0,6$, и установке, близкой к δ -функции в точке $r=0$. Линия $r=At=0,1t$ показывает траекторию, по которой наиболее вероятно будет направлено движение всей группы агентов в целом.

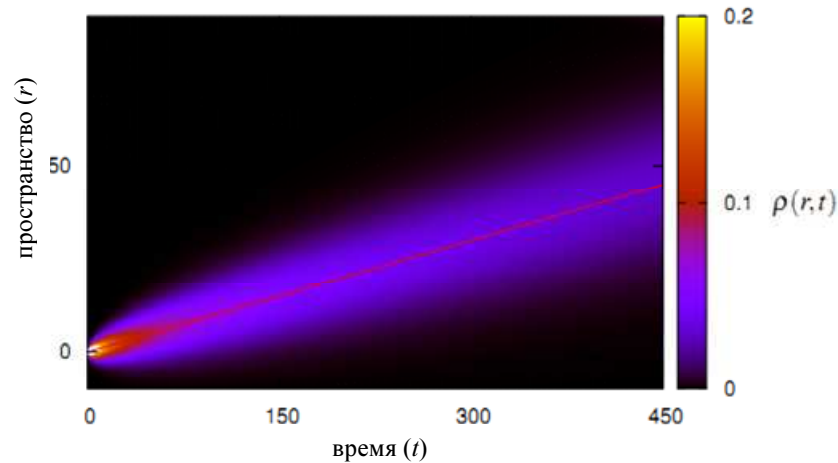


Рисунок 3 – Плотность распределения вероятности $\rho(r, t)$ в одномерном пространстве, вычисленная с помощью уравнения Фоккера-Планка

Рисунок 4 демонстрирует взаимосвязь между траекториями отдельных АА и глобального распределения ансамблей. Здесь изображен трехмерный график плотности распределения вероятности ρ появления микробота, начавшего движение в момент времени $t=0$ из исходной точки $r=0$, в заданной точке одномерного пространства. Расчет выполнен с помощью уравнения Фоккера-Планка с дрейфом $A=0,1$ и диффузией $B=0,3$. На плоскость « $r-t$ » нанесены четыре траектории, рассчитанные с помощью уравнения Ланжевена.

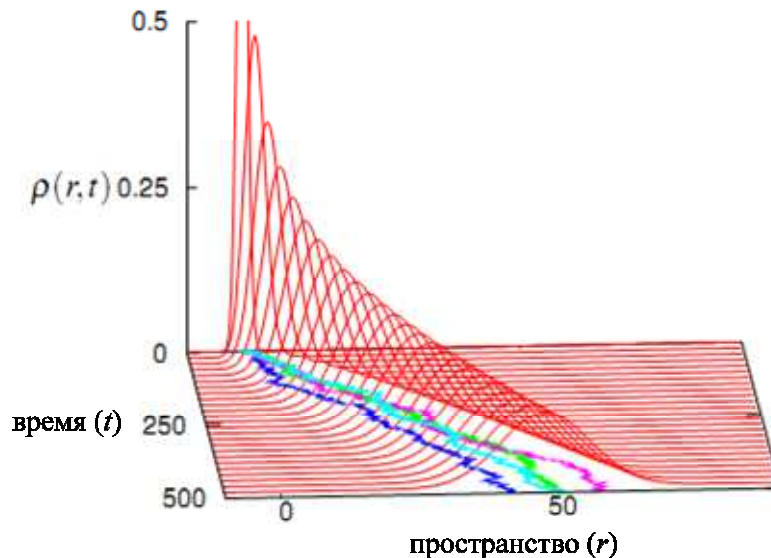


Рисунок 4 – Взаимосвязь плотности распределения вероятности $\rho(r, t)$ с траекториями движения микроботов

Рисунок 5, а иллюстрирует агентно-ориентированный подход к определению плотности распределения микроботов, в соответствии с которым микроботы считаются расположенными близко, если их разделяет дистанция не более $r_{sensor}/2$. Таким образом, оценочная плотность локализации микроботов в полном радиусе действия сенсоров равна $6/\pi r_{sensor}^2$. Возможен и другой – пространственно-ориентированный подход к определению плотности распре-

деления микроботов в пространстве, применение которого иллюстрируется рисунком 5, б, оценка производится на основе гистограммы.

С учетом специфики предметной области, заключающейся в сложности разделения объекта деятельности групп микроботов на условные ячейки (предполагается, что микроботы функционируют внутри биологических объектов на тканевом и клеточном уровнях), признано целесообразным использовать агентно-ориентированный подход.

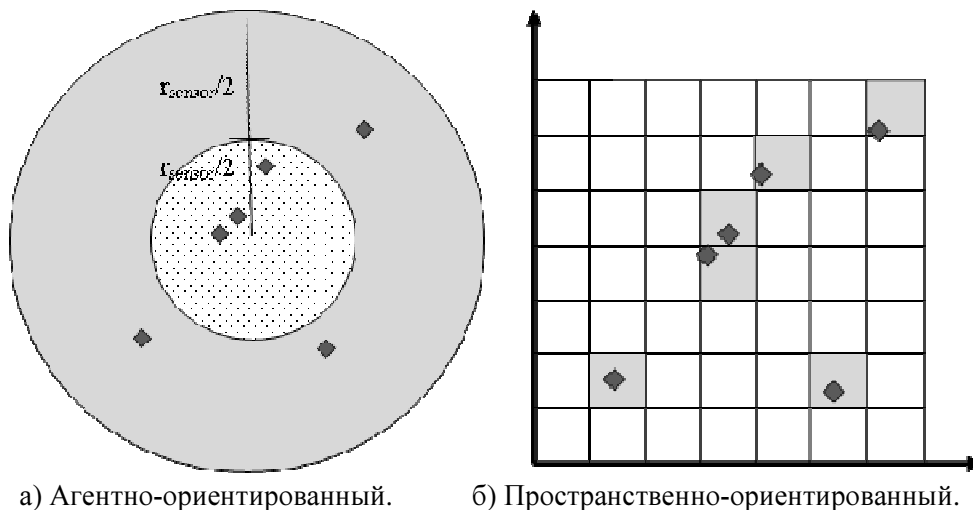


Рисунок 5 – Подходы к определению плотности распределения микроботов

Описанная физическая модель была расширена до обобщенной модели сообщающихся групп микроботов, основанной на эвристических рассуждениях. Поэтому, для составления алгоритма, описывающего поведение групп интеллектуальных агентов в биомедицинских системах, требуется адаптация модели – в частности, выбор таких коэффициентов A и B в уравнениях (1) и (2), которые бы учитывали специфику использования в биомедицинских системах. Проведено обоснование выбора значений указанных коэффициентов.

Третья глава посвящена разработке алгоритма поведения самоорганизующихся групп АА для БМС с помощью теории самоорганизующихся систем. На основе обобщенного алгоритма перемещений в условиях неопределенности разработан модифицированный алгоритм для коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток внутри организма человека, учитывающий специфику использования медицинских микроботов. Суть модификации состоит в корректировке последовательности целенаправленных действий микроботов, а также в подборе таких параметров и коэффициентов для формул (1) и (2), которые наиболее точно отражали бы условия решаемой задачи и БМС в целом.

С целью описания взаимодействия между выступающими в роли АА микроботами, а также их характеристик, введены некоторые дополнительные параметры и переменные, назначение которых состоит в следующем.

Переменная G характеризует процесс сбора микророботов в целевых областях, при этом в случае нахождения микроробота в целевой области значение G принимается равным значению фиксированного коэффициента r_{add} , во всех иных случаях G считается равным нулю.

Переменная T связана с обменом между микророботами сведениями друг о друге. Так как этот процесс происходит на микроскопическом уровне, его механизм должен быть предельно упрощен. Поэтому при имитационном моделировании принимается допущение о том, что эти сведения заключаются в характеристике распределения потенциального поля по расчетной области. Так, для расчета мгновенного значения T находится значение суммы разностей значений потенциального поля данного микроробота и аналогичных значений всех остальных микророботов.

Переменная C описывает потребление микророботом энергии из его индивидуального запаса в каждый момент времени. Количество энергии, расходуемой микророботом, задается с помощью коэффициента $r_{consumpt}$.

Основной характеристикой микроробота является значение интенсивности потенциального поля P в точке его расположения, определяющей количество энергии, которой распоряжается микроробот. Поле изменяется непрерывно и в каждый момент времени может быть определено по правилу перерасчета потенциального поля с учетом текущих значений переменных сбора, обмена и потребления. На рисунке 6 представлена схема алгоритма коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток микророботами.

Далее выведены уравнения, определяющие значения переменных, характеризующих сбор G , обмен T , потребление C , значение потенциального поля P и коэффициент для шагов градиентного подъема g_{alg} :

$$G(\bar{R}_i, t) = \begin{cases} r_{add}, & \text{если } \bar{R}_i(t) \text{ находится в целевой области;} \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

$$C(\bar{R}_i, t) = P(\bar{R}_i, t)r_{consumpt}; \quad (4)$$

$$T(\bar{R}_i, t) = \sum_{j \in \epsilon} \left(P(\bar{R}_i, t) - P(\bar{R}_j, t) \right) r_{transfer}. \quad (5)$$

Правило перерасчета потенциального поля сформулировано в следующем виде:

$$P(\bar{R}_i, t + \Delta t) = P(\bar{R}_i, t) + G(\bar{R}_i, t) - T(\bar{R}_i, t) - C(\bar{R}_i, t) \quad (6)$$

Коэффициент шагов градиентного подъема для определения порога сосредоточения δ_{sat} можно выразить как

$$g_{alg}(\bar{R}_i, t) = \max \left(\min \left(\frac{P(\bar{R}_i, t) - \delta_{aggr}}{1000}, 0,75 \right), 0 \right); \quad (7)$$

$$\frac{\delta_{sat} - \delta_{aggr}}{1000} = 0,75 \Leftrightarrow \delta_{sat} = 750 + \delta_{aggr}. \quad (8)$$

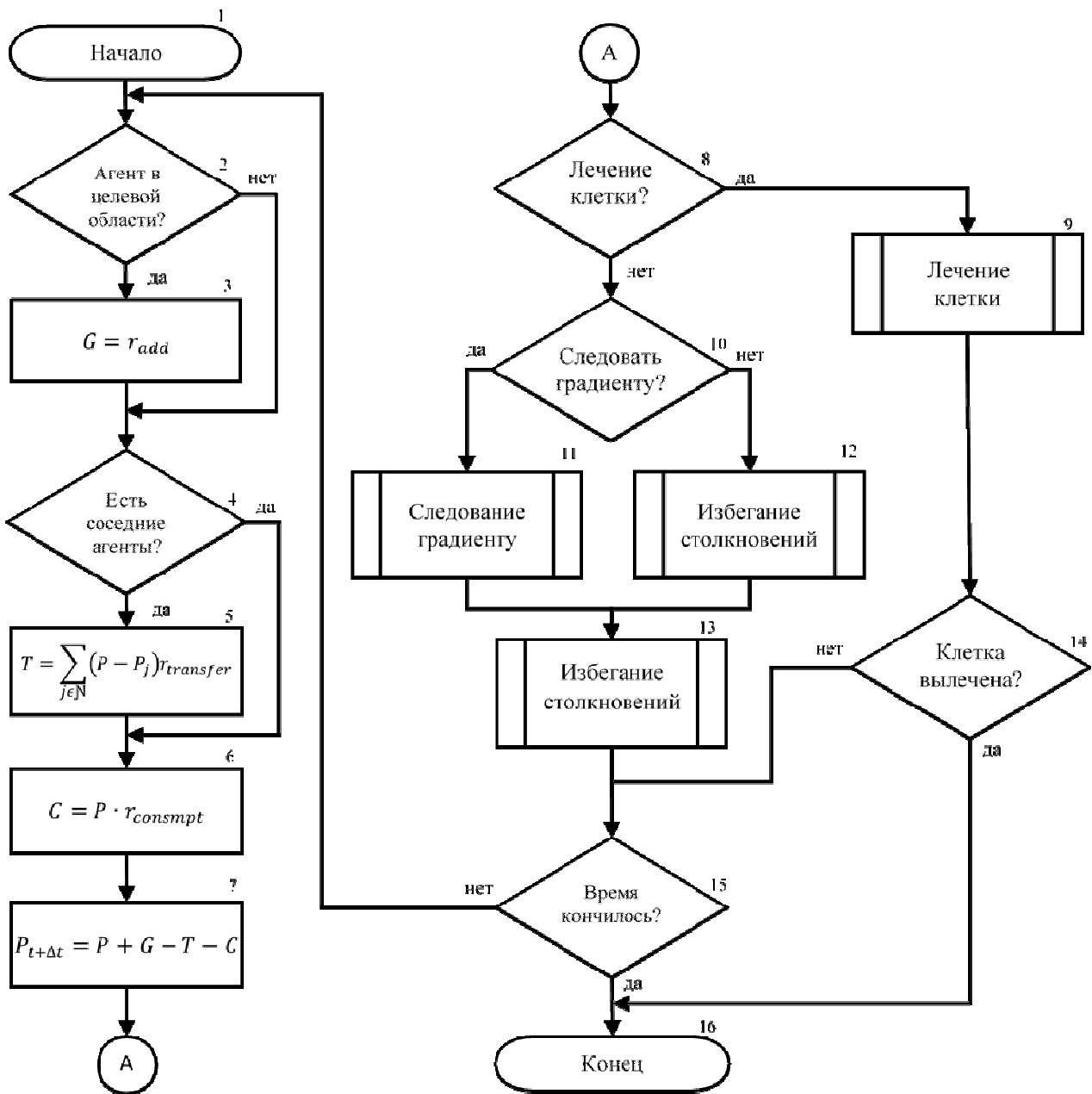


Рисунок 6 – Алгоритм поведения агентов при коллективной локализации и обезвреживании пораженных клеток

Для применения уравнений обобщенной модели в алгоритме коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток в соответствии с формулами (1) и (2) находятся коэффициенты A и B уравнений, описывающих траектории микророботов и плотность распределения областей расположения их ансамблей. С помощью этих коэффициентов, рассчитанных с учетом специфики биомедицинских систем, обобщенные уравнения используемого математического аппарата могут быть применены для прогнозирования поведения самоорганизующихся групп АА в соответствии с выражениями

$$\bar{A} = d(\rho) g_{\text{mod}}(P) \frac{\nabla P}{\|\nabla P\|} v, \quad A = 0, \text{ если } \|\nabla P\| = 0, \quad (9)$$

где g_{mod} – эффективный коэффициент шагов градиентного подъема, v – номинальная скорость, ограничивающий коэффициент $d(\rho) \in [0, 1]$, $d(0) = 1$, $d(\rho) = 0$

для максимальной плотности ρ_{max} , и

$$B = (1 - g_{mod}d)vd, \quad (10)$$

причем в данном случае коэффициент d характеризует нормализованное пространственное смещение (смещение обратно пропорционально плотности).

В качестве инструмента для оценки адекватности прогнозирования поведения самоорганизующихся групп микророботов, действующих по алгоритму коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток, разработана следующая система критериев:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{rel}; \\ \bar{\rho}; \\ \delta_{aggr}; \\ N/r_{rel}; \\ N/\rho; \\ N/\delta_{aggr}; \\ \rho, \end{array} \right.$$

где N – количество микророботов, сосредоточенных в целевых областях; r_{rel} – соотношение радиусов целевых областей; ρ – плотность микророботов в пространстве; $\bar{\rho}$ – средняя плотность микророботов; δ_{aggr} – порог объединения.

В четвертой главе описывается программная реализация МАС и анализируются результаты имитационного моделирования поведения самоорганизующихся групп АА. Кроме того, по результатам моделирования проводится оценка достоверности прогнозирования поведения с использованием разработанной системы критериев.

Для создания имитационной МАС, реализующей алгоритм поведения микророботов, а также для разработки методики проведения имитационного моделирования выполнен анализ планируемых (ожидаемых) результатов. В ходе имитационного моделирования ставилась цель выяснить, будут ли микророботы действовать запланированным образом и оценить степень достоверности прогноза их действия. Кроме того, необходимо было найти, насколько различается степень достоверности при моделировании с использованием усовершенствованного вычислительного алгоритма по сравнению с базовым алгоритмом. При этом принимались во внимание некоторые ограничения применения моделей, отражающие специфические условия использования в БМС. Указанные ограничения сводятся к следующему.

Поскольку с помощью разработанного алгоритма описывается поведение групп микророботов в процессе поиска пораженных участков тканей и обезвреживания пораженных клеток, считается, что микророботы уже попали в нужную область внутри человеческого тела и функционируют на микроскопическом уровне. Так как исследуется обобщенный алгоритм поведения больших самоорганизующихся групп микророботов в БМС, а не конкретное техническое воплощение микророботов, то за целевые области их локализации принимаются клетки абстрактного злокачественного новообразования.

Ограничения касаются также предметной области применения алгоритма. Наиболее значимым из них является ограничение по продолжительности проведения имитационного моделирования. Практическим смыслом этого условия является ограниченный запас энергии, которой может располагать микроробот для осуществления передвижения, взаимодействия и обезвреживания поражен-

ных клеток тканей. Микророботы, израсходовавшие имеющийся у них первоначальный (условный) запас энергии, прекращают деятельность. Момент такого прекращения в общем случае индивидуален для каждого автономного микроробота. Ход имитационного моделирования заканчивается, когда не остается ни одного дееспособного (обладающего энергией) микроробота.

Современное состояние технологии биомедицинских материалов показывает возможность изготовления биоразлагаемых микророботов, предназначенных для применения внутри тела человека. Поэтому, с практической точки зрения, можно считать, что через некоторое время после окончания имитационного моделирования происходит «рассасывание» микророботов в пределах организма – даже если они не выполнили свою задачу. Таким образом, процесс моделирования поведения группы самоорганизующихся микророботов с ограничением в виде конечной продолжительности имитационного моделирования и подведения его итогов обуславливает требование о необходимости завершения микророботами выполнения своих задач до окончания выполнения ими своих функций, рассасывания и вывода из организма.

Другим условием является необходимость обезвреживания клеток, проявляющих признаки заболевания. Для удовлетворения этого условия микророботы должны быть способны осуществлять минимально необходимую диагностику состояния клетки, в которой они находятся. Предполагается, что механизм обезвреживания носителей заболевания построен на принципах фагоцитоза, осуществляемого лейкоцитами, и включающего процессы обволакивания целевой клетки и запуска процесса ее разрушения с последующим рассасыванием в организме, либо выделением во внешнюю среду. Для соответствия этому механизму моделируемый микроробот должен совместить данные о своем месторасположении с координатами пораженной клетки и затем запустить процесс ее уничтожения. После этого клетка считается обезвреженной, а микроробот исчезает с поля (расчетной области) проведения имитационного моделирования, оставаясь связанным с клеткой.

В таблице 1 представлены характеристики алгоритма коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток. Расстояния даны в диаметрах микророботов d , а значения зависящих от времени величин приведены к шагу итерации Δt . Результаты проведенного имитационного моделирования в графическом виде приведены на рисунке 7.

Таблица 1 – Параметры имитационного моделирования

Параметр	Значение
Количество микророботов	375
Размеры арены	$80d \times 40d$
Радиусы целевых областей	$1d$ и $5d$
Диаметр микророботов	$1d$
Коммуникационное расстояние $d_{comDist}$	$3,5d$
Расстояние уклонения $d_{avoidDist}$	$0,75d$
Скорость микроробота	$0,25d$
Коэффициент сбора r_{add}	$50/\Delta t$
Коэффициент потребления $r_{consmpt}$	$0,01/\Delta t$
Коэффициент обмена $r_{transfer}$	$0,5/\Delta t$
Порог объединения δ_{aggr}	0

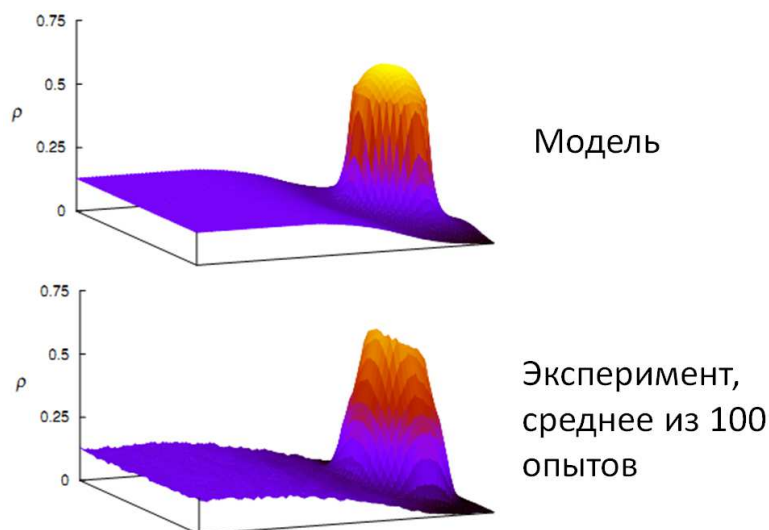


Рисунок 7 – Графическое представление результатов имитационного моделирования алгоритма коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток

По результатам выполнения расчетных процедур в процессе имитационного моделирования получено значение средней плотности размещения микроботов, которое составило $0,12/d^2$. В таблице 2 представлены числовые данные по оценке эффективности прогнозирования поведения самоорганизующихся групп АА.

Таблица 2 – Результаты оценки эффективности прогнозирования

Критерии	Математическое ожидание		Стандартное отклонение		Коэффициент корреляции	Стандартное отклонение модель/ алгоритм	
	Модель	Алгоритм	Модель	Алгоритм			
Коэффициент шагов градиентного подъема в зависимости от потенциального поля g/P	0,37	0,38	0,29	0,30	0,999	0,01	
Количество микроботов в зависимости от их средней плотности (N/ρ)	для левой целевой области	64,34	67,91	27,96	30,38	0,977	8,74
	для правой целевой области	142,95	139,47	28,38	24,62	0,987	2,89
Количество микроботов в зависимости от порога объединения (N/δ_{aggr})	для левой целевой области	69,25	72,73	39,77	36,33	0,989	7,60
	для правой целевой области	151,46	151,76	71,36	71,39	0,999	6,59
Количество микроботов в зависимости от соотношения радиусов областей (N/r_{rel})	для левой целевой области	77,97	80,45	38,19	39,83	0,995	5,15
	для правой целевой области	77,97	77,96	38,19	40,08	0,997	3,74

На основании полученных данных выполнена оценка достоверности прогнозирования поведения самоорганизующихся групп микроботов с использованием разработанной системы критериев, которая позволила заявить о достаточной эффективности разработанной многоуровневой информационной моде-

ли. Следовательно, работа создает необходимый научный задел для дальнейших исследований и практического применения самоорганизующихся групп микророботов в биомедицинских системах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана многоуровневая информационная модель поведения самоорганизующихся групп автономных агентов в биомедицинских системах, позволяющая эффективно прогнозировать результат выполнения поставленных специфических задач группам биомедицинских микророботов по локализации пораженных клеток в биообъектах.

2. На основе обобщенного алгоритма перемещений агентов в условиях неопределенности разработан алгоритм, позволяющий объединить процессы коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток в биообъектах группами автономных агентов.

3. Осуществлены структурно-алгоритмическая и программная реализации разработанной многоагентной системы, позволяющие посредством имитационного моделирования в среде *Matlab* исследовать поведение самоорганизующихся групп микророботов в процессе коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток с изменяемыми условиями и параметрами.

4. Разработана система критериев оценки характеристик текущего поведения и прогнозирования дальнейших действий микророботов с учетом совокупности их параметров, в том числе компактности локализации и общего количества достигших цели микророботов. Для биомедицинских приложений получена вероятность правильного прогнозирования результатов не ниже 93 %.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Истомин, В.В. Алгоритм поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем на основе теории роевого интеллекта [Текст] / В.В. Истомин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань. – 2013. – № 3. – С. 54–62.

2. Истомин, В.В. Обоснование разработки информационных моделей поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем [Текст] / В.В. Истомин, М.Ю. Михеев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 134. – № 9. – С. 98–104.

3. Истомин В.В. Прогнозирование поведения групп автономных интеллектуальных агентов на основе теории многоагентных систем [Электронный ресурс] / В.В. Истомин // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 18. – № 4. – С. 29–32.

4. Истомин, В.В. Организация виртуального обучения по направлениям 200300 и 200400 [Текст] / В.В. Истомин // Медицинские информационные системы: Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. - № 8. – С. 223–227.

Публикации в других изданиях:

5. Истомин, В.В. Повышение качества прогнозирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем [Текст] / В.В. Истомин, М.Ю. Михеев // Надежность и качество – 2012: Труды Международного симпозиума. – Пенза. – 2012. – Т. 2. – С. 467–470.

6. Истомин, В.В. Синтез информационных моделей поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем [Текст] / В.В. Истомин, М.Ю. Михеев // Актуальные проблемы науки и образования: Сборник материалов IV научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пенза. – 2012. – Ч. I. – С. 81–85.

7. Истомин, В.В. Виртуальная лаборатория удаленного доступа для биотехнического образовательного профиля [Текст] / В.В. Истомин, Т.В. Истомина // Методы обучения и организация учебного процесса в вузе: Сборник статей II всероссийской научно-методической конференции. – Рязань: РГРТУ, 2011. – С. 111–115.

8. Истомин, В.В. Методы и средства распознавания сигналов на основе применения нейросетевых технологий [Текст] / В.В. Истомин, М.Ю. Михеев // Современные информационные технологии: Труды международной научно-технической конференции. – 2010. – № 12. – С. 20–22.

9. Истомин, В.В. Совершенствование оценки эффективности нейросетевого алгоритма распознавания сигналов [Текст] / В.В. Истомин, Б.А. Истомин, Т.В. Истомина // Нейробиология и новые подходы к искусственному интеллекту и к науке о мозге: Тезисы трудов всероссийской школы для молодежи. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 238–242.

10. Истомин, В.В. Методы и средства распознавания сигналов на основе применения нейросетевых технологий [Текст] / В.В. Истомин, М.Ю. Михеев // Инновационные технологии в экономике, информатике, образовании и медицине: Сборник статей VII Межрегиональной научно-практической конференции студентов и аспирантов. – Пенза. – 2010. – С. 25–28.

11. Истомин, В.В. Организация виртуального обучения направлениям 200300 и 200400 [Текст] / В.В. Истомин // Информационные и управленческие технологии в медицине и экологии: Сборник статей IV Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза. – 2010. – С. 45–50.

12. Истомин, В.В. Виртуальное обучение на кафедре ИТММБС ПГТА [Текст] / В.В. Истомин, Т.В. Истомина // Актуальные проблемы науки и образования: Сборник материалов III научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пенза. – 2010. – Ч. I. – С. 23–27.

13. Истомин, В.В. Интерпретация обобщенных структурных моделей в пространстве IS-анализа [Текст] / А.Б. Щербань, В.В. Истомин // Актуальные

проблемы науки и образования: Сборник материалов II научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пенза. – 2009. – Ч. II. – С. 75–81.

14. Истомин, В.В. Обобщенные структурные модели IS-анализа признакового пространства [Текст] / А.Б. Щербань, В.В. Истомин // Современные информационные технологии: Труды международной научно-технической конференции. – 2009. – № 10. – С. 79–83.

15. Истомин, В.В. Систематизация методов сжатия информации [Текст] / В.В. Истомин, Т.В. Истомина // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сборник трудов VIII Международной конференции и выставки. - 2006. – Москва: РНТОРЭС, 2006. – Выпуск VIII-1. – С. 524–527.

16. Истомин, В.В. Классификация методов сжатия информации [Текст] / В.В. Истомин, М.Ю. Лупанов // VIII Королёвские чтения: Сборник докладов всероссийской молодежной научной конференции с международным участием. – Самара: СГАУ, 2005. – С. 87–89.

Истомин Виктор Владимирович

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ
САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ГРУПП АВТОНОМНЫХ
АГЕНТОВ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.17 – теоретические основы информатики

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

Компьютерная верстка Т.А. Антиповой

Сдано в производство 26.11.13. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага типогр. № 1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд л. 1,12. Заказ № 2393. Тираж 100.

Пензенский государственный технологический университет.
440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1^а/11