

## НАНОРОБОТЫ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ АДАПТИВНОЕ ПОИСКОВОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОДНОКЛЕТОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ

**В.И. Черноиванов, докт.техн.наук, академик РАН  
(ГОСНИТИ, тел.8-495-371-84-55, e-mail:vichernoivanov@mail.ru)**

**М.И. Гулюкин, докт.биол.наук, академик РАН  
(ВИЭВ, тел.8-495-970-03-68, e-mail:admin@viev.ru)**

**Г.К. Толоконников, канд.физ.-матем.наук  
(ГОСНИТИ, тел.8-499-174-81-69, e-mail:gktolo@mail.ru)**

**Аннотация.** Работа посвящена проблеме создания искусственных автономных агентов, в частности, создания систем управления нанороботов. Определённые надежды в её решении связываются с изучением и дальнейшим моделированием адаптивного поискового поведения одноклеточных животных. В проводимых авторами теоретических и экспериментальных исследованиях за основу взяты новые методы математического моделирования с помощью нового исчисления математических конструкций и хорошо изученная кишечная бактерия *Escherichia coli*. Предложена модель наноробота, порождающего новые алгоритмы поведения в незнакомой обстановке.

**Ключевые слова:** нанороботы, белки, бактериальный жгутик, искусственный интеллект, автономный агент, исчисление математических конструкций.

1. В работах [1-5] предложено и развивается уже более года направление на стыке нанотехнологий, биотехнологий, искусственного интеллекта (ИИ), теории дедуктивных систем и исчислений математических конструкций с приложениями в области создания машин и механизмов, в частности, сельхозтехники нового поколения, имеющих повышенную автономность систем управления.

Задача создания искусственных автономных агентов, как известно, является весьма актуальной, но всё ещё далёкой от приемлемого решения [6]. Определённые надежды в её решении связываются с изучением и дальнейшим моделированием адаптивного поискового поведения одноклеточных животных. В проводимых авторами теоретических и экспериментальных исследованиях за основу взяты новые методы математического моделирования с помощью развиваемого в [7-8] исчисления математических конструкций и хорошо изученная кишечная бактерия *Escherichia coli* (штамм K-12). Адаптивное поисковое поведение *E.coli* исследуется и моделируется в работах по ИИ [9-11], в Институте робототехники и интеллектуальных систем (ETH Zurich, Швейцария) создан микроробот, имитирующий движения *E.coli*, так называемый, «искусственный бактериальный жгутик» (*Artificial Bacterial Flagella — ABF*) [12-13]. В настоящее время *ABF* дорабатывается, в частности, как медицинский наноробот, запускаемый в тело пациента для доставки лекарств. Подобные нанороботы позволят здесь преодолеть значительные трудности, с которыми сталкивается внедрение аптамеров и эскорт-аптамеров [39]. Действительно, аптамеры вводятся в кровоток, а не движутся самостоятельно и целенаправленно к конкретному месту, как это можно будет реализовать, используя нанороботы типа *ABF*. Тем не менее важно подчеркнуть, что остаются непреодоленными

трудности моделирования таких аспектов поведения одноклеточного животного, как выработка им при определённых условиях новых алгоритмов поведения, то есть той ключевой трудности, которая не преодолена до приемлемого уровня в системах управления интеллектуальными агентами в ИИ.

Напомним кратко, одновременно формулируя цели проводимых исследований, хорошо изученные микробиологами способы движения бактерии, которая способна уверенно находить источник химического раздражения (например, серин, которым питается и др.). Непосредственное изучение движений бактерии, как известно, началось в 70-е годы прошлого века Г.Бергом [14-15], построившим специальный микроскоп, позволявший явно наблюдать движения бактерии в капле воды. В дальнейшем технологии наблюдений усовершенствовались, в частности, за счёт встраивания в бактерию гена, отвечающего за производство светящегося белка. В результате бактерия превращается в светящуюся точку, за которой легко наблюдать. Бактерия при движении совершает пробеги приблизительно вдоль прямой, периодически останавливается, вращается на случайный угол, после чего осуществляет очередной пробег уже в новом направлении. При увеличении концентрации молекул серина, с которыми сталкивается бактерия, эти молекулы захватываются рецепторами бактерии, протаскиваются сквозь оболочку и вызывают каскад биохимических реакций с образованием ряда белков, которые блокируют (уменьшают вероятность) механизм вращения, в результате бактерия не меняет (реже меняет) направление прямолинейного пробега, приближаясь к источнику серина.

Механизм передвижения бактерии *E. coli* традиционный (см. подробный обзор [16] более чем с двумястами ссылками), встречающийся у многих других одноклеточных, именно: набор флагеллиновых жгутиков, нити которых вращаются за счёт встроенного в оболочку бактерии протонного моторчика. Моторчики жгутиков, совершая сотни оборотов в секунду, согласованно раскручивают жгутики против часовой стрелки и бактерия, отталкиваясь от окружающей ее жидкости, двигается по прямой. Остановка и вращение (скорее, «кувыркание») бактерии начинается, когда моторчики начинают крутить нити жгутиков по часовой стрелке, причем уже не так согласованно, как раньше, в результате жгутики «растопыряются» и бактерия начинает «кувыркаться», что меняет направление её дальнейшего движения, скорее всего, случайным образом.

Подобный алгоритм поведения при движении, по-видимому, генетически определён. Однако, появляется новый алгоритм поведения (так считают, например, в [11]), когда после деления что-то в перетяжке не срабатывает и бактерии не могут разойтись, оставаясь сцепленными. Появившаяся двойная (а также тройная и т.д.) химера-бактерия уже, очевидно, не может осуществлять поиск пищи, как одиночная бактерия, но она (две сцепленные бактерии делают это согласованно) вырабатывает новый алгоритм движения [9] - двигается вдоль оси в обоих направлениях, совершает остановки и т.п. - и не гибнет от голода, все же находит пищу, двигаясь по-новому. А вот случайно зацепившиеся друг за друга два робота, в такой ситуации просто становятся неспособными выполнять свои функции.

Набор рецепторов *E. coli*, несомненно, является одной из основ системы управления поведением бактерии, как образно пишет Циммер [17]: «Возможно рецепторы *E. coli* работают согласованно... не исключено, что бактерия умеет анализировать одновременно различные потоки информации: ага, концентрация кислорода быстро растёт, никеля - снижается, чуть потянуло глюкозой... набор рецепторов у *E. coli* не просто своеобразный бактериальный язык, может быть, лучше было бы назвать его мозгом».

В [11] генерирование некоторого класса алгоритмов поведения бактерии моделируется системой ангармонических осцилляторов, в [5,7-8] изучается универсальный агент, в принципе способный выработать любой из возможных

алгоритмов поведения, решатель подобного агента назван блоком Поста, в честь математика Э. Поста, впервые построившего [18] универсальную дедуктивную систему, порождающую все прочие дедуктивные системы (в классе нормальных канонических исчислений Поста, для других классов и произвольных систем универсальные исчисления построены в [19],[20]). Какой класс алгоритмов поведения может генерироваться «мозгом» *E. coli*, другими словами, какой вариант блока Поста реализовала природа в биохимических и других, возможно (сверх) квантовых по Р. Пенроузу [26], механизмах порождения алгоритмов поведения?

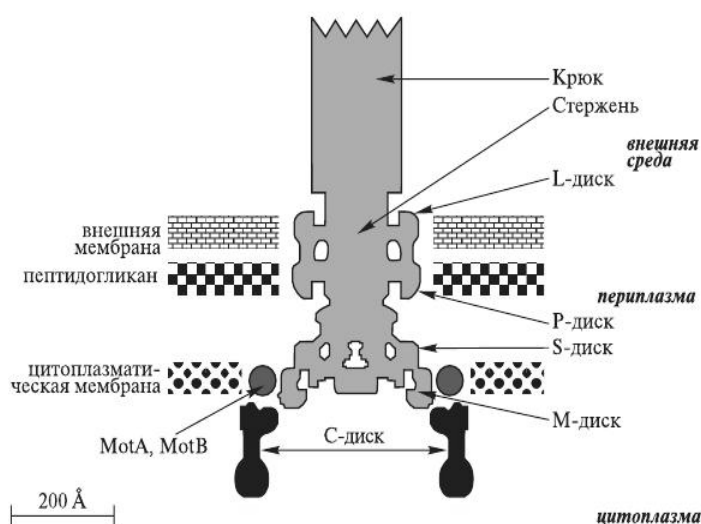
Проводимые авторами исследования посвящены этому, таким образом, чётко формулируемому вопросу, а настоящую работу можно рассматривать как постановочную для данного направления исследований, содержащую некоторые ключевые методы и результаты.

Ответ может быть полностью отрицательным, в смысле отсутствия системы порождения алгоритмов поискового поведения у *E. coli* и наличия лишь явных генетически обусловленных алгоритмов (или их некоторого ограниченного набора) указанного поведения. Не исключено, тем не менее, что в «мозге» *E. coli* имеется некоторый вариант блока Поста. В таком случае интересной и перспективной будет практическая задача создания аналога подобного блока для машин и механизмов, в том числе для нанороботов, имитирующих саму бактерию и ее жгутики, например, как это реализовано в *ABF* [12-13].

Остановимся подробнее на поразительном инженерном решении природы, создавшей бактериальный жгутик - молекулярный нано электромоторчик, крутящий двигающую бактерию спиральную флагеллиновую нить [14-16]. Отметим сразу, что бактериальный жгутик - не только часть двигательного аппарата бактерии, он является также отдельным важным звеном в передаче информации из внешней среды в клетку, обеспечивающим различные, так называемые, таксисы (ответные реакции бактерии на разного рода раздражители: тепло, свет, химические вещества и проч.). Другими словами, жгутики являются составными коммуникационными (а, возможно, ответственными также за другие функции) частями «мозга» бактерии.

Жгутик состоит из **базального тела** (собственно наномоторчика), флагеллиновой **нити** и белкового **крюка**, связывающего базальное тело с нитью.

Ряд деталей виднее на следующем рисунке:



*M* и *S* диски (второй считается продолжением первого) состоят из белка *FliF* вместе с куском стержня, на котором они прикреплены. Обычно один белок отвечает одной структуре, в данном случае – три разные по функциям структуры – два диска и кусок стержня – сформированы из одного белка. Диск *L* состоит из белка *FlgH*, а диск *P* – из белка *FlgI*. Для указанных на рисунке белков идентифицированы гены на ДНК *E. coli*, кодирующие эти белки:

Наименование гена	Продукт гена и его функция
<i>flgB</i>	<i>FlgB</i> структурный белок стержня
<i>flgC</i>	<i>FlgC</i> структурный белок стержня
<i>flgE</i>	<i>FlgE</i> структурный белок крюка
<i>flgF</i>	<i>FlgF</i> структурный белок стержня
<i>flgG</i>	<i>FlgG</i> дистальный белок стержня
<i>flgH</i>	<i>FlgH</i> структурный белок <i>L</i> диска
<i>flgI</i>	<i>FlgI</i> структурный белок <i>P</i> диска
<i>flgK</i>	<i>HAP1</i> структурный белок
<i>flgL</i>	<i>HAP3</i> структурный белок
<i>fliD</i>	<i>HAP2</i> структурный белок, ограничивающий рост нити
<i>fliC</i>	белок флагеллин
<i>flgK</i>	<i>HAP1</i> структурный белок
<i>flgL</i>	<i>HAP3</i> структурный белок
<i>motA</i>	белок <i>MotA</i> , необходимый для вращения
<i>motB</i>	белок <i>MotB</i> , необходимый для вращения
<i>fliF</i>	<i>FliF</i> белок для <i>M</i> и <i>S</i> дисков
<i>fliG</i>	<i>FliG</i> белок <i>switch</i> -компонента мотора
<i>fliM</i>	<i>FliM</i> белок <i>switch</i> -компонента мотора
<i>fliN</i>	<i>FliN</i> белок <i>switch</i> -компонента мотора

Нить жгутика является закрученной винтом полой (как и в тубулиновых микротрубочках) цилиндрической, состоящей из белка флагеллина структурой, по каналу полости (при сборке и т.п.) транспортируются молекулы мономерного флагеллина. Диаметр спирали составляет 0,4 мкм, длина 100 мкм, шаг спирали 2,5 мкм, по массе нить составляет 95% массы всего жгутика.

Белки *HAP2* и *HAP3* сопровождают выделение крюков в отдельную фракцию при формировании жгутика, роль белка *HAP1*, по-видимому, пока не известна. Белки *MotA* и *MotB* играют роль трансмембранных ионных каналов (формируют протонный канал), на один оборот жгутик расходует около тысячи протонов (ионов водорода). В комплексе с этими белками работают белки *FliG*, *FliM*, *FliN*, обеспечивая, в частности, переключение направления вращения в моторе.

Существует несколько моделей того, как работает жгутик. Однако, пока ни одна из них не объясняет полностью его поведение. Построение моделей, выяснение структуры жгутика обычно проводится без привлечения квантовой механики, хотя здесь исследователи находятся в области, где за основные явления ответственны уже отдельные элементарные частицы (протоны). Все большую остроту приобретает вопрос о том, до каких пор и насколько можно игнорировать квантовые свойства микрочастиц? До некоторой степени квантовые эффекты учитываются, например, в стандартных потенциалах для внутрибелковых силовых полей. Так, предположение об электростатической природе водородной связи (электростатическое взаимодействие диполей) пришлось забраковать после квантовомеханических расчетов [39], обычно даётся ссылка на учет принципа Паули при вводе потенциала для стерического отталкивания [41]. Тем не менее рассуждения и расчеты с постулированными потенциалами проводятся в рамках классической механики. Серьёзный ответ на поставленный выше вопрос даётся в подходе В.Д. Лахно [42]. В начале века создание математической модели клетки, включающей уровни как классического, так и квантового описания, считается вполне созревшей задачей [42]. Хотя клетка является, ввиду наличия в ней миллионов атомов, макроскопическим объектом, описание переноса зарядов в ней как основы внутриклеточных процессов (фотосинтез, внутрибелковый и межбелковый перенос зарядов и др.),

уже является квантовомеханическим и даже, как в случае фотосинтеза, квантовополевым. Ввиду чрезвычайной сложности решения уравнения Шредингера для гамильтонианов, описывающих многомиллионную систему из атомов, составляющих клетку, возможности явных расчетов возникают лишь при квантово-классических приближениях. В ряде случаев удаётся разделить квантовую и классическую подсистемы в подобных приближениях и получить решения, что отвечает той или иной приближенной модели клетки или отдельных подсистем в ней. Единая математическая модель клетки, задача разработки которой поставлена в [42], «будет служить интегрирующим и объединяющим началом всего потока информации о клеточной биологии, разбитого в настоящее время (2003 год) на независимые слабосвязанные массивы данных» [42]. Квантовомеханические исследования клеток и их составляющих становятся все более обширными и интенсивными (см. [43] и др.).

Далее приводится необходимый материал из теории математических конструкций и этот аппарат применяется для модели поведения бактерии способной породить новые, не заложенные изначально в бактерию (наноробота, интеллектуального агента, моделирующего бактерию) алгоритмы поведения. Таким образом, рассмотрены методы и некоторые результаты предлагаемого направления исследований.

2. Понятие математической конструкции с точки зрения математики выработано в [7] в целях завершения попыток, начатых в работах известного логика и философа В.А. Смирнова [21], формулировки определения логического и дедуктивного вывода в логике и теории доказательств, учитывающего структуру совокупностей посылок и следствий в секвенциях и правилах вывода. С точки зрения биологии понятие математической конструкции позволило формализовать структуру неокортекса головного мозга и лежит в основе предлагаемой в [7] гиперграфовой модели его функционирования, интегрирующей, в частности, ряд известных моделей. С физической точки зрения понятие математической конструкции позволяет дать обширный список формализмов для новых физических теорий, поиск которых инициирован Ю.М. Широковым [22-25] для нужд квантовой теории поля и Р. Пенроузом [26] – для преодоления трудностей при построении теории квантовой гравитации применимой, в частности, к разгадке феноменов мышления. Теория математических конструкций используется в решателях агентов как основа для обобщенных дедуктивных процедур в блоке Поста, генерирующем, в частности, новые алгоритмы поведения агентов.

Математической конструкцией называется гиперграф над подходящей башней алфавитов, на основе понятия математической конструкции вводятся формальные системы и понятие дедуктивного вывода в них. Достаточно подробно материал изложен в настоящем издании [26], поэтому далее мы, используя определения и обозначения из [26], приступим к обобщению модели представления знаний в искусственном интеллекте, которая используется в системе управления нанороботом, моделирующем поисковое поведение бактерии *E. coli*.

3. Перейдем к обобщению традиционной в ИИ модели представления знаний в исчислении предикатов на случай гиперграфовых формальных систем. Отметим, что в отличие от представления знаний в исчислении предикатов, продукционная модель и другие модели знаний в ИИ носят эвристический характер и не имеют строгого математического обоснования. На практике это выливается в невозможность проверки корректности работы системы (см., например, [28] стр.163). В нашем подходе мы опираемся на строгие, математически обоснованные шаги. Для практически важных случаев используются введенные и развитые Джоном Макарти в 1959-1969 гг. [29-31] так называемые ситуационные исчисления, также основанные на первопорядковом ИП классической логики. Ситуационные исчисления допускают обобщение при замене ИП на соответствующее исчисление математических конструкций.

Напомним, как понимается и реализуется интеллектуальный агент в традиционном подходе ИИ. Имеется *среда* и *агент* в этой среде (как вариант, самого агента можно считать частью среды, которая в таком случае становится *предметной областью*). Агент имеет *датчики*, с помощью которых он «воспринимает» среду (получает *восприятие*), и *исполнительные органы*, с помощью которых агент воздействует на среду. Воздействие называют *реакцией* агента. Функционирование агента состоит в переработке восприятий в воздействия. «Эта переработка осуществляется агентом с помощью специального *решателя*, функционирующего на основе заложенных в него *знаний*» [32]. Искусственный интеллект имеет своей целью создание подобных агентов, «состоящих из знаний и решателя, работающего с этими знаниями» ([32], стр.18). Смысл терминов *цель*, *знания*, *обучение*, *решатель* и др. выявляется при реализации агента.

Помимо считающимися уже заданными в памяти агента аксиом самого ИП и его правил вывода вводятся аксиомы, описывающие предметную область, именно – аксиомы для состояний предметной области и допустимых переходов из одного состояния в другое. Таким образом, получают теорию первого прорядка, далее, с помощью правил вывода, решатель строит выводы из начального состояния в целевое, которые и будут возможными решениями задачи: найти путь из начального состояния в целевое. Отметим, что при таком подходе обращение к семантике минимально: указав на аксиомы, истинность которых в предметной области устанавливается непосредственно каким-нибудь образом, ищут решение задачи, используя лишь средства самой дедуктивной системы (исчисления). Однако на этом обстоятельстве внимание обычно не акцентируется. Поиск ведётся, как правило, на основе метода резолюций, имеющего известные ограничения.

В практически важных случаях в память агента не удаётся по той или иной причине вложить достаточную информацию о предметной области. Но его оснащают манипуляторами и сенсорами-датчиками, с помощью которых агент имеет возможность пополнять базу знаний, обращаясь непосредственно к свойствам среды. Помимо прямого получения информации от среды агент с помощью решателя имеет возможность получать выводы, описывающие ту или иную информацию о среде, которая необходима ему для составления плана действий.

Кроме классической логики иногда используются некоторые другие логики, такие, например, как временная логика. Однако о переборе логик самим агентом речи в традиционном подходе не идет.

Теперь перейдём к описанию методики конструирования так называемого универсального агента, основанного на исчислении математических конструкций (далее называемого просто универсальным агентом), введенного в [7,8] под названием универсального зомби-агента. Ввиду громоздкости построений в рамках формализма математических конструкций будем иллюстрировать изложение на примере исчислений Поста.

При постановке задачи для универсального агента необходимо, как и в случае традиционных агентов, задать язык описания состояний предметной области, на котором формализовано описание исходного (начального) и целевого состояния среды. Введём алфавит для языка описания среды, а также грамматику или иную дедуктивную систему для порождения формул над алфавитом, совокупность которых возьмём в качестве для башни алфавитов возникающей математической конструкции, которая будет моделировать среду с агентом. Обозначим через аксиомы теории  $T$ , включающие описание состояний (начального, целевого и некоторых других). Агент должен согласно устанавливаемой цели достигнуть целевого состояния первоначально находясь в исходном состоянии. Первым ключевым отличием универсального агента от любого

традиционного агента является то, что не задаётся явно какого-либо исчисления, в то время как для традиционного агента заведомо используется некоторое фиксированное логико-математическое исчисление (первопорядковое ИП, ситуационное исчисление и т.п.). Итак, задается язык и набор описанных на нём состояний с переходами между состояниями, как аксиом пока не определённой дедуктивной системы, в общем случае – исчисления математических конструкций.

В то время как традиционный агент запускает решатель, основанный на классической логике для поиска вывода, универсальный агент запускает свой решатель, первой задачей которого будет подбор подходящего исчисления математических конструкций, учитывающего имеющиеся аксиомы состояний и переходов.

Сразу отметим, что мы из детальнейшим образом разработанной за более чем столетнюю историю области классической логики попадаем в так называемую теорию дедуктивных исчислений общего вида, систематическое изучение которой началось лишь в 70-е годы с работ [33-35]. В эту теорию уже в первых работах были перенесены многие понятия, методы и теоремы традиционной теории доказательств, такие как «поиск вывода снизу-вверх», «правила типа сечения», «обратный метод», «устранение сечений», «допустимые правила», «метод метапеременных» и так далее. Так что к настоящему времени, несмотря на не особо интенсивное развитие теории общих дедуктивных исчислений, сама эта теория довольно глубоко развита и имеет мощные средства для поиска выводов. Отметим, что многие из указанных методов и понятий обобщаются также и на исчисления математических конструкций. Одним из важнейших результатов теории дедуктивных систем является теорема Поста об универсальном исчислении и ее обобщения. Именно эти результаты лежат в основе первого этапа работы решателя универсального агента. Более того, сам решатель этого агента назван нами «блоком Поста» в честь указанной теоремы Эмиля Поста.

Универсальное исчисление порождает, согласно указанной теореме, всякое наперёд заданное исчисление. Более того, имеется дедуктивная система, осуществляющая это порождение. Точнее, каждое исчисление кодируется некоторым словом, так сказать, наименованием исчисления, а указанная дедуктивная система порождает наименования исчислений, её и возьмем в качестве первой части решателя универсального агента.

Итак, на первом этапе решатель универсального агента, используя арсенал методов теории дедуктивных систем общего вида, генерирует исчисления с учетом имеющихся аксиом, именно систему гиперстрелок вида, определяющих правила вывода. На этом этапе решатель также может учесть иные, помимо аксиом, ограничения на искомое исчисление, возникающие из анализа предметной области. Совершенно не исключена возможность наличия исчисления (которое найдет и которым воспользуется агент), отличного от ИП, которое более экономно позволит агенту добраться до цели, при этом каждое из состояний-аксиом и выведенных состояний будет соответствовать возможным состояниям предметной области или среды агента. Здесь заложены возможности, которые заведомо не используются традиционными агентами.

Следующий этап работы универсального агента - поиск вывода целевого состояния в очередном исчислении, найденном на первом этапе. Поиск вывода осуществляется также на основе методов, развитых в теории исчислений общего вида и её обобщений на исчисления математических конструкций. Таким образом, вторая часть решателя универсального агента представляет собой набор методов поиска выводов в фиксированной на первом этапе формальной системе математических конструкций, в которую входят аксиомы и гиперстрелки. Этот решатель проводит поиск вывода целевого состояния в

рамках данной формальной системы. При неудаче решатель повторяет поиск исчисления и поиск вывода в нём.

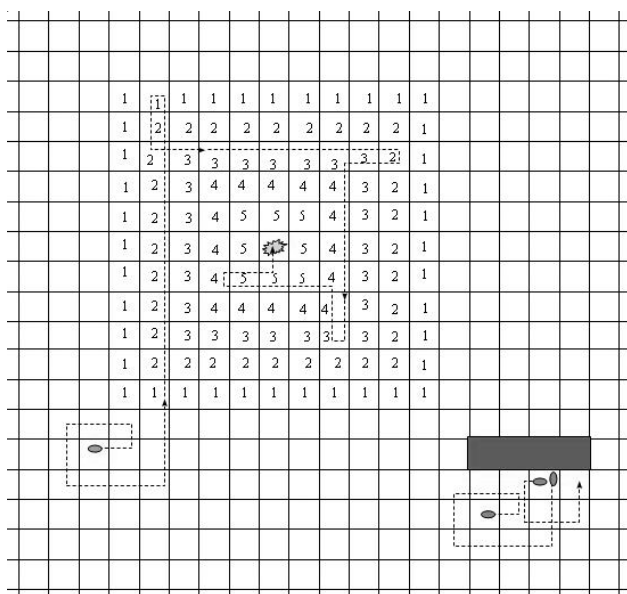
Таковы принципы конструирования универсального агента в применяемом в [7,8] подходе. Традиционные агенты и их решатели, как видим, являются весьма частными случаями универсального агента. Перейдем к примеру реализации методики.

3. Стандартной в искусственном интеллекте модельной задачей является мир вампуса [32], [36], обкатка методов на этом примере подводит новые методы к практически важным приложениям, в [37, 38] простейший из миров вампуса рассмотрен в рамках исчисления математических конструкций. Используя полученный опыт, мы проведём моделирование движений бактерии *E. coli* с помощью универсального агента. Сейчас задача состоит лишь в том, чтобы показать, что предлагаемые методы моделирования в рамках исчисления математических конструкций приводят к моделям, способным выработать новый алгоритм поведения, который не заложен в память агента в начальный момент его движения к цели. Оттолкнувшись от построенной в данном пункте модели, можно достаточно очевидными обобщениями построить более реалистичные модели, ввиду их громоздкости здесь приведен простой вариант, тем не менее, сохраняющий ключевые моменты задачи.

Моделируем бактерию агентом, в память агента закладываем только один алгоритм поиска пищи. Мир, в котором живет агент, считаем для простоты плоским, расчерченным на квадратные клетки. При движении агент за один шаг может перескочить в соседнюю клетку, имеющую с исходной общую сторону. При этом важна ориентация агента (сторона, в которую «смотрит» агент): север, юг, восток и запад. Агент помимо перескока может повернуться в любую сторону за один шаг. Агент имеет рецептор, определяющий концентрацию запаха пищи в той клетке, в которой он находится. Пища источает запах с интенсивностью, убывающей на расстоянии. Смоделируем это так, как показано на рисунке, концентрация убывает от величины 5 до нуля (соответствует числу точек в клетке):

К рецепторам агента отнесём еще рецептор, чувствующий давление со стороны препятствия, не позволяющего агенту перейти в соседнюю клетку.

Детальное применение метода исчисления математических конструкций применено к стандартной задаче ИИ миру вампуса в [37]. Здесь мы действуем аналогично, опуская часть подробностей, за которыми можно обратиться к [37].



На рисунке показана бактерия (агент), пища, запах указан значением интенсивности, пунктирной направленной ломаной изображены пути агента. Тёмным (коричневым) прямоугольником обозначено препятствие, не позволяющее агенту проникнуть в занимаемые препятствием клетки.

Обозначим через  $p$  переменную на множестве значений рецептора давления. Сомножители соответствуют отсутствию 0 или наличию 1 давления



с севера, запада, юга и востока клетки. Переменная  $z$  на множестве значений интенсивности запаха пищи принимает значения.

Число шагов, совершённых бактерией с начала применения имеющегося у бактерии алгоритма (дадим ему номер 1) поиска пищи, обозначим через  $n$ . Зная число шагов, как нетрудно показать, можно определить клетку, в которой находится бактерия в данный момент времени. Поскольку у бактерии есть память, но небольшая, то вместо записи в память координат будем использовать для определения местоположения бактерии это число  $n$ . Наличие в клетке агента описываем параметром соответственно отсутствию 0 или присутствию агента, ориентированного на север 1, запад 2, юг 3 и восток 4.

Будем считать, что в агента заложен алгоритм поиска пищи, действующий следующим образом. Если запаха пищи нет в клетке, где находится агент, то в сторону своей ориентации он переходит в соседнюю клетку, потом поворачивает налево по движению, переходит в соседнюю клетку и так далее, как это указано на рисунке. Двигаясь по спирали агент не пропускает ни одной клетки, что гарантирует ему найти пищу (мы считаем, что пища находится в одной из клеток). Как только агент рецептором запаха обнаруживает запах, он начинает двигаться от одной соседней клетке к другой по прямой до того момента, когда концентрация запаха начнет уменьшаться, после этого он возвращается на две клетки назад и поворачивается налево по направлению движения. Далее он продолжает движение «по прямой» до следующего уменьшения концентрации запаха. Нетрудно показать, что подобный алгоритм обязательно приведёт агента к пище. Для простоты считаем, что пища имеется только в одной клетке.

Весьма вероятно, что похожий алгоритм поиска пищи генетически заложен в *E. coli*, отметим, что данное утверждение требует экспериментального исследования, которое покажет насколько верно и как биохимически (или иным способом) реализуется обсуждаемый алгоритм. Обычно утверждают, что переход от пробегов к «кувырканию» бактерия осуществляет в случайные моменты времени. Какова природа этой случайности? Не заложен же в аппарат управления бактерией генератор случайных чисел или иной механизм получения случайных значений времени для начала «кувыркания». Можно сослаться на броуновское движение окружающих бактерию частиц, но не исключено проявление квантовой природы микрочастиц и той случайности, за которую отвечает квантовая механика.

Для моделирования дальнейшего поведения агента мы используем исчисление математических конструкций вместо классической логики (ситуационных и др. исчислений), которую положено использовать в ИИ согласно методу Маркарти. То есть в агента, кроме указанного алгоритма №1, мы не закладываем никаких аксиом и правил вывода исчисления предикатов классической логики. Вместо них агент получает генератор логик и правил вывода в виде блока Поста. Для определения того блока Поста, который подходит для нашего агента подберём класс правил и стратегию их перебора. Сначала опишем то препятствие, которое не позволит агенту применять заранее заложенный в него алгоритм (то есть алгоритм №1). На рисунке указано препятствие, которое агент обнаруживает в виде давления своим рецептором давления. Как только ориентация агента соответствует стороне, с которой это давление оказывается на агента, алгоритм №1 перестает работать: агент не может шагнуть в следующую предписываемую алгоритмом клетку. Мы вводим момент начала работы блока Поста как раз в тот момент, когда выполнение алгоритмов (пока у нас один алгоритм) или правил среда делает невозможным.

Чтобы явно указать генерируемые правила, нужно использовать формализм описания среды, что мы и сделаем. Помимо выбора класса правил необходимо задать стратегию их перебора для конкретных шагов агента. Эту стратегию зададим нумеруя имеющиеся правила и применяя их в агенте согласно полу-

чаемой упорядоченности, если данное правила неприменимо, пробуем применить следующее.

Состояние ячейки описываем набором параметров  $(n, a, z, p)$ . В блоке Поста для мира вампуса [37] настройка шла для пяти клеток (клетка нахождения агента и четыре соседних), в нашем случае первый уровень настройки проще — возьмём набор правил для одной клетки. его нам будет достаточно для обхода агентом препятствия. Именно  $(n, a, z, p) \rightarrow (n + 1, a', z', p')$

При необходимости можно перейти к следующему уровню рассмотрения пяти клеток. Напомним, что наша цель продемонстрировать работу метода и дать первые шаги моделирования поведения бактерии с помощью исчисления математических конструкций. Рассмотрение более сложных случаев, в частности, случая трехмерного, а не плоского движения бактерии проводится вместе с компьютерной реализацией модели в другом месте.

Итак, на 16 шаге, согласно рисунку, агент не имеет возможности двигаться по алгоритму №1, состояние, которое имеет на этом шаге клетка с агентом следующее  $(n, a, z, p) = (16, 1, 0, (1, 0, 0, 0))$ .

Включается блок Поста агента, каждое сгенерированное правило приводит к попытке его применения. Правила  $sa = 0, a \neq a', z \neq z', p \neq p'$  не будут запомнены агентом ввиду их неприменимости, остальные нами пронумерованы, чем был задан порядок порядок их генерирования:

$(n, 1, z, 1) \rightarrow (n + 1, 2, z, 1); (n, 1, z, 1) \rightarrow (n + 1, 3, z, 1); (n, 1, z,$

Сгенерировав первое из списка правило, агент пытается применить его, убеждается, что это возможно, то есть агент поворачивается налево. Это правило записывается под №2 ему в память. Поскольку это правило сработало, далее применяется согласно выбранной стратегии перебора правил алгоритм №1 и агент продолжает двигаться. Для краткости мы не будем подробнее рассматривать задачу, укажем лишь, что то препятствие, которое дано на рисунке, агент обойдет после столкновения (столкнувшись с ним еще раз, но без генерирования новых правил) на 17 шаге. Интересно было бы подыскать такие препятствия, которые, с одной стороны, позволяют добраться до пищи, а с другой — агент не может найти путь к ней, используя имеющийся у него тип блока Поста.

Как обычно, что хорошо известно в ИИ, с усложнением условий и увеличением возможностей агента быстро растёт вычислительная сложность, переборные алгоритмы, выбранные в стратегиях и способах поиска вывода, приходится заменять на различные другие более изощрённые, в том числе выработанные для нашего случая в теории общих дедуктивных систем и их обобщений в исчислении математических конструкций.

В заключение еще раз сформулируем основные вопросы, изучаемые в проводимом исследовании, поскольку после приведённого примера моделирования и другого материала работы это можно сделать более чётко. Прежде всего, это вопрос о природе тех алгоритмов движения бактерии, которые она использует, о том заложены ли они и как в систему управления поведением бактерии. Далее идёт вопрос о том, способна ли бактерия *E. coli* сама вырабатывать новые алгоритмы движения, если да, то каков тот аналог блока Поста, который она использует. В царстве эукариот, как известно, у одноклеточных парамеций память достаточно, чтобы обучаться и помнить заученные навыки довольно продолжительное время. *E. coli* обладает, как показывают эксперименты, небольшой памятью, при наличии блока Поста, на самом деле, требования к памяти весьма невелики, так как выработка правил по-новому может не занимать много времени и ресурсов.

## Литература

1. Черноиванов В.И. Ресурсосбережение и машины с элементами человеческого интеллекта - ответ на кризисные вызовы современности и будущего // Прикл. матем., квант.теория и программ. 2013. Т.10. №3. С.9-19.
2. Черноиванов В.И., Ежовский А.А., Федоренко В.Ф. Интеллектуальная сельскохозяйственная техника. - М. 2014. 124 с.
3. Черноиванов В.И. Создание интеллектуальных сельхозмашин и механизмов нового поколения на основе переноса знаний и профессиональных навыков // Прикл.матем., квант.теория и программ. 2014. Т.11. №1. С.3-19.
4. Черноиванов В.И. Научные подходы к обоснованию необходимости интеллектуализации машин (размышления о направлениях повышения роли и эффективности науки)// Вестник ВНИИМЖ. 2014. №3. С.17-22.
5. Рогов И.А., Черноиванов В.И., Иванов Ю.А., Толоконников Г.К., Петров Е.Б., Волкова И.М. Интеллектуальная сельскохозяйственная техника нового поколения // Вестник ВНИИМЖ. Приложение к №3(15). 2014. С.3-65.
6. От моделей поведения к искусственному интеллекту. Сборник статей под ред. В.Г.Редько. М.: ЛЕНАНД. 2014. 460 с.
7. Толоконников Г.К. Вычислимые и невычислимые физические теории по Р.Пенроузу. Часть 2 // Прикл.матем., квант.теория и программ. 2011. Т.8. №4. С.3-244. Часть 3// Прикл.матем., квант.теория и программ. 2012. Т.9. №4. С.3-294.
8. Толоконников Г.К. Универсальный зомби и виртуальная реальность // Современные системы искусственного интеллекта и их приложения в науке. Материалы II Всероссийской научной интернет-конференции. Казань. 14 мая 2014. С.88-102.
9. Maki N., Gestwicki J.E., Lake E.M., Kiessling L.L., Adler J. Motivity and chemotaxis of filamentous cells of Escherichia coli// Journal of Bacteriology. 2000, V.182. N15. P.4337-4342.
10. Primio F., Muller B.S., Lengeler J.W. Minimal cognition unicellular organisms // Proceedings Supplement of the 6-th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Eds. Meyer J. etc. International Society for Adaptive Behavior. 2000. P.3-12.
11. Непомнящих В.А., «Модели автономного поискового поведения», в сб. «От моделей поведения к искусственному интеллекту», сб.статей под ред. В.Г.Редько, М., ЛЕНАНД, 2014г., стр.200-242.
12. Zhag L., Abbot J.J., Dong L.X., Kratochvil B.E., Bell D., Nelson B.J. Artificial bacterial Flagella: Fabrication and Magnetic Control// Appl. Phys. Lett. 2009. V.94. P.064107.
13. Qiu F., Mhanna R., Zhang L., Ding Yu., Fujita S., Nelson B.J. Artificial bacterial flagella functionalized with temperature-sensitive liposomes for controlled release// Sensors and Actuators B. Chemical. V.196. June 2014. P.676-681.
14. Berg H.C., Anderson R.A. Bacteria Swim by Rotating their Flagellar Filaments// Nature. 1973. V.245. P.380-382.
15. Berg H.C. E.coli in motion. - New York. Springer-Verlag. 2004.
16. Метлина А.Л. Жгутики прокариот как система биологической подвижности / Успехи биологической химии. Т.41. 2001. С. 229-282.
17. Циммер К. Микрокосм: *E.coli* и новая наука о жизни -М.: 2013. 394 с.
18. Post E.L. Formal reduction of the general combinatorial decision problem// Amer. J.Math. 1943. V.65. N2. P.197-215.
19. Маслов С.Ю. Некоторые свойства аппарата канонических исчислений// Труды МИАН им.В.А.Стеклова. Т.72. 1964. С.5-56.
20. Матиясевич Ю.В. Простые примеры неразрешимых канонических исчислений. // Тр. МИАН СССР. Т.93. 1967. С.50-88.
21. Смирнов В.А. Теория логического вывода. - М.: 1999. 318 с.
22. Широков Ю.М. Аксиоматика гамильтоновых теорий общего вида, включающих классическую и квантовую как частные случаи // ТМФ. 1975. Т.25. №3. С.307-312.
23. Толоконников Г.К. Об алгебрах наблюдаемых физических теорий, близких к каноническим// ТМФ. 1984. Т.60. №1. С.87-92.
24. Толоконников Г.К. Классификация алгебр функций, близких к лиевым, и других трансляционно инвариантных функциональных алгебр // Математические заметки. 1986. Т.40. №5. С.645-657.
25. Толоконников Г.К. Метод функциональных уравнений в теории алгебр // Алгебра и логика. 1988. Т.27. №1. С.57-78.

26. Пенроуз Р. Тени разума. Москва-Ижевск: ИКИ. 2005.
27. Кон П. Универсальная алгебра. - М.: 1968.
28. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. - М.: Финансы и статистика. 2012. 664 с.
29. McCarthy J. Programs with common sense// In Proceedings of the Symposium on Mechanisation of Thought Processes 1958. V.1, P. 77-84. London. Her Majesty's Stationery Office.
30. McCarthy J. Situations, actions, and causal laws. Memo 2, Stanford University Artificial Intelligence Project. Stanford. California. 1963.
31. McCarthy J. Programs With common sense// In Minsky M.L. (Ed.) Semantic information Processing. P.403-418. 1968. MIT Press. Cambridge. Massachusetts.
32. Девятков В.В. Системы искусственного интеллекта. -М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2001. 352 с.
33. Маслов С.Ю. Теория поиска вывода и вопросы психологии творчества // Семиотика и информатика. Т.13. 1979. С.20-26.
34. Маслов С.Ю. Теория дедуктивных систем и её применения - М., Радио и связь. 1986. 133 с.
35. Маслов С.Ю., Норзела С.А. О правилах типа сечения в исчислениях общего вида // Зап.научн.семинаров Ленинградского отд. МИАН СССР им.В.А.Стеклова. 1974. Т.40. С.63-66.
36. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. 2-е издание. - М.: 2006. 1408 с.
37. Толоконников Г.К. Перспективы реализации интеллектуальности машин на основе биоблоков и систем порождающих алгоритмы// Прикл.матем., квант.теория и программ. 2014. Т.11. №1. С.19-80.
38. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К. Методы интеллектуализации сельхозмашин нового поколения на примере типовой модели автономного агента// настоящее издание.
39. Лахин А.В., Тарантул В.З., Генинг Л.В. Аптамеры: проблемы, пути их решения и перспективы // Acta Naturae. Т.5. №4 (19). 2013. С.25-37.
40. Weinhold F. Nature of H-bonding in clusters, liquids and enzymes: an ab initio, natural bond perspective// Mol.Struct.:THEOCHEM. 1997. V.398-399, P.181-197.
41. Джаксон М. Молекулярная и клеточная биофизика.// М.: БИНОМ. 2013. 551 с.
42. Лахно В.Д. Математическая клетка. Концепция построения математических моделей переноса заряда в живой клетке // Вестник РУДН. Сер. Прикладная и компьютерная математика. 2003. Т.2. №2. С.77-84.
43. Лахно В.Д., Четвериков А.П. Возбуждение бабблов и бризеров в ДНК и их взаимодействие с носителями заряда // Математическая биология и биоинформатика. 2014. Т.9. № 1. С.4-19.

#### References

1. Chernoiivanov V.I. Resource conservation and machines with human intelligence is the answer to the crisis challenges of today and the future // Applied mathematics, quantum theory and programming. 2013. V. 11. №3. P. 9-19.
2. Chernoiivanov V.I., Ezevsky A.A., Fedorenko V.F. Intelligent Agricultural machinery. - М.: 2014. -124 p.
3. Chernoiivanov V.I. Creation of intelligent agricultural machinery and mechanisms of the new generation on the basis of the transfer of knowledge and skills // Applied mathematics, quantum theory and programming. 2014. V.11. №1. P.1-19.
4. Chernoiivanov V.I. Scientific approaches to justifying the need for the intellectualization of machines (thinking about ways to enhance the role and effectiveness of science)// Bulletin VNIIMZH , 2014. №3. P.17-22.
5. Rogov I.A., Chernoiivanov V.I., Ivanov Yu.A., Tolokonnikov G.K. Petrov E.B., Volkova I.M. New generation of Intelligent agricultural machinery. Bulletin VNIIMZH. Annex to the №3(15). 2014. P.3-65.
6. From behavior to artificial intelligence. Ed.. Redko V.G. M. 2014. 460 p.
7. Tolokonnikov G.K. Computable and non-computable physical theories according to R.Penrose. Part 2 // Applied mathematics, quantum theory and programming. 2011. V.8. №4. P.3-244. Part 3// Applied mathematics, quantum theory and programming. 2012. V.9. №4. P.3-294.

8. Tolokonnikov G.K. Universal zombie and virtual reality // Proceedings of the II All-Russian Conference "Modern artificial intelligence systems and their applications in science". Kazan. 14 May 2014. P.88-102.
9. Maki N., Gestwicki J.E., Lake E.M., Kiessling L.L., Adler J. Motivity and chemotaxis of filamentous cells of Escherichia coli.// Journal of Bacteriology. 2000. V.182. N15. P.4337-4342.
10. Primio F., Muller B.S., Lengeler J.W. Minimal cognition unicellular organisms.// Proceedings Supplement of the 6-th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Eds. Meyer J. etc. International Society for Adaptive Behavior. 2000. P.3-12.
11. Nepomnyashchikh V.A. Models of autonomous exploratory behavior// in Proc. From behavior to artificial intelligence. Ed.. Redko V.G. M. 2014. P.200-242.
12. Zhag L., Abbot J.J., Dong L.X., Kratochvil B.E., Bell D., Nelson B.J. Artificial bacterial Flagella: Fabrication and Magnetic Control. Appl. Phys. Lett. V.94, P.064107, 2009.
13. Qiu F., Mhanna R., Zhang L., Ding Yu., Fujita S., Nelson B.J. Artificial bacterial flagella functionalized with temperature-sensitive liposomes for controlled release.// Sensors and Actuators B. Chemical. V.196. June 2014. P.676–681.
14. Berg H.C., Anderson R.A. Bacteria Swim by Rotating their Flagellar Filaments// Nature. 1973. V.245. P.380-382.
15. Berg H.C. E.coli in motion. - New York. Springer-Verlag. 2004.
16. Metlina A.L. Prokaryotic flagella as a system of biological mobility// Advances of Biological Chemistry. V.41. 2001. P.229-282.
17. Zimmer K. Microcosm: E.coli and the new science of life. - M. 2013. 394 p.
18. Post E.L. Formal reduction of the general combinatorial decision problem// Amer. J.Math. 1943. V.65. N2. P.197-215.
19. Maslov S.Yu. Some properties of the apparatus of canonical calculi // Proceedings of the V.A.Steklov Math. Inst. USSR. V.72. 1964. P.5-56.
20. Matiyasevich J. Simple examples of unsolvable canonical calculi// Proceedings of the V.A.Steklov Math. Inst. USSR. V.93. 1967. P.50-88.
21. Smirnov V.A. The theory of inference. -M. 1999. 318 p.
22. Shirokov Yu.M. Axiomatics of general Hamiltonian theories including classical and quantum, as special cases // TMP. 1975. V. 25. №3. P.307-312.
23. Tolokonnikov G.K. Algebras of observables of the physical theories of nearly canonical ones// TMP. 1984. V.60. №1. P.87-92.
24. Tolokonnikov G.K. Classification of functions algebras close to Lie algebras, and other translation-invariant function algebras // Math.Not. 1986. V.40. №5. P.645-657.
25. Tolokonnikov G.K. The method of functional equations in the theory of algebras / Algebra and Logic. 1988. V.27. №1. P.57-78.
26. Penrose R. Shadows of the Mind. - M. -2005.
27. Kohn P. Universal Algebra , - M.: 1968.
28. Bolotova L.S. Artificial intelligence systems: models and knowledge-based technology. M. 2012. 664 p.
29. McCarthy J. «Programs with common sense», In Proceedings of the Symposium on Mechanisation of Thought Processes 1958, Vol. 1, p. 77—84, London. Her Majesty's Stationery Office.
30. McCarthy J. «Situations, actions, and causal laws. Memo 2», Stanford University Artificial Intelligence Project, Stanford, California, 1963.
31. McCarthy J. «Programs With common sense», In Minsky M.L. (Ed.) Semantic information Processing, p. 403-418, 1968, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
32. Deviatkov V.V. Artificial Intelligence Systems . -M.: MSTU. 2001. 352 p.
33. Maslov S.Yu. The theory of inference search questions and the psychology of creativity// Semiotics and Informatics. V.13. 1979. P.20-26.
34. Maslov S.Yu. The theory of deductive systems and its application - M. 1986. 136 p.
35. Maslov S.Yu., Norgela S.A. On the rules of section type in the estimates of the general form // Leningrad dep. V.A.Steklov Math. Inst. USSR. 1974. V.40, P.63-66.
36. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence. A modern approach . 2-nd ed. M.: 2006. 1408 p.
37. Tolokonnikov G.K. Prospects for the implementation of intelligent machines based on bioblokov generating algorithms and systems. // Applied mathematics, quantum theory and programming. 2014. V.11. №1. P.19-80.

38. *Chernoivanov V.I., Tolokonnikov G.K.* Demonstration of modern intellectualisation of agricultural machinery by means of application new modeling method on the example of typical autonomos agents// this edition

39. *Lahnin A.V., Tarantul V.Z., Gening L.V.* Aptamers: problems, solutions and prospects. *Acta Naturae*. V.5. № 4 (19). 2013. P.25-37.

40. *Weinhold F.* «Nature of H-bonding in clusters, liquids and enzymes: an ab initio, natural bond perspective», *Mol.Struct.:THEOCHEM*, 1997, V.398-399, P.181-197.

41. *Jackson M.* *Molecular and Cellular Biophysics*. M. 2013. 551 P.

42. *Lahno V.D.* Mathematical cell. The concept of constructing mathematical models of charge transport in living cells. *Bulletin of People's Friendship University, Ser. Applied and Computational Mathematics*. 2003. V.2. №2. P.77-84.

43. *Lahno V.D., Chetverikov A.P.* Excitation of the bubble and breathers in DNA and their interaction with charge carriers. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2014. V.9. № 1. P.4–19.

## NANOROBOTS FOR MODELING OF ADAPTIVE SEARCH BEHAVIOR OF SINGLE-CELLED ANIMALS

*V.I.CHERNOIVANOV, Doctor of Technical Sciences,  
academician of the Russian Academy of Sciences  
(GOSNITI, ph.8-495-371-84-55, e-mail:vichernoivanov@mail.ru)*

*M.I.GULUKIN, Doctor of Biological Sciences,  
academician of the Russian Academy of Sciences  
(VIEV, ph.8-495-970-03-68, e-mail: admin@viev.ru)*

*G.K.TOLOKONNIKOV, Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
(GOSNITI, ph.8-499-174-81-69, e-mail: gktolo@mail.ru)*

**Annotation.** *This paper deals with the problem of creating artificial autonomous agents, in particular, the creation of control systems of nanorobots. Some hope in her decision linked to the study and further modeling of adaptive search behavior of single-celled animals. In the authors theoretical and experimental studies new mathematical modeling methods based on calculation of mathematical structures and a well-studied intestinal bacterium Escherichia coli are applied. A model of nanorobot generating new algorithms of behavior in an unfamiliar environment is proposed.*

**Keywords:** *nanorobots, proteins, bacterial flagellum, artificial intelligence, autonomous agent, calculus of mathematical structures.*