

УДК 519-24

**Представление знаний в системах искусственного интеллекта на основе принципов онтонейроморфогенеза и мультиагентного моделирования<sup>1</sup>**

И.А. Пшенокова<sup>1</sup>, В.А. Денисенко<sup>1</sup>, О.В. Нагоева<sup>1</sup>, Д.Г. Токмакова<sup>1</sup>,

З.А. Сундуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН», 360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд 37-а

E-mail: [iipru@rambler.ru](mailto:iipru@rambler.ru)

*В статье рассматривается формат представления знаний в интеллектуальных системах принятия решений на основе моделирования процессов самоорганизации т.н. мультиагентных рекурсивных когнитивных архитектур (MyPKA), способных к обучению. Разработаны и реализованы элементы самоорганизующейся MyPKA, позволяющие добиться самостоятельного поведения целенаправленных агентов, обеспечивающего заключение контрактов на обмен энергией и информацией, архитектура целенаправленного агента, программная инфраструктура создания и редактирования агентов.*

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, онтонейроморфогенез, мультиагентное моделирование, системы принятия решений, представление знаний.

**Knowledge representation in artificial intelligence systems based on the principles of ontoneuromorogenesis and multi-agent modelling**

I.A. Pshenokova<sup>1</sup>, V.A. Denisenko<sup>1</sup>, O.V. Nagoeva<sup>1</sup>, D. G. Tokmakova<sup>1</sup>,

Z.A.Sundukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ №№ 13-01-0092, 913-07-01003, 15-07-08309, 15-01-05844.

*The article provides the knowledge representation format in intelligent systems of decision-making based on the modelling of self-organization processes of so-called multi-agent recursive cognitive architectures (MuRCA). Elements of self-organizing MuRCA that manifest independent behavior of a goal-directed agent, that provide a possibility to make contracts for energy and information exchange, software infrastructure of agents creation and editing have been developed.*

**Keywords:** artificial intelligence, ontoneuromorphogenesis, multi-agent modelling, decision-making systems, knowledge representation.

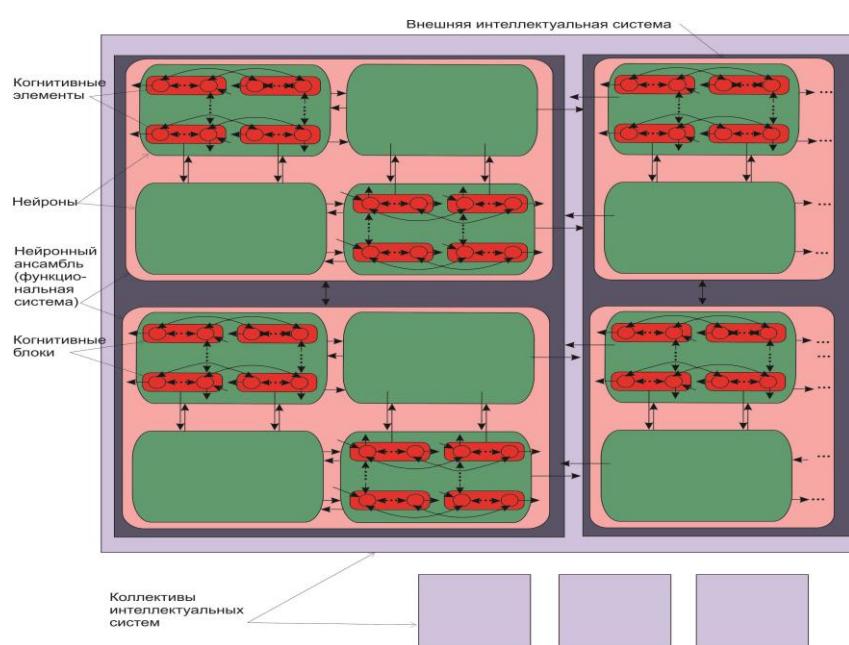
**1. Введение.** Задачи принятия решений пронизывают всю жизнь и деятельность человека, и несмотря на то, что такие задачи возникли давно их активное систематическое исследование началось только в XX веке. По мнению ряда ученых [1-3], только использование всего потенциала знаний, накопленных человеком и создаваемых его интеллектом, позволяет с успехом решать возникающие задачи. В последние десятилетия было ясно осознано, что проблема принятия решений является междисциплинарной. Создание методов принятия решений требует рассмотрения математических, психологических и компьютерных проблем. Вследствие этого, в настоящее время активно развиваются тесно связанные между собой математическая, психологическая, организационная, информационная и другие теории принятия решений [4].

В работах [5-7] представлены различные подходы к созданию интеллектуальных систем принятия решений, интеллектуальных систем управления и гибридных систем, в том числе использующие аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики. Эти системы предназначены для принятия решений при управлении сложными объектами и процессами в условиях жестких временных ограничений и наличия неопределенностей различного рода. Для реализации таких систем чаще всего используются

экспертные знания, которые не всегда удается реализовать. При этом приходится прибегать к некоторым допущениям. В результате появляются риски, связанные с ошибочным формированием цели принятия решения, определением показателей и критериев оценки эффективности работы системы. Для уменьшения рисков в интеллектуальной системе используются методы обучения и самообучения, которые в настоящее время начинают разрабатываться в интеллектуальных системах и которые всегда присутствовали в биологическом интеллекте [8,9].

В связи с этим **актуальным** является вопрос создания такой интеллектуальной системы принятия решений, в которой реализована система, которая обеспечивает собственное представление, понимание и оценку событий. В такой системе под интеллектом понимается свойство живой материи строить зависимости между объектами и явлениями и использовать их для управления потоками энергии и информации с целью эффективной реализации поставленных задач [10].

В [11] введена вычислительная абстракция интеллектуального процесса принятия решений на основе моделирования процессов самоорганизации т.н. мультиагентных рекурсивных когнитивных архитектур (МуРКА) (рисунок 1).



*Рис.1. Мультиагентная рекурсивная когнитивная архитектура.*

**Цель исследования** - сформировать мультиагентную рекурсивную когнитивную архитектуру, способную к обучению.

**Задачи исследования:**

1. разработать процесс динамического создания контрактов между агентами;
2. реализовать элементы инварианта когнитивной архитектуры;
3. реализовать методы декомпозиции и синтеза решения задачи на основе самоорганизующейся МуРКА.

**2. Самоорганизующиеся мультиагентные алгоритмы.** Для формирования мультиагентной рекурсивной когнитивной архитектуры, способной к обучению, необходимо инвариант организационно-функциональной структуры процесса интеллектуального принятия решения представить в виде следующих блоков: блок распознавания входных образов, оценки последствий, формирования цели, синтеза плана действий, проактивного моделирования (модель среды), управления действиями [10].

Когнитивные архитектуры (КА) [12] ориентированы на разработку универсальных решателей. Эти системы должны обладать уровнем интеллектуальности, необходимым для того, чтобы самостоятельно осуществить декомпозицию и формализацию любой (в том числе неструктурированной) заданной задачи и выполнить все требуемые процедуры логического вывода, поиска и синтеза решения.

Взаимоотношения между агентами на разных уровнях когнитивной архитектуры организованы на основе мультиагентного экзистенциального отображения (МАЭО). Понятие МАЭО впервые было введено в [13] и представляет собой формализм, описывающий возникновение и развитие "мягких" функциональных зависимостей между объектами, представленными агентами в составе мультиагентной системы. С помощью таких МАЭО формируются самоорганизующиеся мультиагентные алгоритмы, основанные на контрактных отношениях между агентами.

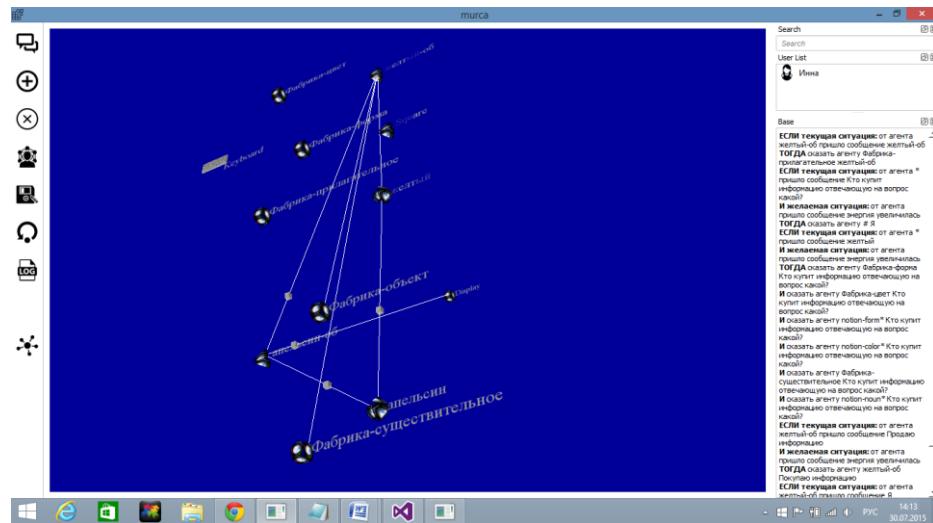
Контракт между агентами реализует единицу мультиагентного знания. Такое знание – это динамическая причинно-следственная зависимость, позволяющая снизить трудоемкость задачи поиска пути субоптимального решения за счет избирательного формирования мультиагентных знаний и алгоритмов.

Суть таких отношений состоит в том, что если в системе есть что-то важное с точки зрения приобретения или потери энергии, агенты проводят "опрос" агентов на разных уровнях КА, заинтересованных в приобретении энергии, для того чтобы заключить МА-контракт, синтезировать знания и выполнить мультиагентный алгоритм, направленный на максимизацию энергии и минимизацию ее потерь. МА-контракт включает в себя предложение обмена знаний на энергию - продажа знаний и обмена энергии на знания - покупка знаний. Контракт считается исполненным, если агенты, с целью извлечения энергии из внешней среды, согласовано выполняют поставленную задачу. При этом несущественные или неэффективные, с точки зрения энергии задачи, не приводят к заключению новых МА-контрактов и, соответственно, формированию новых МА-знаний. Если же необходимо повысить точность решения для максимизации энергии или на вход приходит новая ситуация, в системе создаются новые агенты, которые в процессе самообучения пополняют свои базы знаний новыми МА-знаниями. Эти агенты подключаются к выполнению поставленной задачи, развивая КА и синтезируя новые МА-знания и МА-контракты, направленные на приобретение энергии.

Таким образом, мультиагентная рекурсивная когнитивная архитектура (МуРКА) – это абстрактная модель самоорганизации мозга, представленного в виде вычислительной сети, состоящей из нейронов-агентов, представляющих собой рекурсивные когнитивные архитектуры, в которых связи в составе всех уровней являются слабыми, основанными на так называемых мультиагентных контрактах.

Далее в статье представлены некоторые результаты по реализации и разработке инфраструктуры, методов применения и построения прикладных систем на основе MyPKA.

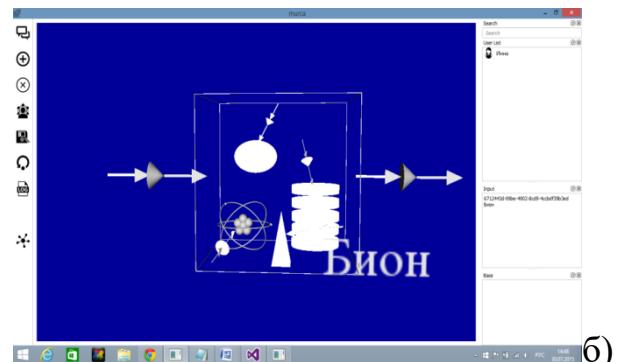
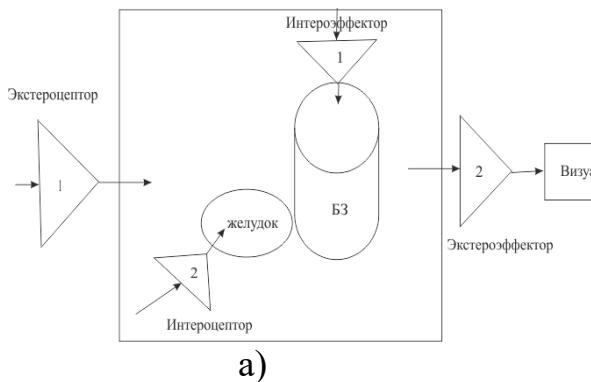
**3. Программная инфраструктура создания и редактирования агентов в MyPKA.** На рисунке 2 представлена разработанная и реализованная нами программная инфраструктура создания и редактирования агентов в MyPKA, и обеспечивающая формирование и отладку мультиагентных алгоритмов на основе заключения «мягких» контрактных связей между целенаправленными агентами.



*Рис. 2. Процесс формирования МАОЭ, в программном комплексе MyPKA.*

Агенты в MyPKA различаются функциональностью и архитектурой. Существуют агенты более низкого уровня: бион, рацион, и агенты высокого уровня: когнитон, интеллектон и суперинтеллектон [10].

Архитектура минимального агента представлена на рисунке 3.



*Рис. 3. а) Архитектура минимального агента (бион).*

*б) Представление минимального агента в программном комплексе MyPKA.*

Агенты низкого уровня, выбирая действие в той или иной ситуации, стремятся максимизировать свою энергию, которую извлекают из среды.

Агент высокого уровня, который создается на уровне заключения контрактов, в обмен на информацию и энергию называется когнитон. Множество когнитонов, которые связываются между собой посредством МАЭО и образуют вычислительную абстракцию инварианта интеллектуальной когнитивной архитектуры, образуют интеллектон. А вся система MyPKA представляет собой суперинтеллектон и включает в себя несколько интеллектонов.

Суперинтеллектон способен самостоятельно за счет самоорганизации входящих в него агентов настраиваться на решение поставленной задачи. Такая самоорганизация происходит по трем направлениям: рост интеллектона в ширину, в длину и "внутрь" самого себя.

1. Рост уровней интеллектона в ширину происходит при отсутствии правил в базе знаний для решения задачи. В этом случае когнитоны начинают предлагать контракты на передачу энергии в обмен на знания.

2. Рост интеллектона в длину происходит при достаточной мощности базы знаний для решения задачи, но время выбора оптимального решения велико. В этом случае для сокращения времени поиска решения заключаются контракты на обмен энергией с когнитонами последующих уровней.

3. Рост интеллектона внутрь самого себя происходит при недостаточном знании для повышения точности решения. В этом случае когнитон выделяет энергию на рост когнитивных архитектур нижнего ранга, в результате чего получает новое знание, которое синтезируется интеллектоном нижнего ранга.

Рассмотрим теперь, как представлены знания в когнитивной архитектуре.

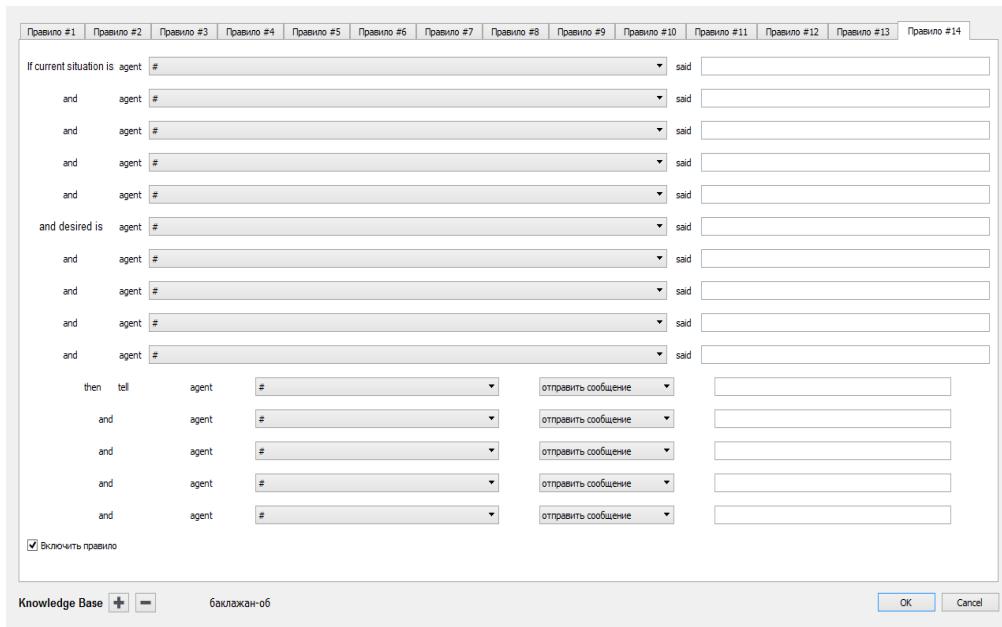
Мультиагентные знания в MyРКА имеют следующий формат: начальная (стартовая) ситуация, конечная (желаемая) ситуация, чаще всего, это прогноз на ожидаемое состояние энергии, и действие, которое переводит агента из начальной ситуации в конечную [14].

Окно редактирования правил (знаний) представлено на рисунке 4.

Набор правил одного агента образуют его базу знаний. Наличие правил в базе знаний позволяет вступать агентам в контрактные отношения для увеличения своей энергии или пополнения своей базы знаний.

База знаний агентов состоит из двух частей: генома (знания, которые записываются в базу сразу при создании агента) и знания, приобретенные агентом в процессе выполнения поставленных задач и контрактов.

В геном записывается набор внутренних немодифицируемых знаний. Эти знания содержат в себе набор правил, согласно которым происходит заключение контрактов между агентами, передача энергии в обмен на знания, проверка состояния своей энергии и действия для ее пополнения при критическом значении.



*Рис. 4. Окно редактирования правил в программном комплексе MyPKA.*

Как было сказано выше, знание состоит из трех частей. В случае, когда в знании отсутствует хотя бы одна часть, имеем неполное знание. Такое знание требует дополнения до полного за счет поиска отсутствующих частей, так как это позволит агенту использовать данное знание для получения дополнительной энергии или же для избегания потерь энергии.

Рассмотрим возможные варианты неполного знания.

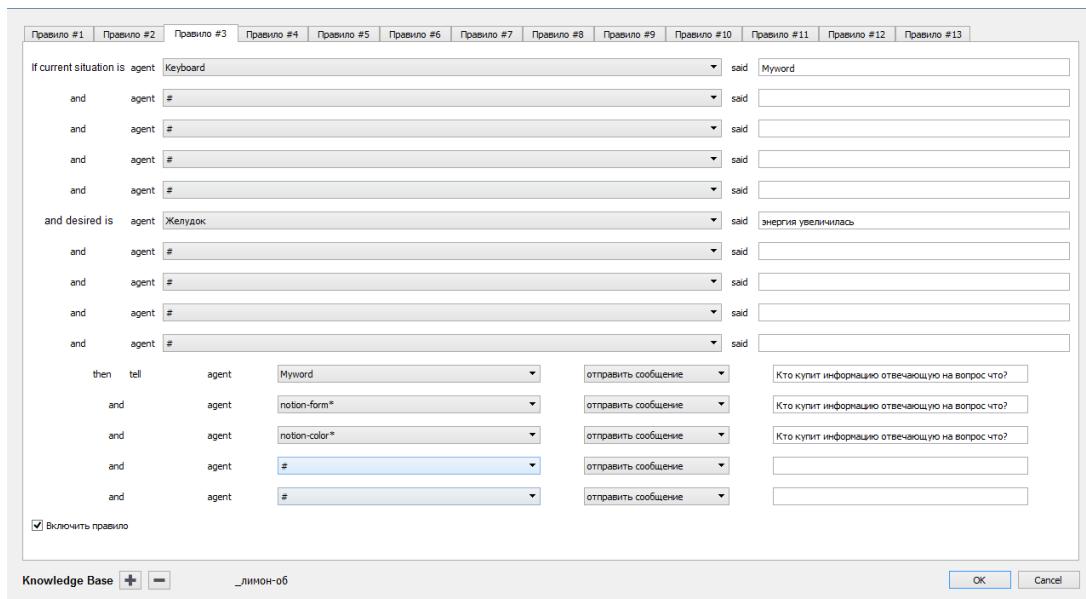
1. Известны начальная и конечная ситуация, но неизвестно действие, которое переводит агента из начальной ситуации в конечную.
2. Известны начальная ситуация и действие, но неизвестна конечная ситуация.
3. Известны конечная ситуация и действие, но неизвестна начальная ситуация.

Тактика поведения при неполном знании записывается в геноме агента. Агент должен отправить запрос мультиагентному сообществу с предложением о покупке информации о недостающих компонентах знания. Это сообщение содержит также и информацию об энергии вознаграждения, которую агент передаст тому из агентов, кто предоставит запрашиваемую информацию. На это сообщение реагируют только те агенты, которые после поиска в своей базе знаний имеют информацию о недостающих компонентах.

В результате между агентами заключается контракт, на основании которого агент передает найденную информацию и получает обещанное вознаграждение.

На рисунке 5 представлен пример правила, в котором агент делает рассылку агентам КА для заключения контрактов, направленных на приобретение энергии в обмен на знания. Формат сообщения следующий:

*Если текущая ситуация: от агента Клавиатура пришло сообщение Мое имя, и желаемая ситуация: от агента Желудок придет сообщение Энергия увеличилась, тогда всем агентам отправить сообщение Кто купит информацию, отвечающую на вопрос что?*



**Рис. 5. Пример правила, в котором агент делает рассылку для заключения контрактов.**

Таким образом, если знание о некоторых дугах в дереве решения отсутствуют в локальной базе знаний интеллектуона, но существует в базах других интеллектуонов, с которыми данный интеллектуон может заключать МА-контракты, то при наличие достаточного количества энергии, интеллектуон способен самостоятельно синтезировать решение сложных неструктурированных задач.

**4. Заключение.** Получены следующие основные результаты:

1. Реализованы элементы самоорганизующейся МуРКА, позволяющие добиться самостоятельного поведения целенаправленных агентов, обеспечивающего заключение контрактов на обмен энергией и информацией.

2. Разработана и реализована архитектура целенаправленного агента. Построены методы формирования функциональной специализации агентов.

3. Разработана и реализована программная инфраструктура создания и редактирования агентов, обеспечивающая формирование и отладку мультиагентных алгоритмов на основе заключения «мягких» контрактных связей между целенаправленными агентами.

Представленная в статье мультиагентная рекурсивная когнитивная архитектура позволяет за счет самоорганизации на основе обучения на разных уровнях интеллектуона сформировать такую интеллектуальную систему принятия решений, которая позволяет синтезировать закон управления заданного качества на различных уровнях абстрактного описания ситуаций.

В настоящее время на основе реализованных компонентов продолжается работа по созданию такой МуРКА и формированию инструментальных средств и интерфейсов для ее использования в задачах интеллектуального принятия решений и управления.

### **Список литературы**

1. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981.
2. Поспелов Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. – М.: Наука, 1988.
3. Макаров И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько; отделение информационных технологий и вычислительных систем РАН. – М.: Наука, 2006.

4. Карелин В.П. Интеллектуальные технологии и системы искусственного интеллекта для поддержки принятия решений // Вестник Таганрогского Института управления и экономики. № 2. 2011.
5. Берштейн Л.С., Карелин В.П., Целых А.Н. Модели и методы принятия решений в интегрированных интеллектуальных системах: монография. Ростов н/Д: РГУ, 1999.
6. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: научно-практическое издание. Серия "Информатизация России на пороге XXI века". - М. СИНТЕГ, 1998.
7. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Некоторые базовые принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени // Известия РАН. Теория и системы управления. № 6. 2001.
8. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы. – Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
9. Чечкин А. В. Рефлексия – центральная особенность интеллектуальных систем / В научно-методических материалах «Математические методы решения инженерных задач» под ред. профессоров В. В. Блаженкова и А. В. Чечкина. – М.: МО РФ, 2002.
10. Нагоев З.В. Интеллектуика, или мышление в живых и искусственных системах // Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013 - 211 с.
11. Нагоев З.В. Методы принятия решений и управления в неструктурированных задачах на основе самоорганизующихся мультиагентных рекурсивных когнитивных архитектур. - Диссертация на соискание уч. степени доктора технических наук, Нальчик, 2013 - 304 с.
12. Нагоев З.В., Нагоева О.В., Токмакова Д.Г. Адаптивный многомодальный высокоуровневый интерфейс к автономным системам на основе самоорганизующихся мультиагентных когнитивных моделей семантики. // Материалы Девятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Четвёртой

молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014.

13. Нагоев З.В. Мультиагентные экзистенциальные отображения и функции // Известия КБНЦ РАН. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН. 2013.

№ 4 (54). С. 64-71.

14. Нагоев З.В., Кудаев В.Ч., Ошхунов М.М., Пшенокова И.А. Онтонейроморфогенетическое моделирование виртуальных прототипов в интегрированных сапр на основе мультиагентных знаний и биоинспирированных алгоритмов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 6-1 (56). С. 46-53.

**Пшенокова Инна Ауесовна**, к.ф.-м.н., зав. лаб. "Интеллектуальные среды обитания" Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а. Тел. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: [pshenokova\\_inna@mail.ru](mailto:pshenokova_inna@mail.ru)

**Pshenokova Inna Auesovna**, Ph.D., Head of the laboratory "Intelligent environment" of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences.

RAS. 360000, KBR, Nalchik, 37-a, I.Armand street. Tel. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: [pshenokova\\_inna@mail.ru](mailto:pshenokova_inna@mail.ru)

**Денисенко Владимир Анатольевич**, н.с. лаб. "Интеллектуальные среды обитания" Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а. Тел. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: [sage@mail.ru](mailto:sage@mail.ru)

**Denisenko Vladimir A.**, staff scientist of the laboratory "Intelligent environment" of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences.

360000, КБР, Нальчик, ст. J. Armand, 37-а. Тел. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: sage@mail.ru

**Нагоева Ольга Владимировна**, к.н.с. Отдела мультиагентных систем

Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН.

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а. тел. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: nagoeva\_o@mail.ru

**Nagoeva Olga Vladimirovna**, staff scientist of the Department of the multiagent systems of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences.

360000, КБР, Нальчик, 37-а, I. Armand street. Ph. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: nagoeva\_o@mail.ru

**Токмакова Дана Гисовна**, младший научный сотрудник лаборатории "Компьютерная лингвистика" Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН.

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а. Тел. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: danatokmakova@gmail.com

**Tokmakova Dana Gisovna**, junior staff scientist laboratory of the "Computational Linguistics" of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences.

360000, КБР, Нальчик, 37-а, I. Armand street. Ph. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: danatokmakova@gmail.com

**Сундуков Заурбек Амирович**, стажер-исследователь отдела систем виртуальной реальности и прототипирования Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а. Тел. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: azraiths@gmail.com

**Sundukov Zaurbek Amurovich**, trainee researcher Department of the virtual reality systems and prototyping of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences

360000, KBR, Nalchik, st. J. Armand, 37-a. Tel. 8 (8662) 42-65-52.

E-mail: azraiths@gmail.com