

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-80-97

EDN: XUOIFA

Концепция коллаборативной системы автоматического виртуального прототипирования нейропротезов на основе гносеографических алгоритмов обучения интеллектуальных программных агентов

З. В. Нагоев^{1,2}, О. В. Нагоева^{✉2}

¹Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

²Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Актуальность разработки и внедрения нейропротезов обусловлена требованиями повышения функциональности и эффективности технических средств реабилитации пациентов с утраченными или частично поврежденными органами, улучшения качества их жизни. Проблема создания протезов в самом широком аспекте связана с необходимостью решения комплекса задач обеспечения структурно-функциональной совместимости сложных искусственных аппаратно-программных устройств с тканями и системами биологических организмов.

Цель исследования – разработка и обоснование концепции системы автономного коллаборативного проектирования нейросовместимых протезов.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования данной работы является методология создания инфраструктуры коллаборативного автоматизированного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов. Предметом исследования является возможность разработки системы коллаборативного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов на основе интеллектуальных программных нейрокогнитивных агентов.

Результаты. Разработана и обоснована концепция систем автономного коллаборативного проектирования нейросовместимых протезов. Разработаны основные требования к системам интеллектуального управления нейросовместимыми протезами и принципы их создания на базе коллаборативных человеко-машинных систем автономного проектирования и прототипирования. Обоснованы возможности создания и разработка архитектуры системы коллаборативного автономного проектирования нейросовместимых протезов на базе программных интеллектуальных нейрокогнитивных агентов.

Ключевые слова: нейросовместимые протезы, системы коллаборативного проектирования, автономное проектирование, виртуальное прототипирование, интеллектуальные программные агенты, мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры

Поступила 04.09.2025, одобрена после рецензирования 30.09.2025, принята к публикации 06.10.2025

Для цитирования. Нагоев З. В., Нагоева О. В. Концепция коллаборативной системы автоматического виртуального прототипирования нейропротезов на основе гносеографических алгоритмов обучения интеллектуальных программных агентов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 80–97. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-80-97

Concept for collaborative system for automatic virtual prototyping of neuroprostheses based on epistemological algorithms for learning intelligent software agents

Z.V. Nagoev^{1,2}, O.V. Nagoeva^{✉2}

¹Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
2 Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia

²Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
37-a I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia

Abstract. The development and implementation of neuroprosthetics is urgently needed to improve the functionality and effectiveness of technical rehabilitation tools for patients with lost or partially damaged organs, as well as to enhance their quality of life. The development of prosthetics, in its broadest sense, is linked to the need to address a range of challenges related to ensuring the structural and functional compatibility of complex artificial hardware and software devices with the tissues and systems of biological organisms.

Aim. The study is to develop and substantiate the concept of a system for autonomous collaborative design of neurocompatible prostheses.

Materials and methods. The object of this study is a methodology for creating an infrastructure for collaborative automated design and prototyping of neurocompatible prostheses. The subject of the study is the feasibility of developing a system for collaborative design and prototyping of neurocompatible prostheses based on intelligent software neurocognitive agents.

Results. A concept for autonomous collaborative design systems for neurocompatible prostheses has been developed and validated. Key requirements for intelligent control systems for neurocompatible prostheses and principles for their creation based on collaborative human-machine systems for autonomous design and prototyping have been developed. The feasibility of creating and developing an architecture for a collaborative autonomous design system for neurocompatible prostheses based on intelligent software neurocognitive agents has been substantiated.

Keywords: neurocompatible prostheses, collaborative design systems, autonomous design, virtual prototyping, intelligent software agents, multi-agent neurocognitive architectures

Submitted on 04.09.2025,

approved after reviewing on 30.09.2025,

accepted for publication on 06.10.2025

For citation. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V. Concept for collaborative system for automatic virtual prototyping of neuroprostheses based on epistemological algorithms for learning intelligent software agents. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 80–97. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-80-97

ВВЕДЕНИЕ

Под *нейросовместимым протезом (нейропротезом)* в данной работе понимается протез любого органа (части органа) организма млекопитающего, использующий для своего нормального функционирования обмен сигналами с нервной системой этого организма. Предполагается, что протез по некоторым из своих функциональных возможностей может уступать, быть эквивалентным или превосходить натуральный орган (или часть органа), который он заменяет.

Актуальность разработки и внедрения нейропротезов обусловлена требованиями повышения функциональности и эффективности технических средств реабилитации пациентов с утраченными или частично поврежденными органами, улучшения качества их жизни.

Проблема создания протезов в самом широком аспекте связана с необходимостью решения комплекса задач обеспечения структурно-функциональной совместимости сложных искусственных аппаратно-программных устройств с тканями и системами биологических организмов. В случае нейросовместимых протезов в этом аспекте особо выделяется спектр задач информационной совместимости, связанных с обеспечением обмена и интерпретации сигналов, генерируемых физиологическими системами организма и информационно-управляющей подсистемой протеза.

В этом контексте сам нейропротез в общем случае должен представлять собой сложное устройство, встраиваемое в естественный природный контур управления пораженным (утраченным) органом биологического организма, совместимость с которым по входам должна обеспечиваться путем приема, декодирования и использования в качестве параметров закона управления сигналов от различных отделов нервной системы – от центральных до наиболее дистальных частей эфферентного пути, иннервировавшего этот орган, оставшихся в структуре нервной системы организма и сохранивших свои функции после поражения протезируемого органа.

Соответственно, совместимость нейропротеза по выходам обеспечивается путем синтеза, кодирования и отправки информации в наиболее дистальные из оставшихся в нервной системе организма и сохранивших свои функции отделы эфферентного пути, иннервировавшего пораженный (утраченный) орган.

В общем случае мы считаем, что информационные сигналы, генерируемые функциональными системами нервной системы для управления некоторым органом, могут рассматриваться как высказывания на некоторых языках, с помощью которых кодируются задания на исполнение протезируемым органом. Аналогично сенсорные подсистемы, реализованные непосредственно в этом органе, сами кодируют высказывания на некоторых своих языках и направляют их выше по эфферентным путям.

Таким образом, одной из центральных *фундаментальных проблем*, решение которой необходимо положить в основу создания нейропротезов, полностью совместимых с нервной системой организма по сигналам в контурах различных уровней системы управления, является дешифровка и синтез алгоритмов операционного использования языка, с помощью которого эта нервная система коммуницирует со структурно-функциональными подсистемами протезируемых органов.

С целью решения этой сложной проблемы в данной работе рассматриваются возможности и перспективы применения систем искусственного интеллекта для построения на их основе дешифраторов и интерпретаторов таких языков. Отдельным направлением искусственного интеллекта, на теоретическом базисе которого должны, по нашему мнению, быть построены алгоритмы работы таких систем, является компьютерная лингвистика.

В данной работе предлагается такие алгоритмы проектировать и реализовывать на основе мультиагентных моделей семантики языка, основанных на концептуальной основе т.н. нейрокогнитивных архитектур [1, 2].

Объектом исследования данной работы является методология создания инфраструктуры коллаборативного автоматизированного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов.

Предметом исследования является возможность разработки системы коллаборативного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов на основе интеллектуальных программных нейрокогнитивных агентов.

Цель исследования – разработка и обоснование концепции системы автономного коллаборативного проектирования нейросовместимых протезов.

Основные задачи исследования:

- разработка основных требований к системам интеллектуального управления нейросовместимыми протезами и принципов их создания на базе коллаборативных человеко-машинных систем автономного проектирования и прототипирования;
- обоснование возможности создания и разработка архитектуры системы коллаборативного автономного проектирования нейросовместимых протезов на базе программных интеллектуальных нейрокогнитивных агентов;
- разработка и обоснование основных принципов и укрупненных алгоритмов перманентного федеративного обучения интеллектуальных нейрокогнитивных агентов в составе программной архитектуры систем автономного коллаборативного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НЕЙРОПРОТЕЗОМ

Как следует из этих требований к совместимости, для корректной работы нейропротеза необходимо решить задачи обеспечения:

- считывания и передачи в режиме реального времени без значимых потерь множественных последовательностей выходных сигналов с постсинаптических терминалей аксонов нейронов эфферентного тракта в систему управления нейропротеза;
- декодирования этих сигналов в наборы команд, непосредственно интерпретируемых (исполняемых) системой управления нейропротеза;
- синтеза закона управления комплексной динамикой подвижных частей протеза, обеспечивающего необходимые состав и качество выполнения функциональных операций;
- синтеза потока афферентных данных с помощью встроенной системы многомодальных сенсоров в режиме реального времени;
- кодирования этих данных в сигналы, непосредственно интерпретируемые нервной системой организма;
- передачи полученных сигналов на входы дендритов нейронов афферентного тракта;
- реализации алгоритмов обучения системы управления нейропротезом в процессе эксплуатации в составе общего комплекса алгоритмов контура адаптивного обучения нервной системы организма эффективному выполнению задач, опирающихся на использование функциональных операций, реализуемых данным нейропротезом.

Следует отметить, что такие понятия, как «качество» управления и «эффективность» выполнения задач, в данной работе применяются в отношении к способности нейропротеза полноценно заменять утраченный орган.

Таким образом, система управления нейропротезом должна распознавать и интерпретировать высказывания, сформированные из сообщений на языках, используемых нейронами эфферентного тракта, а также сама генерировать высказывания, распознаваемые и интерпретируемые нейронами афферентного тракта.

Строго говоря, придерживаясь мультиагентной гипотезы строения когнитивной архитектуры, мы рассматриваем выходные высказывания в обоих направлениях как элементы динамических потоков высказываний отдельных нейронов и сенсоров. Из этого предположения, в частности, следует, что в общем случае как эфферентные команды, так и афферентные сигналы, интерпретируемые на органном уровне в терминах функциональных операций, на нейроморфологическом уровне представляют собой каскады наборов последовательных высказываний (реплик), сформулированных с использованием множества языков различных эфферентных и афферентных нейронов.

Задача декодирования таких сигналов, соответственно, переопределяется как задача интерпретации множества последовательностей высказываний различных эфферентных

нейронов, поступающих в режиме реального времени. При этом результатом интерпретации должно в общем случае также стать множество последовательностей сигналов на соответствующие исполнительные подсистемы нейропротеза.

В свою очередь, задача кодирования афферентных сигналов также определяется как задача интерпретации множества последовательностей сигналов от сенсоров и афферентных нейронов в множества последовательностей высказываний на входных языках нейронов-получателей в различных отделах мозга.

Для организации подобных обменов, как правило, строят т.н. нейроинтерфейсы. Наиболее распространены нейроинтерфейсы на основе неинвазивных электроэнцефалографии и миографии и инвазивные нейроинтерфейсы – на основе микроэлектродного таксиса [3].

Активно разрабатываются методы и системы, ориентированные на применение нейроморфных вычислителей и вычислений для прототипирования структурно-функциональных подсистем нервной системы и их сигналов, в норме управляющих протезируемым органом [4].

Однако, вероятнее всего, для решения поставленных задач такие подходы непригодны, так как они не обладают необходимой точностью по пространственному разрешению и не опираются на теоретические разработки в области кодирования и декодирования сигналов отдельных нейронов, что во многом связано с типом сигнала, традиционно рассматриваемого в таких задачах, – электромагнитного.

Данная работа строится на гипотезе о том, что необходимой точности и эффективности можно добиться в случае, когда в качестве сигнала рассматривается биохимическое сообщение, реализованное в виде нейромедиаторного кода, направленного в синаптическую щель из пресинаптической терминали аксона нейрона-отправителя высказывания (рис. 1).

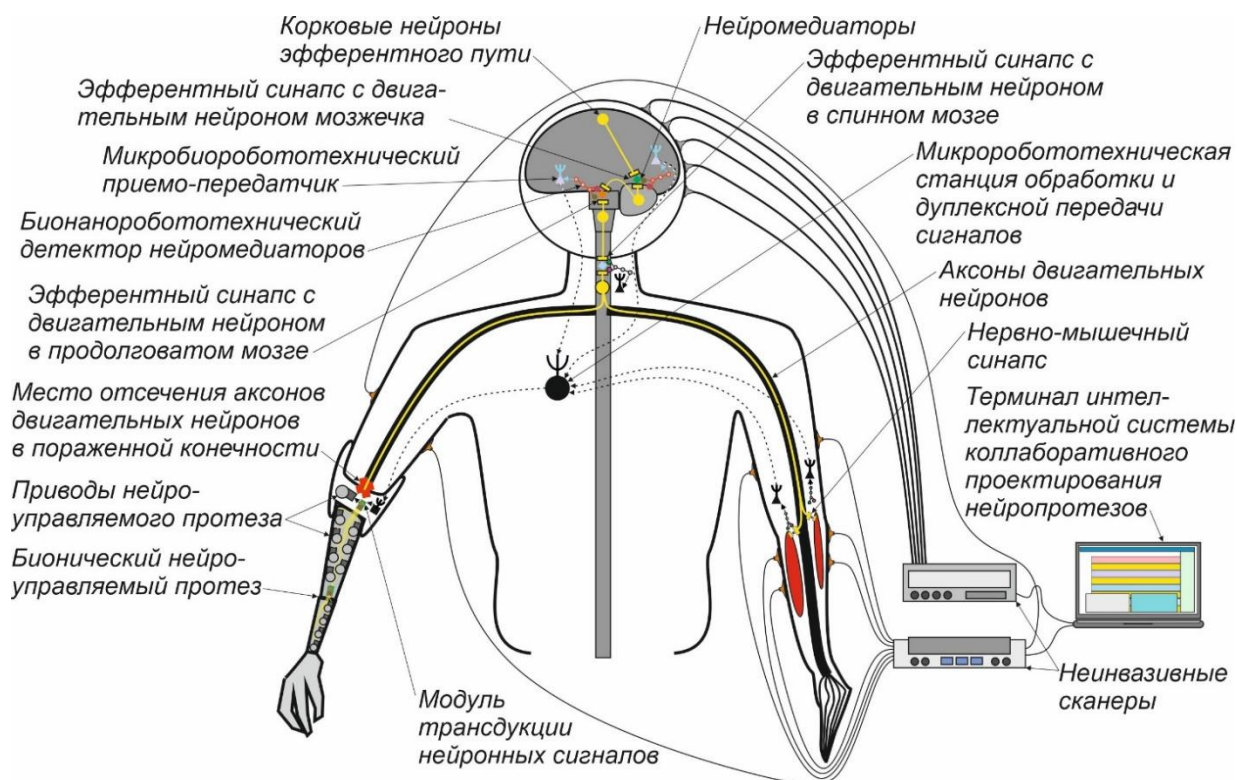


Рис. 1. Структурно-функциональная схема метафоры проектирования нейросовместимых протезов (эфферентная часть)

Fig. 1. Structural and functional diagram of the design metaphor for neurocompatible prostheses (efferent part)

Из этой гипотезы, в частности, следует, что для передачи команд от эфферентных нейронов в нейропротез необходимо разработать и реализовать устройство считывания нейромедиаторного кода, которое принимало бы на вход нейромедиаторы, а на выходе генерировало бы дискретный электрический сигнал.

В свою очередь, для передачи афферентных сигналов из нейропротеза требуется устройство, конвертирующее дискретные электрические сигналы в наборы нейромедиаторов, непосредственно передаваемых на постсинаптические терминалы афферентных нейронов.

В этом смысле в обоих случаях нам потребуется как бы структурно-функционально достроить недостающую часть синапса – либо пресинаптическую, либо постсинаптическую терминаль: в случае эфферентных сигналов – постсинаптическую, а в случае афферентных сигналов – пресинаптическую (рис. 1).

Какими должны быть эти устройства – искусственные синаптические терминалы? На данный момент мы можем лишь в самых общих чертах сформулировать некоторые требования к ним. В частности, наша базовая гипотеза состоит в том, что это должны быть нанороботы, скорее всего, гибридного типа, объединяющие в своей конструкции, реализации и структурно-функциональной организации подходы как наноробототехники (нанобиоробототехники), так и бионаноробототехники [5, 6]. Такие нанороботы, помимо непосредственной конвертации электрических сигналов в биохимические и обратно, должны еще и каким-то образом доставляться к заданным синапсам-мишеням и встраиваться в них.

Ясно также, что при этом они должны быть иммунонейтральны, устойчивы, безопасны. Они также должны обеспечивать прямую и обратную связь с разработчиками и операторами как на стадиях проектирования и создания, так и на стадиях эксплуатации и утилизации (рис. 1).

Следует отметить, что в настоящее время такие системы пока не созданы и в целом пока не разработаны даже фундаментальные основы их проектирования и создания, хотя исследования в данной области ведутся по всему миру широким фронтом и нарастающими темпами [7].

Одной из центральных причин сложности разработки подобных систем является отсутствие возможности непосредственного наблюдения за объектами и процессами управления ими. Молекулярные машины, обеспечивающие функционирование синапса, имеют наноразмерный масштаб. Устройство, представляющее собой искусственную синаптическую терминаль, также должно быть ориентировано на взаимодействие с такими наноразмерными молекулярными машинами и продуктами их функционирования и, соответственно, само должно быть наноразмерным или содержать наноразмерные функциональные части.

Кроме того, разработка и применение подобных устройств актуализирует целый спектр проблем биологической совместимости.

Таким образом, какой бы подход ни использовался при проектировании и создании искусственного синапса и средств его таргетной доставки (группа биомолекулярных роботов) – наноробототехнический, бионаноробототехнический, молекулярно-биологический или смешанный, в любом случае разработчику и экспериментатору необходим инструментарий, позволяющий эффективно решать следующие задачи:

- исследование структуры, состава, конфигурации, функциональных свойств и взаимодействий молекулярных роботов и их групп;
- проектирование и визуализация молекулярных роботов и их групп;
- расчет траектории, визуализация и исследование процессов поведения, структурно-функциональных характеристик молекулярных роботов и их групп при их взаимодействии с гетеромасштабными биологическими и абиотическими системами и комплексами;
- синтез последовательностей технологических операций по изготовлению молекулярных роботов и их групп;
- изготовление молекулярных роботов и их групп.

Инструментом, способным реализовать столь сложный и разнообразный функционал, по нашему представлению, могла бы стать *коллаборативная система виртуального прототипирования биосовместимых молекулярных роботов*. С целью проектирования нейропротезов, основанных на имитационных моделях синаптических терминалей, *коллаборативная система виртуального прототипирования биосовместимых молекулярных роботов* должна быть подсистемой системы *коллаборативного прототипирования нейропротезов*. Рассмотрим основные принципы ее структурно-функциональной организации.

2. АРХИТЕКТУРА И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ НЕЙРОПРОТЕЗОВ

Система коллаборативного прототипирования нейропротезов должна представлять собой компьютерную программу, включающую в себя следующие основные модули:

- система коллаборативного проектирования биосовместимых молекулярных роботов и их коллективов;
- система имитационного моделирования поведения молекулярных роботов и их коллективов;
- система синтеза и поддержки конвейера технологических операций производства молекулярных роботов и их коллективов.

Общая архитектура проектируемого комплекса коллаборативного прототипирования нейропротезов – распределенная диалоговая мультиагентная гетерогенная гетеромасштабная интеллектуальная коллаборативная система.

Требование коллаборативности означает возможность совместного конструирования устройства смешанным человеко-машинным коллективом, включающим в себя, помимо конструкторов-людей, еще и конструкторов-интеллектуальных программных агентов. В данном контексте предполагается, что такие агенты способны понимать проблемы на основе интерпретации высказываний на естественном языке, самостоятельно выполнять декомпозицию этих проблем и строить их совместные решения. Процесс построения совместного решения здесь – это процесс синтеза согласованного коллективного поведения всех агентов в составе гетерогенного коллектива, направленного на построение целей, постановку задач, формирование и реализацию их решений.

Для организации такого коллектива необходимо применять интеллектуальных программных агентов, способных к выполнению логических рассуждений, обучению, пониманию и применению естественного языка для организации диалогового интерфейса и решения задач постановки миссий и автоматического формирования отчетов и объяснений, к созданию и использованию внутреннего функционального представления о себе и других членах коллаборативного коллектива, синтезу и реализации кооперативных планов решения априорно не определенных и творческих проблем, к которым относятся сложные задачи проектирования и конструирования.

В качестве таких интеллектуальных агентов, по нашему мнению, могут быть применены агенты на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур, принадлежащие классу ИИ (*ии-вычислители*) по классификации, предложенной в [8].

Предполагается, что такие интеллектуальные агенты, являясь, по определению, гносеографическими [8], т.е. агентами, способными обучаться на основе диалоговой коммуникации и чтения специальной литературы, смогут за разумное время сформировать индивидуальные базы общих и профессиональных знаний, использование которых позволит им в процессе коллаборативного решения задач конструирования значительно повысить эффективность работы всего человеко-машинного коллектива.

Кроме того, такие интеллектуальные агенты будут ориентированы на возможность использования федеративного обучения, что также позволит многократно повысить эффективность получения и применения знаний, полезных для решения задач проектирования нейропротезов на основе бионаноробототехнических моделей синаптических терминалей (рис. 2).

Программно-аппаратный комплекс коллаборативного проектирования будет носить распределенный характер, т.е. разработчики нейропротезов и нейроинтерфейсов смогут сотрудничать друг с другом, а также с интеллектуальными программными агентами удаленно, с использованием виртуализации эффекта присутствия. Технически такой эффект может быть достигнут на основе применения средств виртуальной и дополненной реальности, программных компонентов и библиотек трехмерной визуализации и моделирования, инструментальных средств совместного редактирования изделий и устройств.

Существующий сегодня барьер высокой удельной трудоемкости и стоимости создания виртуальных миров и сред с помощью современных распределенных редакторов трехмерных объектов является одним из значимых сдерживающих факторов развития систем коллаборативного прототипирования. Ключевым фактором преодоления этого барьера нам представляется разработка и внедрение *диалоговой системы* совместного конструирования виртуальных устройств и агрегатов. В такой системе интеллектуальные гносеографические программные агенты, обученные и перманентно самостоятельно обучающиеся пониманию и использованию естественного языка, с помощью диалоговой подсистемы интерпретируют высказывания участников коллаборативной человеко-машинной (люди, интеллектуальные программные агенты) конструкторской группы с целью извлечения информации, существенной для проектирования, конструирования, прототипирования, изготовления изделия, и ее использования для автоматического редактирования этого изделия с учетом заданных параметров и ограничений, накладываемых средой имитационного моделирования.

Применение диалоговой системы позволит добиться беспрецедентной скорости синтеза виртуальных прототипов изделий и устройств, так как для непосредственного редактирования будет использоваться наиболее широкий из всех потенциально доступных на актуальном уровне развития науки и техники каналов передачи информации на основе естественно-языковых высказываний. Ширина этого канала определяется его выразительной мощностью, которая, в свою очередь, есть производная от степени компактности семантической упаковки информации, под которой мы понимаем отношение количества информации, извлекаемой интеллектуальным агентом – интерпретатором сообщения – из некоторого высказывания, к количеству информации, которое непосредственно передается по коммуникационному каналу для пересылки этого сообщения интерпретатору.

Степень компактности семантической упаковки естественно-языковых высказываний, как правило, наивысшая в силу того, что естественные интеллектуальные агенты (люди) содержат в мозге нейроморфологический аппарат, реализующий процессы концептуализации, концептуальной композиции и декомпозиции денотативных феноменологических комплексов семантики естественного языка. Высказывание, представимое символьной строкой в 100 байт, с помощью работы таких нейроморфологических комплексов может быть интерпретировано в терминах динамики функциональных систем головного мозга, реализующих моделирование соответствующих концептов феноменов, реферируемых десигнатами, представленными в высказывании, и их взаимодействий, описывающих непосредственные и ассоциированные процессы в системе «интеллектуальный агент – внешняя среда», характеризующиеся синтезом и передачей терабайта информации между нейронами в составе этих функциональных систем.

Интерпретаторы высказываний в диалоговой системе в соответствии с общей логикой обеспечения интеллектуальных рассуждений на основе применения нейрокогнитивных архитектур должны быть реализованы на базе программных агентов, специализирующихся на определенных областях общих и профессиональных знаний, востребованных при конструировании сложных аппаратно-программных комплексов, изделий и устройств. Так как система гносеографическая и ориентируется на реализацию и использование возможности федеративного обучения, представляется возможным достижение быстрого роста профессиональной компетентности и применимости таких агентов при совместном коллаборативном конструировании и тестировании.

В силу того, что функционально значимые для задач проектирования, разработки и эксплуатации нейропротезов феномены проявляются на различных уровнях масштаба – от наноразмерных молекулярных систем до макромеханических аппаратно-программных комплексов, система коллаборативного прототипирования должна обеспечивать поддержку гетеромасштабного проектирования. В частности, в ней должны быть предусмотрены инструментальные средства для представления, хранения, интерпретации, моделирования данных о феноменах различных масштабов и утилиты для «бесшовного перехода» между уровнями представления моделей и объектов при смене масштаба рассмотрения прототипируемого устройства.

Гетеромасштабность должны поддерживать в том числе и диалоговые средства совместного редактирования виртуальных прототипов.

Для того чтобы разрабатываемые прототипы нейропротезов, которые в соответствии с вышеизложенной парадигмой организации нейроинтерфейсов на основе моделей синаптических соединений будут представлять собой гетеромасштабные нанобиоробототехнические устройства, можно было протестировать на основе виртуальных экспериментов, в целом значительно улучшить качество проектирования, система коллаборативного прототипирования должна включать в себя подсистему («движок») т.н. *полностью корректной виртуальной среды* [9]. С помощью такого движка в системе будет выполняться имитационное моделирование законов физики, химии и биологии в применении к прототипируемым объектам, что необходимо для их детальной инженерно-технической проработки.

В аспектах методов имитационного моделирования и технической реализации движков полностью корректной виртуальной среды можно расслоить на физический, химический и биологический движки, каждый из которых должен обеспечивать необходимый состав и заданную точность моделируемых профильных специализированных законов.

Среди значительного многообразия применяемых методов имитационного моделирования физических, химических и биологических законов наиболее перспективными для использования при построении движка полностью корректной среды проектируемой системы коллаборативного виртуального прототипирования представляются методы симуляции поведения сплошных и активных сред распределенными мультиагентными системами. Этот подход основан на выборе способа пространственной дискретизации сплошной среды системой взаимодействующих агентов, связи между которыми аппроксимируются на основе обучения управляющих нейрокогнитивных архитектур этих агентов с помощью обучающих выборок, построенных на основе табличных или экспериментальных данных, встроенных в этих агентов или доступных им. Агенты могут быть гетеромасштабными и рекурсивными, т.е. многократно встроенными друг в друга, что удобно

для моделирования разномасштабной феноменологии и согласования таких моделей между собой на основе мультиагентного обмена сообщениями в целях согласования их совместной работы [10, 11].

Управляющие нейрокогнитивные архитектуры таких агентов в зависимости от уровня масштаба представления моделируемого закона могут варьироваться по составу и полноте. Главное, чтобы эти нейрокогнитивные архитектуры позволяли синтезировать и согласовывать между собой траектории поведения (динамики параметров) агентов, отвечающих за моделирование гетеромасштабных частей сплошных и активных сред, соответствующие заданным с допустимой степенью точности.

С помощью мультиагентных нейрокогнитивных агентов удобно представлять не только гетеромасштабные, но и гетерогенные по составу моделируемых законов виртуальные среды. Например, часть агентов в одной сетке дискретизации могут представлять имитационные модели физических законов, а другая группа агентов – в другой сетке дискретизации – химические или биологические законы. Более того, совместное обучение этих мультиагентных групп должно привести физические, химические и биологические модели к согласованию между собой и с заданными целевыми параметрами и ограничениями, что в целом должно обеспечить требуемое качество работы имитационных моделей движка полностью корректной виртуальной среды.

К преимуществам таких имитационных моделей можно также отнести простоту создания и редактирования мультиагентных нейрокогнитивных агентов и систем на основе таких агентов [12–14].

3. ОБУЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ

Принципиальное значение для успешной реализации проекта создания системы коллаборативного прототипирования нейропротезов имеет методология обучения (развития) интеллектуальных агентов, реализующих функционал движков имитационного моделирования физических, химических и биологических взаимодействий, синтеза конструкторских решений, поддержки диалога и коллективного поведения (специализированные агенты).

Для решения задачи организации обучения таких агентов целесообразно применить общую («сквозную») технологию, основанную на концепции перманентного смешанного федеративного обучения. Эта концепция предполагает, что специализированные интеллектуальные агенты, интегрированные в различные коллаборации, распределенные между потребителями, имеют возможность федеративного обмена знаниями, накопленными в результате выполнения задач назначения. Сами же эти знания формируются в течение всего жизненного цикла инсталляции программного обеспечения или сервиса коллаборативной системы виртуального прототипирования с помощью различных типов алгоритмов мультиагентного обучения интеллектуальных агентов: феногенетического, соционтологического и гносеографического [8]. Под феногенетическим обучением понимается модификация фенотипов агентов в результате применения генетических алгоритмов многопоколенной оптимизации.

Соционтологическое обучение выполняется на основе обмена знаниями между гетерогенными участниками коллаборативного коллектива – людьми, интеллектуальными агентами, роботами с использованием естественно-языковой диалоговой системы.

Гносеографическое обучение реализуется на основе алгоритмов машинного чтения специализированной литературы.

С целью достижения уровня функциональной готовности управляющих нейрокогнитивных архитектур специализированных интеллектуальных агентов, необходимого для решения нетривиальных задач интерпретации и синтеза естественно-языковых высказываний, понимания сущности конструкторских задач и контекста коллаборативного взаимодействия при их решении, синтеза и реализации индивидуальных и коллективных поведенческих стратегий, тактических линий и оперативных приемов, требуется разделение процесса обучения на базовый, специальный и онтогенетический.

На базовом уровне интеллектуальный агент под управлением нейрокогнитивной архитектуры обучается основам онтологизации, идентификации и решения проблем универсального спектра, способам логического мышления, коммуникации на базе естественного языка, основам кооперативного и коллаборативного поведения, методам и алгоритмам анализа и декомпозиции ситуаций.

В основе обучения интеллектуального агента на всех уровнях лежат мультиагентные алгоритмы целенаправленной кооперации программных агентов-нейронов в составе управляющей нейрокогнитивной архитектуры, детерминированной задачами реализации их локальных целевых функций, описанные в [10, 15]. В ходе реализации таких алгоритмов используются так называемые функции нейрогенеза, обеспечивающие добавление новых агентов-нейронов (недостающих для корректной работы интеллектуального агента программных вычислителей) в различные уровни нейрокогнитивной архитектуры, а также алгоритмы т.н. онтонейроморфогенеза, имитирующие ситуативно обусловленные процессы роста и деградации аксо-дендрональных связей между агентами-нейронами [8]. Применение функций нейрогенеза и онтонейроморфогенетических алгоритмов позволяет реализовать базовые процессы онтологизации, идентификации и решения проблем универсального спектра, с которыми сталкивается интеллектуальный агент при получении, интерпретации и выполнении миссий целевого назначения, что в целом обеспечивает ему адаптацию к контексту его использования в составе человеко-машинного коллектива на основе перманентного обучения.

На втором этапе интеллектуальный агент, обладающий нейрокогнитивной архитектурой, обеспечивающей управление базовыми поведенческими паттернами его поведения, погружается в коммуникативную среду, в которой он взаимодействует с операторами в составе человеко-машинного коллектива в интересах обеспечения выполнения алгоритмов социоонтологического обучения. Для реализации обучения на этом этапе интеллектуальный агент уже должен обладать полной нейрокогнитивной архитектурой (нейрокогнитивной архитектурой личности), включающей в себя структурно-функциональные компоненты подсознания, сознания, интерскрина (модель картезианского театра), внимания, опыта, обеспечивающей функциональную репрезентацию самого интеллектуального агента и других интеллектуальных агентов в окружающей коммуникативной среде, реализацию алгоритмов синхронного выполнения мультиагентных нейрокогнитивных алгоритмов обработки проблемных ситуаций, построения расписаний выполнения таких алгоритмов с учетом значимости проблем, синтеза планов управления монопольными ресурсами в составе «тела» интеллектуального агента (программные исполнительные механизмы, единичные аппаратно-программные модули в его составе).

Коммуникативная инфраструктура, обеспечивающая погружение интеллектуального агента в среду социального окружения, включает в себя программно-аппаратные средства аудиовизуального взаимодействия с пользователями, программные компоненты распознавания и синтеза видеопотока и речи, диалогового интерфейса.

Основной целью социоонтологического обучения интеллектуального агента является обучение его естественному языку на основе обеспечения комплекса процессов имитации феноменологических циклов освоения естественного языка. Применение такой имитационной модели нацелено на создание условий для роста и развития нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента путем синхронного взаимообусловленного мультиагентного синтеза в ее составе нейрокогнитивных функциональных систем (по П. К. Анохину), обеспечивающих формирование моделей понимания и синтеза естественно-языковых высказываний в коммуникативно обусловленных контекстах при коллективной онтологизации, идентификации и решении проблем совместно с другими агентами в составе социального окружения.

В результате выполнения цикла социоонтологического обучения программный агент должен совершить качественный переход в класс гносеографических агентов, на структурно-морфологическом уровне реализующийся в эмерджентном формировании в его управляющей нейрокогнитивной архитектуре функциональных систем, обеспечивающих синтез феноменологического комплекса поведения, направленного на извлечение знаний из печатных текстов. На этом уровне инфраструктура обучения интеллектуального агента дополняется возможностями доступа к электронной библиотеке специально подобранных текстов (статьи, книги), чтение которых должно обеспечить его набором профессиональных знаний, необходимых и достаточных для реализации общих алгоритмов творческого синтеза при решении специализированных задач в составе человеко-машинного коллектива.

Возможность управления обучающим контентом на основе выбора профессионального направления позволяет специализировать интеллектуальных агентов по различным областям профессиональных знаний и компетенций, необходимость в которых возникает при решении целевых задач, поставленных человеко-машинному коллективу.

В рассматриваемом нами случае применения интеллектуальных нейрокогнитивных агентов в составе человеко-машинного коллектива, реализующего задачи коллаборативного проектирования нейропротезов, направления профессиональной специализации должны охватывать прежде всего области, характеризующиеся порогами сложности восприятия и количества обрабатываемой информации, значительно превышающими функциональные возможности мозга человека. К числу таких областей, по нашему мнению, относятся нейроморфология и нейрофизиология, биохимия процессов мышления, целенаправленного управления мускулатурой органических комплексов общими и специализированными функциональными системами нервной системы человека, бионаноробототехника, нанобиоробототехника, элементы которых необходимо конструктивным образом интегрировать в процессе синтеза решений проблем проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов и нейрокогнитивных систем управления ими.

В концептуализируемой нами системе коллаборативного проектирования можно выделить условный, четвертый, уровень обучения интеллектуальных агентов, участие которых обеспечивается такой системой в составе человеко-машинного коллектива, решающего с ее помощью конкретные задачи разработки и прототипирования нейропротезов, связанный непосредственно с алгоритмической базой поиска таких решений. Для реализации этого уровня обучения система коллаборативного проектирования должна обеспечивать возможность создания и использования гибридного экспериментального программно-аппаратного комплекса, включающего в себя как натурные, так и виртуальные части (рис. 2).

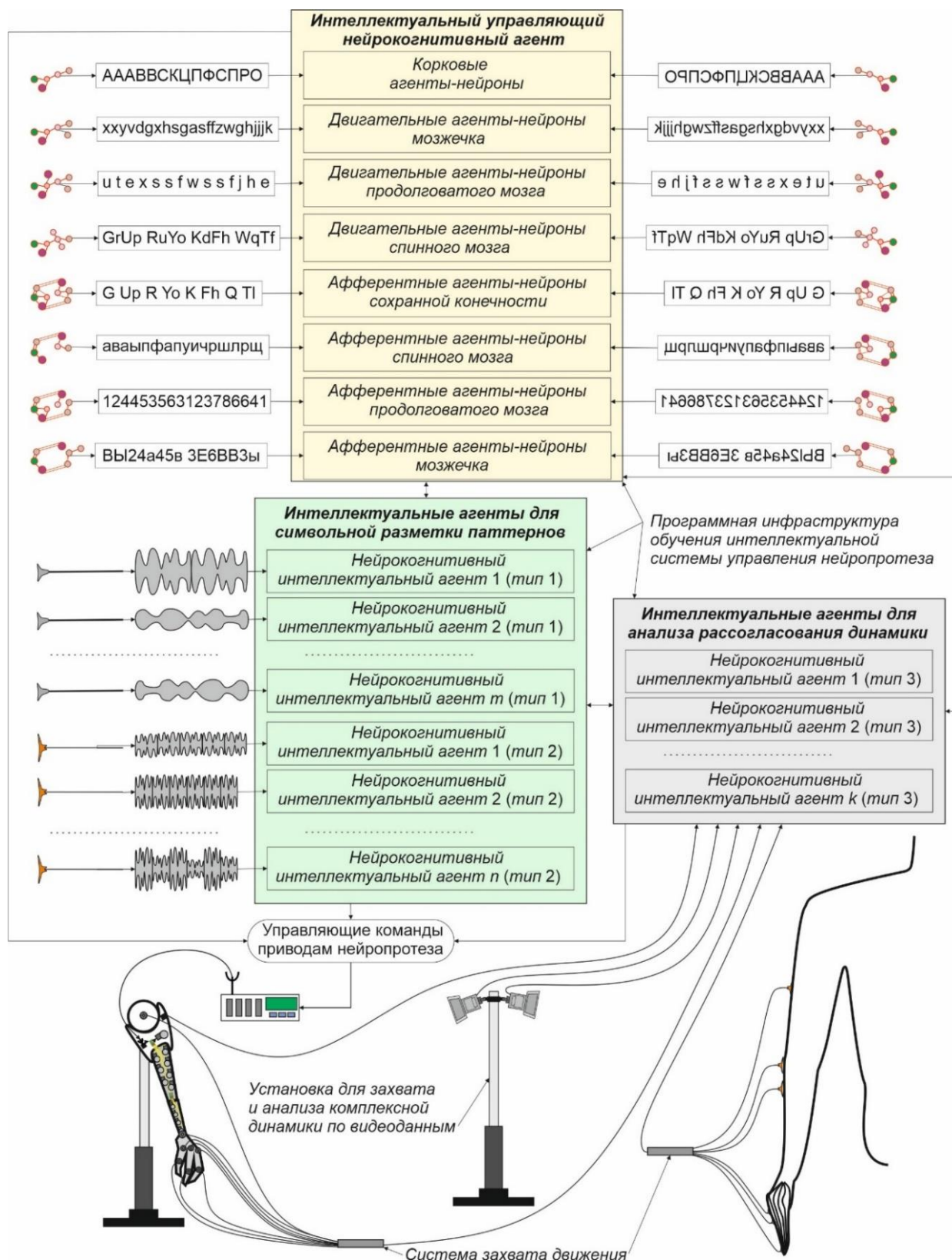


Рис. 2. Гибридный экспериментальный комплекс для синтеза и тестирования систем управления нейросовместимыми протезами

Fig. 2. Hybrid experimental complex for synthesizing and testing control systems for neurocompatible prostheses

Как следует из рисунка 2, гибридный экспериментальный комплекс включает в себя устройства неинвазивного сканирования активности нервной системы, аппаратно-программные комплексы гибридных нейроинтерфейсов на основе наноробототехнических и бионаноробототехнических анализаторов, аппаратно-программные комплексы для подключения и тестирования работы различных нейросовместимых протезов, устройств интеграции и обмена данными между гетеромасштабными подсистемами, интеллектуальных программных агентов для интерпретации сигналов неинвазивных и инвазивных нейроинтерфейсов, а также интеллектуальных агентов для управления нейросовместимыми протезами.

Гибридный экспериментальный комплекс функционирует в двух основных режимах – режиме обучения и режиме управления. В режиме обучения интеллектуальные программные агенты, предназначенные для интерпретации сигналов неинвазивных и инвазивных нейроинтерфейсов (интеллектуальные агенты-интерпретаторы), регистрируют и выполняют попытки дешифровки потоков сигналов, символов и паттернов значений измеряемых физических параметров с целью аппроксимации дискретного закона управления комплексной динамикой нейросовместимого протеза с учетом рассогласования с наблюдаемой нормальной динамикой. В случае с нейропротезом верхней конечности, схематически изображенном на рис. 2, нормальная динамика (эталонная траектория сложного движения объекта управления) задается потоками значений параметров, регистрируемых системами захвата движения и распознавания движения по данным видеонаблюдения, выполняющими перманентное наблюдение за сохранной конечностью пациента. Задача интеллектуальных агентов-интерпретаторов при работе в режиме обучения состоит в определении рассогласования между эталонной траекторией сложного движения объекта управления и фактической траекторией его сложного движения, определяемой системой измерения параметров комплексной динамики нейросовместимого протеза, построенной на основе применения систем захвата и распознавания движения и системы проприоцепции, выполненной на основе встроенных в протез датчиков измерения углов поворота шарнирных соединений, тензорных и силомоментных датчиков. Фиксируемые рассогласования эталонной и фактической траекторий комплексной динамики объекта управления далее используются интеллектуальными агентами-интерпретаторами для дешифровки потоков значений измеряемых физических величин, дискретных сигналов и последовательностей символов путем аппроксимации закона управления как функции от всех таких параметров, применение которого минимизирует величину рассогласования.

Выявленные таким образом корреляции между наборами значений параметров управления и элементами комплексной динамики нейропротеза интерпретируются в терминах команд управления, генерируемых нейронами, расположенными на различных уровнях специального эфферентного тракта. Множества входных и выходных символов, соответствующих наборам таких команд, интерпретируются как входные и выходные языки таких нейронов.

После дешифровки таких языков интеллектуальными агентами-интерпретаторами происходит обучение интеллектуальных агентов для управления нейросовместимыми протезами (интеллектуальные управляющие агенты) применению этих языков для синтеза потоков эфферентных команд, обеспечивающих работу приводов нейросовместимого протеза, реализующую заданную траекторию его комплексной динамики. В силу того, что интеллектуальные управляющие агенты представляют собой мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры, имитирующие структурно-функциональную организацию когнитивной архитектуры мозга, такое обучение выполняется путем синтеза баз знаний агентов-нейро-

нов, условно коррелированных с эфферентными нейронами различных отделов мозга, гипотетические входные и выходные языки которых были построены на предыдущем этапе обучения. Синтез таких баз знаний выполняется путем создания соответствующих продукционных правил по данным множеств построенных языков на всех эфферентных уровнях функциональной системы, обеспечивающей управление конкретной заданной траекторией комплексной динамики нейросовместимого протеза (рис. 2). В результате итеративного выполнения комбинации алгоритмов обучения интерпретирующих и управляющих агентов формируются мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры этих агентов, обеспечивающие минимизацию рассогласования между эталонной и фактической траекториями сложного движения нейропротеза.

Следует обратить внимание, что сам процесс обучения выполняется при непосредственном участии пациента, измерения параметров работы реальных функциональных систем которого непосредственно и реализуются проектируемой гибридной экспериментальной установкой. Соответственно, как во время обучения, так и после его завершения, при переходе к работе в режиме управления комплексной динамикой нейросовместимого протеза пациент полностью вовлечен во взаимодействие с этой установкой. При этом естественным образом происходит обучение функциональных систем и сохраненных афферентных и эфферентных частей этих функциональных систем, позволяющих использовать нейросовместимый протез для реализации необходимых динамических и кинематических эволюций в обоих режимах. Иными словами, именно пациент, реализуя свои интенции в отношении сохранной и протезированной конечностей, задает желаемую и фактическую траекторию их комплексной динамики и в повторных итерациях стремится минимизировать рассогласование между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны основные принципы создания инфраструктуры коллаборативного автоматизированного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов. Исследованы возможности разработки системы коллаборативного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов на основе интеллектуальных программных нейрокогнитивных агентов. Разработана и обоснована концепция систем автономного коллаборативного проектирования нейросовместимых протезов. Разработаны основные требования к системам интеллектуального управления нейросовместимыми протезами и принципы их создания на базе коллаборативных человеко-машинных систем автономного проектирования и прототипирования. Обоснованы возможности создания и разработки архитектуры системы коллаборативного автономного проектирования нейросовместимых протезов на базе программных интеллектуальных нейрокогнитивных агентов. Разработаны и обоснованы основные принципы и укрупненные алгоритмы перманентного федеративного обучения интеллектуальных нейрокогнитивных агентов в составе программной архитектуры систем автономного коллаборативного проектирования и прототипирования нейросовместимых протезов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.
2. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

3. *Roberta Kwok*. Neuroprosthetics: Once more, with feeling. *Nature*. 2013. Vol. 497. Pp. 176–178.
4. *Кравченко С. В.* Разработка системы прототипирования нейропротезов на основе гибридной программно-аппаратной реализации спайковых нейронных сетей // Вестник кибернетики. 2023. № 22(4). С. 26–32. DOI: 10.35266/1999-7604-2023-4-4
5. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Нагоев З. В.* Бионаноробототехника: концептуализация, проблематика и задачи исследований // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 6(74). С. 11–17. EDN: XRUYRN
6. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Проблема разработки теоретических основ проектирования и прототипирования устройств и систем бионаноробототехники в киберфизических системах и средах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 28–38.
7. *Clausen J., Fetz E., Donoghue J. et al.* Help, hope and hype: Ethical dimensions of neuroprosthetics // *Science*. 2017. Vol. 356. Pp. 1338–1339. DOI: 10.1126/science.aam7731
8. *Нагоев З. В.* Основные принципы нейрокогнитивного моделирования сознания агента универсального искусственного интеллекта // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 1. С. 152–170. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-152-170
9. *Нагоев З. В.* Геномное управление морфогенезом агентов в виртуальной «физически-корректной» среде // Кибернетика и системный анализ. 2008. № 2.
10. *Нагоев З. В., Кудаев В. Ч., Оихунов М. М., Пишенокова 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. EDN: RPXLRL
11. *Кудаев А. Ю., Лежебоков А. А., Нагоев З. В.* Виртуальное прототипирование в интегрированных сапр машиностроения и электроники на основе онтонейроморфогенетического моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7(144). С. 29–35. EDN: QOUCHP
12. *Nagoev Z., Nagoeva O., Anchokov M. et al.* The symbol grounding problem in the system of general artificial intelligence based on multi-agent neurocognitive architecture // *Cognitive Systems Research*. 2023. Vol. 79. Pp. 71–84. DOI: 10.1016/j.cogsys.2023.01.002
13. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z.* Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures // *Cognitive Systems Research*. 2021. Vol. 66. Pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.10.015
14. *Нагоев З. В., Пишенокова И. А., Нагоева О. В. и др.* Имитационная модель нейрокогнитивной системы управления автономным программным агентом, выполняющим кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 226–234. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-226-234
15. *Нагоев З. В.* Онтонейроморфогенетическое моделирование // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 56–63. EDN: QZTFLN

REFERENCES

1. *Nagoev Z.V. Intellectika, ili Myshleniye v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intellectics, or Thinking in Living and Artificial Systems]. Nalchik: Publishing House of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. 235 p. (In Russian)
2. *Nagoev Z.V., Nagoeva O.V. Obosnovaniye simvolov i mul'tiagentnyye neyrokognitivnyye modeli semantiki yestestvennogo yazyka* [Symbol Grounding and Multi-Agent Neurocognitive Models of Natural Language Semantics]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2022. 150 p. (In Russian)

3. Kwok R. Neuroprosthetics: Once more, with feeling. *Nature*. 2013. Vol. 497. Pp. 176–178.
4. Kravchenko S.V. Development of a prototyping system for neuroprostheses based on a hybrid hardware-software implementation of spiking neural networks. *Bulletin of Cybernetics*. 2023. No. 22(4). Pp. 26–32. DOI: 10.35266/1999-7604-2023-4-4. (In Russian)
5. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Nagoev Z.V. Bionanorobotics: conceptualization, problems and research tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 6(74). Pp. 11–17. EDN: XRUYRN. (In Russian)
6. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. The problem of developing the theoretical foundations for the design and prototyping of devices and systems of bionanorobotics in cyber-physical systems and environments. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 28–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-28-38. (In Russian)
7. Clausen J., Fetz E., Donoghue J. et al. Help, hope and hype: Ethical dimensions of neuroprosthetics. *Science*. 2017. Vol. 356. Pp. 1338–1339. DOI: 10.1126/science.aam7731
8. Nagoev Z.V. Basic principles of neurocognitive modeling of consciousness of an agent of universal artificial intelligence. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 1. Pp. 152–170. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-152-170. (In Russian)
9. Nagoev Z.V. Genomic control of agent morphogenesis in a virtual “physically correct” environment. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2008. No. 2.
10. Nagoev Z.V., Kudaev V.Ch., Oshkhunov M.M., Pshenokova I.A. Ontoneuromorphogenetic modeling of virtual proto types in integrated CADs on a basis of multiagent knowledge and bioinspired algorithms. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 6-1(56). Pp. 46–53. EDN: RPXLRL. (In Russian)
11. Kudaev A.Yu., Lezhebokov A.A., Nagoev Z.V. Virtual prototyping in integrated CADs of engineering and electronics based on the ontoneuromorphogenetic modeling. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013. No. 7(144). Pp. 29–35. EDN: QOUCHP. (In Russian)
12. Nagoev Z., Nagoeva O., Anchokov M. et al. The symbol grounding problem in the system of general artificial intelligence based on multi-agent neurocognitive architecture. *Cognitive Systems Research*. 2023. Vol. 79. Pp. 71–84. DOI: 10.1016/j.cogsys.2023.01.002
13. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research*. 2021. Vol. 66. Pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.10.015
14. Nagoev Z.V., Pshenokova I.A., Nagoeva O.V. et al. Simulation model of a neurocognitive control system for an autonomous software agent performing cooperative behavior to automatically replenish ontologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 226–234. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-226-234. (In Russian)
15. Nagoev Z.V. Ontoneuromorphogenetic modeling. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 4(54). Pp. 56–63. EDN: QZTFLN. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

вед. науч. сотр. отдела «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

zaliman@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9549-1823>, SPIN-код: 6279-5857

Нагоева Ольга Владимировна, науч. сотр. отдела «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

nagoeva_o@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2341-7960>

Information about the authors

Zalimkhan V. Nagoev, Candidate of Technical Sciences, General Director of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

2 Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia;

Leading Researcher of the Department “Multi-Agent Systems”, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

zaliman@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9549-1823>, SPIN-code: 6279-5857

Olga V. Nagoeva, Researcher of the Department “Multiagent Systems”, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

nagoeva_o@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2341-7960>