

Проблема разработки теоретических основ проектирования и прототипирования устройств и систем бионаноробототехники в киберфизических системах и средах

Р. Н. Абуталипов, А. У. Заммоев

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

Аннотация. Актуальной проблемой исследований бионаноробототехники (БНРТ) является поиск методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию объектов БНРТ. В то же время сложность переноса традиционных жестких конструкций в микро- и наномасштабный уровни ограничивает их применимость в микро- и наноробототехнике. В статье рассматривается проблема разработки теоретических основ проектирования и прототипирования бионаноробототехнических систем и конструкций в киберфизических системах и средах, решение которой необходимо для создания полноценных систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ) прикладных устройств и систем БНРТ и исследовательско-производственных комплексов БНРТ как специализированных киберфизических систем и сред. Предложена концепция модельной экспериментальной технологии проектирования и прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций (МПМК), выполнена начальная постановка задач ее создания, экспериментального исследования и разработки методических и теоретических основ САППИУ для МПМК и на их основе аналогичных перспективных систем для БНРТ.

Ключевые слова: бионаноробототехника, автоматическое проектирование, киберфизические системы и среды, мягкая робототехника, мягкая полимерная мехатронная конструкция, виртуальное прототипирование, физическое прототипирование

Поступила 02.11.2022, одобрена после рецензирования 07.11.2022, принята к публикации 15.11.2022

Для цитирования. 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. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-28-38

MSC 68W50; 92-10; 92C75

Original article

The problem of developing the theoretical foundations for the design and prototyping of devices and systems of bionanorobotics in cyber-physical systems and environments

R.N. Abutalipov, A.U. Zammoev

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

Abstract. The actual problem of research in bionanorobotics (BNRT) is the search for methods and techniques for implementing the pipeline of the material embodiment of simulation for the transition from modeling to prototyping of BNRT objects. At the same time, the difficulty of transferring traditional rigid structures to the micro- and nanoscale levels limits their applicability in micro- and nanorobotics. The article deals with the problem of research of the theoretical foundations for the design and prototyping of bionanorobotic systems and structures in cyber-physical systems and environments, the solution of which is necessary to create full-fledged systems for automatic design and prototyping with intelligent control (SADPIC) of applied devices and systems of BNRT and research and production complexes of BNRT, as specialized cyber-physical systems and environments. The concept of a model experimental technology for the design and prototyping of soft polymer mechatronic constructs (SPMC) is proposed, the initial formulation of the tasks of its creation, experimental research and development of the methodological and theoretical foundations of SADPIC for SPMC and, on their basis, similar promising systems for BNRT, is carried out.

Keywords: bionanorobotics, soft robotics, mechatronics, bioengineering systems, technology, virtual prototyping, physical prototyping, soft polymer mechatronic construct

Submitted 02.11.2022,

approved after reviewing 07.11.2022,

accepted for publication 15.11.2022

For citation. 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

Бионаноробототехника (БНРТ) – это раздел наноробототехники, рассматривающий молекулярные машины, конструкция которых основана на законах живой природы для наномасштабов (нанофазы) [1]. Основная цель БНРТ состоит в использовании биологических элементов, создающих на субклеточном уровне движение, усилие, сигнал как компонентов машин. Эти компоненты, выполняя свою биологически запрограммированную функцию, способны реагировать на симулируемые физико-химические стимулы. Технически БНРТ занимается проектированием и конструированием из биоконструктивных систем для манипуляции нанообъектами в наномасштабе, включая субклеточные структуры живых организмов.

Бионаномашинные живых организмов обладают сходством с наномехатронными системами [2], ограниченным как спецификой условий бионаносреды, так и спецификой свойств бионаносистем. Осуществление образа этого сходства для конкретной технической системы – одна из основных задач БНРТ, в которой критическое значение имеет репрезентативность [3], а для ее достижения нами предложен и развивается подход, основанный на применении специфической для БНРТ системы управления – когнитивной информационно-коммуникационной системы (КИКС) [4, 5]. Интеграция ее подсистемы сенсоров и исполнительных устройств нижнего уровня с бионаносредой технически позволяет взаимодействовать с объектами исследуемой среды и решать таким образом в условиях неопределенности задачу познавательного-целевого моделирования БНРТ.

Устройства и конструкции, детали и системы обретают единство только в процессе. Для БНРТ это технологический процесс автоматизированного молекулярного производства. Такое единство в технологическом процессе – это функциональное единство, для достижения которого требуется формулировка векторов этого процесса, разрабатываемых как когнитивная стратегия, концепция, логическая задача, граф когнитивной карты, функциональная модель и предметная база знаний.

В процессе исследований БНРТ было построено несколько таких задающих процесс векторов – комплексных стратегий [6]. Первый из них – это вектор техпроцесса, процесса автоматизированного молекулярного производства. Это базовый универсальный технологический цикл (БУТЦ) [1]. Другой вектор, другая когнитивная стратегия – это управляющая

БУТЦ КИКС [4, 5], ее базовый информационно-аналитический сервис (БИАС) [7] и функциональная модель управления базой знаний [8].

Опираясь на полученный опыт, мы вышли на новый – прикладной – вектор нашего исследования, который основан на применении методов и приемов **sim-to-real** (s2r), используемых для моделирования, проектирования и прототипирования мягких роботизированных систем [9], выбор которого обусловлен представленными ниже обстоятельствами.

Технологический прорыв последнего десятилетия в биологии органоидов, анализах «орган на чипе» и трехмерной биопечати, в результате которых стало возможным получать и дифференцировать индуцированные стволовые клетки, актуализировал задачи проектирования, сборки и производства живых систем с широким спектром потенциальных применений. Биоинженеры, биофизики и биологи добились устойчивого прогресса в создании из живых клеток и тканей мультиклеточных инженерных живых систем (M-CELS) [10], обладающих новыми функциональными возможностями, не встречающихся в естественных системах. M-CELS пригодны для серийного производства, так как могут надежным образом производиться в большом количестве.

В прототипировании мягкой робототехники и биоробототехники часто используют аддитивные технологии 3D/4D печати с применением синтетических полимерных материалов (эластомеров, гелей и т.д.) и основанных на передовых достижениях биотехнологий биоматериалов [11]. Это позволяет создавать полностью 3D-биопечатные молекулярные биомашинны с внешним управлением – **биоботов** [12].

Биоинтегрированный подход к мягкой робототехнике позволяет реализовать биологические машины с возможностью взаимодействия с окружающей средой и другими живыми системами. По мнению исследователей, мягкие роботизированные устройства на основе клеток могут оказать преобразующее воздействие в области проектирования машин и систем, которые могут динамически воспринимать и реагировать на целый ряд сложных сигналов окружающей среды [12]. Это представляет значительный прогресс в направлении высокоуровневого функционального контроля над мягкими биоробототехническими системами.

Одно из передовых достижений биоинженерии последних лет, имеющий связь с развиваемым нами подходом в создании конструкций и систем БНРТ, – это масштабируемый конвейер для прототипирования перенастраиваемых (реконфигурируемых) вычислительно разрабатываемых организмов [13]. Этот конвейер обладает сходством с БУТЦ БНРТ и может с учетом тех изменений, которые требует от БНРТ биоинтеграция, использоваться в дальнейших исследованиях, в т.ч. в разработках прикладных биомедицинских систем диагностики и адресной доставки лекарств или вмешательства, автономных биомашин, метаматериалов или биосовместимых функциональных архитектур.

Сложность конструирования молекулярных биомашин из естественных клеточных элементов как деформируемых объектов состоит в том, что из-за большого конфигурационного пространства и сложности точного моделирования поведения объекта традиционное моделирование становится очень трудоемким и требует обработки слишком большого объема данных. Методы **sim-to-real** (s2r) [9] – преобразования симуляции в реальность – дают возможность научиться моделированию с рандомизацией для последующей вещественной реализации выработанного прототипа.

Нами предложен подход к организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса [14]. В рамках этого подхода предполагается выполнение по конвейерной схеме специального производственного унифицированного технологического цикла (СПУТЦ). Данное предложение имеет ряд сходств с методами s2r в решении задачи виртуального прототипирования и материализации прототипов.

С учетом текущего состояния исследований БНРТ и влияния последних достижений биоинженерии на цели и задачи молекулярного производства в ближайшей перспективе для БНРТ актуальны следующие задачи [15]:

- исследовать методы s2g для моделирования с рандомизацией для последующей вещественной реализации выработанного прототипа;
- разработать собственную технику моделирования, проектирования и прототипирования мягких роботизированных устройств;
- оценить применимость и развить биоинтегрированный подход к мягкой робототехнике для реализации биологических машин с возможностью взаимодействия с окружающей средой и другими живыми системами;
- реализовать и исследовать биоинтеграцию КИКС для подсистемы сенсоров и исполнительных устройств нижнего уровня;
- провести поиск и исследование методов проектирования физической структуры и прогнозирования поведения молекулярных биомашин как произвольных биологических конструкций;
- разработать междисциплинарную систему интегрирования технической информации в комплексную стратегию функционального единства в техпроцессе БНРТ.

Предполагаем, что при помощи КИКС БНРТ возможно организовать процессы проектирования и исследования свойств различных классов объектов в средах физической материализации, в т.ч. с учетом масштабных факторов. В работах [1, 3–5, 14, 16–18] дана оценка возможности реализации виртуального прототипирования синтетических бионанороботов и бионаносистем как процесса эволюционной оптимизации принципиальных и технологических схем для заданных условий проектирования с использованием структурированных знаний о свойствах бионаноструктур.

С учетом перечисленных задач модернизации БНРТ возникает необходимость создания и развития технологической базы виртуального прототипирования и конструирования мультимасштабных биоинженерных систем, реализации и исследования конвейерной схемы организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса, а также детализации и комплексного развития соответствующих методов и средств в соответствии с целевой стратегией БНРТ.

В связи с вышеизложенным и в соответствии с текущим пониманием методологии проектирования и виртуального прототипирования бионанороботов и систем БНРТ с использованием интеллектуальных информационно-управляющих систем начато формирование нового прикладного направления исследований – разработки биоинтегрированных технологий мягкой робототехники, которые, помимо открытия возможностей решения одной из актуальных проблем БНРТ по поиску методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию объектов БНРТ, имеют также перспективу для решения широкого круга прикладных задач.

Успехи зарубежных исследователей в области разработки бионических и биоинженерных конструкций позволяют рассматривать существующие примеры мягкой робототехники на основе вокселей в качестве относительно простой экспериментальной модели реализации конвейерной схемы технологического цикла создания объектов БНРТ, на этапе *концептуального проектирования* которой воксельные конструкции мягкой робототехники рассматриваются как частный случай более широкого понимания данного класса мягкой робототехники, пока называемого нами **мягкая полимерная мехатронная конструкция** (МПК) [19, 20], которая состоит преимущественно из мягких полимерных материалов в композиции со встраиваемыми элементами микромеханики и микроэлектроники (такими как сенсоры, актюаторы, контроллеры и преобразователи), а также с гибкими накопителями энергии и средствами коммуникаций электрических сигналов, механических усилий, движения и давления воздуха или жидкости и т.п.

МПК как интегрированные с микроэлектронным управлением рабочие органы с гибкими звеньями проектируются для решения прикладных задач мягкой робототехники или для использования в комплексе с жесткими звеньями конструкций гибридных роботов, например, в качестве исполнительных рабочих органов, позволяющих манипулировать хрупкими объектами или объектами со сложной формой, выполнять функции демпфирования нагрузок, накопления и управления потенциальной энергией, проникновения в труднодоступные области рабочей среды, контактного взаимодействия и многие другие прикладные задачи, которые сложно или невозможно выполнить с помощью жестких конструкций мехатроники и робототехники.

Благодаря наличию обратных связей через датчики в контуре управления МПК выполняется контролируемое исполнение действий мягкой конструкции: изменение размеров и формы, перемещения, силовое взаимодействие с контактирующими или связанными объектами и поверхностями. Например, МПК, предназначенная для перемещения по твердой поверхности, благодаря управляемому воздействию исполнительных элементов на внутренние рабочие полости производит управляемые деформации конструкции, позволяющие сохранить заданное направленное движение.

Для достижения аналогичных целей с использованием жестких конструкций применяют механизмы с телами вращения или сложные многозвенники. При этом неровности опорной поверхности и небольшие препятствия могут ограничивать подвижность конструкции и даже приводить к ухудшению или невыполнению целевого поведения механизма. Придание адаптивности жесткой конструкции требует значительного усложнения его структуры и алгоритмов системы управления. МПК благодаря гибкости всей конструкции позволяет адаптировать свою подвижность без конструктивного усложнения, а благодаря целостности конструкции и отсутствию тел вращения возможна реализация герметичных устройств для работы в жидких или агрессивных средах.

Следует отметить, что жесткие конструкции по сравнению с мягкими существенно сложнее переносить в микро- и наномасштаб. Данное обстоятельство делает мягкие конструкции привлекательными для создания объектов микро- и наноробототехники. Исполнение мягких конструкций из биополимерных материалов представляет интерес для биоинженерных разработок в области биомедицинской микроробототехники и бионаноробототехники (БНРТ).

Технологическая база для экспериментальных исследований в данном направлении отличается простотой и доступностью. На данный момент выполнена разработка базовых элементов технологии прототипирования МПК, в общем виде представлена технологическая схема физического прототипирования МПК, экспериментально отработаны основные элементы технологии и получены первые пробные образцы МПК [19, 20]. У технологии имеется потенциальная возможность совершенствования, а также исключения ряда рутинных операций, применения элементов автоматизации и роботизации процессов, что позволяет существенно повысить качество и производительность прототипирования.

Таким образом, выстраивается следующая **рабочая гипотеза исследований**: возможность создания теоретических основ систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ) устройств и систем БНРТ в киберфизических системах и средах в процессе создания и исследования таких систем для МПК, которые позволяют проводить вычислительно-физические эксперименты по проектированию конструкций и элементов технологии прототипирования МПК методами моделирования и методами материального воплощения симуляции (s2r).

В соответствии с рабочей гипотезой формируются цель и задачи исследований.

Цель исследований: с учетом размерных масштабных факторов и свойств бионано-среды разработать теоретическую основу для создания САППИУ конструкций устройств и систем БНРТ в киберфизических системах и средах путем исследования процессов САППИУ МПМК, процессов проектирования архитектуры и создания прототипа исследовательско-производственного комплекса (ИПК) МПМК, реализующего САППИУ, процессов поиска и принятия решений при проектировании и прототипировании конструкций конвейерной схемы создания объектов по методам *s2r*, разработки методики проведения вычислительно-физических экспериментов по проектированию конструкций и элементов технологии конструирования и прототипирования МПМК с использованием методов эволюционного моделирования.

Основные задачи исследований:

1. Создать модельную САППИУ МПМК и технологии МПМК.
2. Провести серию вычислительно-физических экспериментов по созданию модельного ряда прототипов МПМК.
3. Исследовать модельную САППИУ МПМК, технологии МПМК и полученные прототипы МПМК.
4. Сформулировать теоретические основы САППИУ МПМК и сделать попытку применения к области проектирования и прототипирования устройств и систем БНРТ.
5. Актуализировать сведения о состоянии и перспективах БНРТ.

Первые три задачи относятся к экспериментальным исследованиям и разработкам, т.е. в большей части предполагают проведение научных исследований в процессе выполнения относительно простых опытно-конструкторских работ и инженерно-технических изысканий.

Задача создания модельной системы и технологии автоматического проектирования и прототипирования МПМК с интеллектуальным управлением предполагает:

- поиск и разработку концептов МПМК;
- разработку элементов технологии физического прототипирования;
- поиск и накопление технологической информации по типовым (элементарным/ примитивным) технологическим приемам и процессам прототипирования МПМК;
- детализацию техпроцессов прототипирования МПМК;
- анализ условий функционирования киберфизической системы ИПК МПМК;
- формулирование требований интеграции ИПК МПМК с прототипом КИКС БНРТ;
- разработку концепта архитектуры, проектирование и конструирование ИПК МПМК.

В итоге решением этой задачи можно считать выполнение пробных запусков циклов автоматического проектирования МПМК как реализацию прототипа конвейерной схемы материального воплощения симуляции методами *s2r* для МПМК.

В задачу проведения вычислительных и физических экспериментов автоматического проектирования и прототипирования МПМК входят вопросы практического рассмотрения проблем материального воплощения симуляции методами *s2r* и методами эволюционного моделирования. Для ответа на эти вопросы потребуются:

- поставить и подготовить серию вычислительно-физических экспериментов, разработав соответствующую методику;
- подготовить, развернуть и начать эксплуатировать действующий прототип CALS-системы для МПМК, с помощью которого необходимо организовать непрерывный процесс информационной поддержки всех процессов серии вычислительно-физических экспериментов МПМК;
- реализовать серию вычислительно-физических экспериментов с использованием методов эволюционного моделирования.

Решение этой задачи в результате предполагает получение действующих прототипов МПМК.

Задача исследования процессов модельных систем и технологий автоматического проектирования и прототипирования МПМК и устройств БНРТ с интеллектуальным управлением предполагает комплексное решение множества разнонаправленных исследовательских подзадач, которые сформируются и подробно будут рассматриваться в процессе исследования.

Формулирование теоретических основ автоматического проектирования и прототипирования МПМК, устройств и систем БНРТ напрямую зависит от результатов создания и экспериментального исследования модельных систем и технологий.

Параллельно с этой задачей требуется разработать комплексную стратегию поиска и принятия решений при автоматическом проектировании и прототипировании МПМК, устройств и систем БНРТ, что предполагает разработку и описание теоретических принципов и методик, представляемых для удобства практического использования в будущих разработках прототипа КИКС БНРТ, интегрированной с ИПК БНРТ.

Выводы

Актуальность исследования обусловлена недостаточностью знаний о структуре и способах организации систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ) конструкций устройств и систем БНРТ, в т.ч. методами материального воплощения симуляции (*s2r*) и эволюционного моделирования в киберфизических системах и средах, принципов и методов управления и принятия решений в процессе работы конвейерной схемы материального воплощения симуляции, необходимых для эффективного решения задач создания специализированного ИПК БНРТ, интегрированного с реальной бионаносредой для осуществления познавательного моделирования, проектирования и прототипирования конструкций устройств и систем БНРТ.

Научная проблематика исследования основана на возможности представления теории автоматического проектирования и прототипирования конструкций устройств и систем БНРТ с интеллектуальным управлением на основе исследования экспериментальных модельных систем и технологий автоматического проектирования и прототипирования МПМК для мягкой робототехники и биоробототехники.

Научная значимость исследований состоит в возможности создания предпосылок для аксиоматики теории САППИУ БНРТ, проектирования и развертывания специализированных ИПК БНРТ.

Практическая значимость исследований может быть представлена в создании ИПК МПМК и прототипа системы автоматического проектирования и прототипирования МПМК с интеллектуальным управлением, синтезирующей протоколы техпроцессов и непосредственно сами прототипы МПМК, необходимых для решения прикладных задач мягкой робототехники, а также в создании технологической базы ИПК для синтеза биоинтегрированных МПМК и устройств и систем БНРТ.

Решение поставленных задач создания и исследования САППИУ дает возможность комплексно синтезировать целевые конструкции и протоколы их прототипирования при широких конфигурационных пространствах проектирования и многофакторных ограничениях, а также позволяет развить технологическую базу мягкой робототехники, биоинтегрированной мягкой робототехники и в перспективе выйти на киберфизические среды разработки конструкций БНРТ. Хотя уровень развития науки и технологий позволяет создавать подобные системы, у разработчиков прикладных систем существует потребность в комплексном представлении знаний методов, средств и технологий, позволяющих с ограниченным временем и ресурсами создавать эффективные системы автоматического проектирования и прототипирования конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абуталипов Р. Н., Заммиев 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.
2. *Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б.* Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 1. С. 2–14. EDN KYRKR V.
3. *Абуталипов Р. Н., Заммиев А. У., Загазежева О. З.* Интеррепрезентативные сети (ИРС) и репрезентативность VR визуализации наноструктур и процессов в наносреде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4(72). С. 5–9. EDN WKDXXD.
4. *Абуталипов Р. Н., Заммиев А. У.* Доменная модель когнитивной инфокоммуникационной системы для интеллектуального медицинского онлайн-сервиса на базе бионаносенсорных устройств // Славянский форум. 2018. № 1(19). С. 104–113. EDN YWXRMT.
5. *Заммиев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск, исследование и развитие технологий бионаноробототехники для устойчивого развития горных территорий в эпоху шестого технологического уклада // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10. № 3(37). С. 447–457. DOI 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457. EDN YONK LJ.
6. *Абуталипов Р. Н., Заммиев А. У.* Достижения и перспективы бионаноробототехники на современном этапе развития науки и техники. Необходимость и возможность модернизации бионаноробототехники для молекулярного биопроизводства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 7–13. DOI 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13. EDN UPZJAA.
7. *Абуталипов Р. Н., Заммиев А. У.* Информационный сервис для системы поддержки принятия решений в процессе проектирования устройств бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2017. № 6-2(80). С. 9–12. EDN YWNDNP.
8. *Заммиев А. У.* Разработка функциональной модели аппаратной платформы для моделирования бионаносистем и их свойств при проектировании наномехатронных устройств и систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2(86). С. 165–170. EDN YZKEMH.
9. *Matas J., James S., Davison A.J.* Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation // Conference on Robot Learning, PMLR, 2018. С. 734–743.
10. *Kamm R. D. [et al].* Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems // APL bioengineering. 2018. Vol. 2. No. 4. Art. 040901. DOI 10.1063/1.5038337.
11. *Noor N. et al.* 3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts // Advanced Science. 2019. Vol. 6. No. 11. Art. 1900344. DOI 10.1002/advs.201900344.
12. *Cvetkovic C. et al.* Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. No. 28. Pp. 10125–10130. DOI 10.1073/pnas.1401577111.
13. *Kriegman S. et al.* A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859. DOI: 10.1073/pnas.1910837117.
14. *Заммиев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск методов и исследование возможностей применения современных технологий виртуального прототипирования и конструирования биоинженерных систем при проектировании бионаноустройств и систем бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 34–42. DOI 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42. EDN JNLSCR.
15. *Абуталипов Р. Н., Заммиев А. У.* Достижения и перспективы бионаноробототехники на современном этапе развития науки и техники. Необходимость и возможность модернизации бионаноробототехники для молекулярного биопроизводства // Известия Кабардино-

Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 7–13. DOI 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13. EDN UPZJAA.

16. *Заммоев А. У.* Перспективы развития методов и средств эволюционного моделирования для виртуального прототипирования бионаноробототехнических устройств и систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2(86). С. 157–164. EDN YZKELZ.

17. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Актуальные задачи бионаноробототехники в области виртуального прототипирования бионаноробототехнических устройств // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции и XI молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах», Нижний Архыз, 5–9 октября 2020 г. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2020. С. 193–200. EDN HDQFSF.

18. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Доменная модель когнитивной информационно-коммуникационной системы как основа среды виртуального прототипирования устройств и систем бионаноробототехники // Цифровая трансформация науки и образования: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, 1–4 октября 2021 г. Нальчик, 2021. С. 140–148. EDN DTKSPA.

19. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Разработка элементов технологии экспериментального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1(105). С. 12–24. DOI 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24. EDN VHTUQQ.

20. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Мягкие полимерные мехатронные конструкции для применения биоинтегрированного подхода в мягкой робототехнике и биоробототехнике // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара, п. Домбай, 4–8 апреля 2022 г. Таганрог: ИП Марук М.Р, 2022. С. 302–313.

Информация об авторах

Абуталипов Ренат Надельшаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. совместной лаборатории ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андронидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0187-563X>

Заммоев Аслан Узеврович, канд. техн. наук, зав. совместной лабораторией ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андронидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>

REFERENCES

1. 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)

2. Teryaev E.D., Filimonov N.B. Nanomechatronics: state, problems, prospects. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie* [Mechatronics, automation, control]. 2010. No. 1. Pp. 2–14. EDN: KYRKR.V. (In Russian)

3. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Zagazezheva O.Z. Interrepresentative networks (IRNs) and the representativeness of VR visualization of nanostructures and processes in the nanoenvironment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 4(72). Pp. 5–9. EDN: WKDXXD. (In Russian)
4. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Domain model of a cognitive infocommunication system for an intelligent medical online service based on bionano-sensor devices. *Slavjanskij forum* [Slavic Forum]. 2018. No. 1(19). Pp. 104–113. EDN: YWXRMT. (In Russian)
5. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search, research and development of bio-nanorobotic technologies for the sustainable development of mountain territories in the era of the sixth technological order. *Sustainable development of mountain territories*. 2018. Vol. 10. No. 3(37). Pp. 447–457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457. EDN: YOHKLJ. (In Russian)
6. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Achievements and prospects of bionanorobotics at the present stage of development of science and technology. Necessity and possibility of modernization of bionanorobotics for molecular bioproduction. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 7–13. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13. EDN: UPZJAA. (In Russian)
7. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Information service for a decision support system in the process of designing devices for bionanorobotics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2017. No. 6-2(80). Pp. 9–12. EDN: YWNDNP. (In Russian)
8. Zammoev A.U. Development of a functional model of a hardware platform for modeling bionanosystems and their properties in the design of nanomechatronic devices and systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2018. No. 6-2(86). Pp. 165–170. EDN: YZKEMH. (In Russian)
9. Matas J., James S., Davison A.J. Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation. *Conference on Robot Learning, PMLR*, 2018. C. 734–743.
10. Kamm R.D. et al. Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems. *APL bioengineering*. 2018. Vol. 2. No. 4. Art. 040901. DOI: 10.1063/1.5038337.
11. Noor N. et al. 3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts // *Advanced Science*. 2019. Vol. 6. No. 11. Art. 1900344. DOI: 10.1002/advs.201900344.
12. Cvetkovic C. et al. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. No. 28. Pp. 10125–10130. DOI: 10.1073/pnas.1401577111.
13. Kriegman S. et al. A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859. DOI: 10.1073/pnas.1910837117.
14. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search for methods and study of the possibilities of using modern technologies of virtual prototyping and designing bioengineering systems in the design of bionanodevices and systems of bionanorobotics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 34–42. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42. EDN: JNLSCR. (In Russian)
15. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Achievements and prospects of bionanorobotics at the present stage of development of science and technology. Necessity and possibility of modernization of bionanorobotics for molecular bioproduction. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 7–13. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13. EDN: UPZJAA. (In Russian)
16. Zammoev A.U. Prospects for the development of methods and means of evolutionary modeling for virtual prototyping of bionanorobotic devices and systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2018. No. 6–2(86). Pp. 157–164. EDN: YZKELZ. (In Russian)

17. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Actual tasks of bionanorobotics in the field of virtual prototyping of bionanodevices. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija* [Perspective systems and control tasks]: *Materialy XV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii i XI molodezhnoj shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informacii v tehniceskikh sistemah»*. Nizhny Arkhyz, 05–09 october, 2020. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2020. Pp. 193–200. EDN: HDQFSF. (In Russian)
18. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Domain model of a cognitive information and communication system as the basis for the environment for virtual prototyping of devices and systems of bionanorobotics. *Cifrovaja transformacija nauki i obrazovanija* [Digital transformation of science and education]: *Sbornik nauchnyh trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*, 01–04 october, 2021. Nalchik, 2021. Pp. 140–148. EDN: DTKSPA. (In Russian)
19. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Development of technology elements for experimental prototyping of soft polymeric mechatronic structures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 1(105). Pp. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24. EDN: VHTUQQ. (In Russian)
20. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Soft polymer mechatronic structures for the application of a biointegrated approach in soft robotics and biorobotics. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija* [Perspective systems and control tasks]: Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference and the XIII Youth School-Seminar, Dombai, April 04–08, 2022. Taganrog: IP Maruk M.R., 2022. Pp. 302–313. (In Russian)

Information about the authors

Abutalipov Renat Nadelshaevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the joint Laboratory of IIPRU KBSC RAS and NPO “Android Technique” “Bionanorobotics”, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0187-563X>

Zammoev Aslan Uzeirovich, Candidate of Technical Sciences, Head of joint laboratory of IIPRU KBSC RAS and NPO “Android Technique” “Bionanorobotics”, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>