

Поиск теоретических подходов для исследования киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением

Р. Н. Абуталипов, А. У. Заммоев✉, Г. В. Чернышев

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

Аннотация. В рамках исследований бионаноробототехники актуальной является разработка методологических подходов, интегрирующих междисциплинарные знания. С этой целью предложена архитектурная модель когнитивной инфокоммуникационной системы (КИКС), основанной на принципах доменного моделирования. В работе анализируются возможности применения теории категорий и интуиционистской логики для формализованного описания и предсказания характеристик биointегрированных киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением. Предложен метод представления топологической структуры КИКС посредством концепции «предпучка». Для повышения точности и эффективности моделирования рекомендовано использование современных инструментальных средств, таких как гомотопическая теория типов, помощники по доказательству теорем, языки функционального и логического программирования, дискретно-событийные имитационные модели.

Ключевые слова: бионаноробототехника, мягкая робототехника, многоклеточные инженерные живые системы, теория категорий, интуиционистская логика, предпучок, интеллектуальное управление, когнитивная инфокоммуникационная система, киберфизические системы и среды, проектирование

Поступила 03.11.2024, одобрена после рецензирования 26.11.2024, принята к публикации 03.12.2024

Для цитирования. Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Чернышев Г. В. Поиск теоретических подходов для исследования киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 26–44. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-26-44

MSC: 68W50; 93B51

Original article

Search for theoretical approaches to the study of cyber-physical systems and environments with intelligent control

R.N. Abutalipov, A.U. Zammoev✉, G.V. Chernyshev

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. In the context of bionanorobotics research it is important to develop methodological approaches that integrate interdisciplinary knowledge. For this purpose an architectural model of a cognitive infocommunication system (CICS) based on the principles of domain modeling is proposed. The paper analyzes the possibilities of applying category theory and intuitionistic logic for formalized description and prediction of characteristics of biointegrated cyber-physical systems and environments

with intelligent control. A method for representing the topological structure of CICS using the concept of a «presheaf» is proposed. To improve the accuracy and efficiency of modeling it is recommended to use modern tools such as homotopy type theory, theorem proving assistants, functional and logical programming languages, and discrete-event simulation models.

Keywords: bionanorobotics, soft robotics, multicells engineering living systems, category theory, intuitionistic logic, presheaf, intelligent control, cognitive infocommunication system, cyber-physical systems and environments, design

Submitted 03.11.2024,

approved after reviewing 26.11.2024,

accepted for publication 03.12.2024

For citation. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Chernyshev G.V. Search for theoretical approaches to the study of cyber-physical systems and environments with intelligent control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 26–44. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-26-44

ВВЕДЕНИЕ

Бионаноробототехника (БНРТ) – это раздел наноробототехники, который изучает принципы движений, закономерности функционирования и конструкцию молекулярных машин, существующих в живой природе. Цель БНРТ – использовать биологические элементы для проектирования и конструирования мехатронных систем для манипуляции нанообъектами, включая субклеточные структуры живых организмов [1–4].

БНРТ рассматривает молекулярные машины, конструкция которых основана на законах живой природы для наномасштабов (нанофазы). Основные компоненты таких машин включают белки и ДНК, которые могут действовать как двигатели, механические сочленения и шестерни, триггеры и датчики. Соединяя разнообразные биоконпоненты наноразмеров, можно построить наноустройства с определенным числом степеней свободы, которые позволяют манипулировать нанообъектами [1].

Основные проблемы и задачи БНРТ [1–4]:

1. *Исследование природных нанороботов:* изучение элементов живых клеток, которые могут служить прототипами для создания бионанороботов.
2. *Создание бионаносенсоров:* разработка устройств для исследования биосистем, включая медицинскую диагностику.
3. *Проектирование и моделирование молекулярных и наноструктур:* разработка структур, обладающих свойствами нанороботов.
4. *Проектирование бионанороботов:* создание устройств для наномедицины, исследования космоса, электроники, экологии и сельского хозяйства.

Задачи исследований в БНРТ можно представить как систему оптимизации проектирования нанотехнологий, наноустройств и наноматериалов. Это включает использование управляемого экспертной системой аппаратно-программного комплекса с обратной связью для имитации известных свойств и процессов наномира [1–5]. БНРТ открывает широкие возможности для автоматизации молекулярного производства, биоинтегрированных технологий, мягкой робототехники и многоклеточных инженерных живых систем [6–12]. Для реализации этих возможностей необходимо дальнейшее развитие и модернизация в целях достижения более высокого уровня автоматизации и интеллектуального управления.

Продолжение исследований в сфере БНРТ не только включает обработку существующих данных и результатов, но также предполагает интеграцию новых информационных массивов [7]. Данный процесс требует систематической организации и консолидации данных для последующего аналитического исследования. Для дальнейшего исследования БНРТ нужно создать методологические и технологические подходы, со-

ответствующие стандартам междисциплинарного научного поиска, для систематической организации и анализа данных.

Интеграция в науке затруднена из-за отсутствия общей системы интерпретации терминов и сложности согласования знаний между специалистами. Интеграция различных научных дисциплин сталкивается с серьезными трудностями, вызванными отсутствием единой системы интерпретации как терминов, так и критериев оценки результатов в контексте междисциплинарных исследований. Процесс формулирования комплексных исследовательских задач зачастую сопряжен с рядом проблем, таких как сложности в достижении согласованности между различными структурами знаний, необходимость учета рекурсивных связей между объектами исследования, а также вопросы коммуникации между специалистами разных областей науки. Это требует постоянного мониторинга текущих достижений и регулярного пересмотра методологических подходов, чтобы обеспечить успешное достижение поставленных целей.

Для успешной интеграции технологий и оптимизации координационных процессов необходимо обеспечение междисциплинарного взаимодействия посредством применения междисциплинарных конструктов, способствующих трансферу схем исследований между различными научными направлениями. Междисциплинарные конструкты характеризуются сложной структурой, включающей свойства замкнутости, нелинейности и цикличности, что требует применения рекурсивных, коммуникативных и структурно сопряженных методов для их адекватного функционирования. Эффективное использование таких конструктов возможно при условии разработки инструментов междисциплинарной коммуникации, таких как трансдисциплинарный метаязык [5, 13].

Весьма перспективным видится использование для этого информационных структур, характеризующихся регулярностями различного рода. В частности, возможно использовать обогащенные иерархические информационные структуры, позволяющие моделировать произвольные графовые зависимости, свойственные объектам БНРТ, и которые можно представлять в реализациях прикладных информационно-управляющих систем посредством информационного инструментария представления знаний, базирующегося на иерархических структурах, типизация которых основана на использовании теоретико-категорного подхода [14–16].

В дополнение к этому целесообразно использование так называемых помощников по доказательству теорем [17, 18] – программных систем, ориентированных на проверку корректности свойств компонент, создаваемых и используемых в теоретико-категорных рамках.

Для эффективного выполнения междисциплинарных исследований в области био- и наноинженерии требуется разработка специализированных методологических и технологических подходов, что предполагает интенсификацию междисциплинарного взаимодействия с целью интеграции знаний и методов различных научных дисциплин.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Теория категорий – это раздел математики, изучающий свойства отношений между математическими объектами, не зависящие от их внутренней структуры. Она была создана Саундерсом Маклейном и Самуэлем Эйленбергом. Моментом рождения теории категорий считается появление статьи [19].

Любая категория [20] содержит совокупность объектов и для каждой упорядоченной пары объектов множество морфизмов – отображений от исходного объекта к целевому объекту, а также для каждой тройки объектов – ассоциативный оператор композиции, связывающий эти объекты соответствующими морфизмами и левый и правый элементы (единичные морфизмы или единицы) для каждого объекта.

Основные свойства и определения [20, 21]:

- *Изоморфизм* – это морфизм, для которого существует обратный морфизм, сохраняющий структуру объектов.
- *Эндоморфизм* – это морфизм, действующий на один и тот же объект.
- *Аutomорфизм* – это эндоморфизм, являющийся изоморфизмом.
- *Произведение объектов*: прямое произведение объектов A и B , которое является новым объектом $A \times B$ с морфизмами $p_1: A \times B \rightarrow A$ и $p_2: A \times B \rightarrow B$.

Поскольку теория категорий находится в развитии, ее функции соответственно развиваются, расширяются и умножаются. Это мощный язык или концептуальная структура, позволяющая анализировать универсальные компоненты семейства структур данного вида и то, как структуры разных видов взаимосвязаны. Ее можно применять к изучению логических систем, и в этом случае теория категорий называется «категорными доктринами» на синтаксическом, теоретико-доказательном и семантическом уровнях [21].

Теория категорий предоставляет мощный инструмент для описания и анализа сложных структур и отношений в различных областях науки. Вот несколько ключевых аспектов, подтверждающих допустимость и необходимость ее использования.

Допустимость:

1. *Абстракция и универсальность*: теория категорий оперирует типами, которые соответствуют человеческой логике, такими как базовые объекты, произведения, суммы, функциональные типы и другие. Эти типы определены универсально и однозначно с точностью до изоморфизма, что делает их применимыми в различных контекстах.

2. *Логическая основа*: категории соответствуют интуиционистской логике, что делает их логическую структуру надежной и понятной для исследователей. Это позволяет использовать теорию категорий для моделирования и анализа сложных логических систем.

3. *Гибкость и многомерность*: теория категорий позволяет описывать объекты и связи между ними в специфическом когерентном стиле, что делает ее подходящей для моделирования многомерных и иерархических структур.

Необходимость:

1. *Развитие фундаментальных понятий*: в информационных науках теория категорий может использоваться для разработки фундаментальных понятий теории информации в более широком и гибком контексте, что позволяет выражать многомерные аспекты информационных процессов.

2. *Применение в нейросетевых теориях*: операды и тензорные категории могут быть полезны для управления конфигурациями, композицией и отношениями между нейросетями, что способствует более глубокому пониманию и развитию этих технологий.

3. *Однозначное представление знаний*: категорные понятия могут быть использованы для точного и краткого выражения сути явлений без переизбыточности, что важно в теории искусственного интеллекта и других областях, где требуется однозначное и моносемантическое представление знаний.

Примеры использования:

- *Алгебраическая топология и гомологическая алгебра*: изначально теория категорий была создана для нужд этих областей, что подчеркивает ее применимость в фундаментальных математических исследованиях.

- *Теория топосов и мотивов*: Александр Гротендик перенес теорию категорий в алгебраическую геометрию, что способствовало значительному развитию этих областей.

- *Логические системы*: теория категорий позволяет моделировать и анализировать сложные логические системы, что делает ее полезной в различных областях науки.

Таким образом, теория категорий является допустимым и необходимым инструментом для научных исследований благодаря своей универсальности, логической основе и гибкости в описании сложных структур и отношений.

Ряд практических примеров использования теоретико-категорного подхода в различных прикладных областях, таких как электрические цепи, теория управления, каскадные сбои, информационная интеграция и гибридные системы, представлен в работе [22].

Наряду с этим известны также примеры работ из различных областей приложений, в которых авторы совместно с теоретико-категорным подходом используют методы интуиционистской логики [23–29].

В работах [30–32] для разработки математических методов, позволяющих строго описывать и исследовать процедуры проектирования гетерогенных киберфизических систем на основе цифровых двойников, использован аппарат теории категорий. Так, например, введенная новая конструкция категории мультизапятой, где объекты описывают архитектуры систем с заданной структурной иерархией, а морфизмы – действия по подбору составных частей, позволила формализовать и автоматизировать процедуры проектирования рассматриваемых систем, например, роботизированных производственных линий.

Но, тем не менее, использование теории категорий связано с учетом и преодолением ряда особенностей, которые препятствуют более успешному ее приложению к сложным и большим предметным областям, к которым относится и область БНРТ.

Помимо проблем, связанных с большой терминологической емкостью, недостаточным количеством значимых для прикладных аспектов аналитических средств, реализация «категорных» прототипов даже относительно простых объектов сталкивается с проблемой больших информационных затрат (при описании объектов, морфизмов, функторов, естественных преобразований и т.п.).

С целью попытки преодоления подобных проблем предлагается исследовать возможность применения многоаспектных теорий. К последним можно отнести гомотопическую теорию типов, которая основана на связи между алгебраической топологией, теорией гомотопий, теорией высших категорий и теорией типов.

В рамках теоретико-типологических исследований различные интерпретации типов обеспечивают возможность выявления как интуиционистских, так и вычислительных аспектов рассматриваемой системы. Это открывает перспективы применения теоретического анализа к изучению широкого спектра структурированных объектов, включая такие сложные конструкции, как гомотопические теории. Применение пучков для описания типов помогает понять логику в интуиционистской парадигме, которая основана на конструктивных доказательствах и вычислительных методах. Применение отношений частичной эквивалентности (*partial equivalence relations*) для формализации типовых структур позволяет глубже осмыслить механизмы функционирования логических систем в вычислительном контексте, что имеет особое значение в рамках теории типов и парадигмы функционального программирования.

Ключевой идеей гомотопической интерпретации является то, что логическое понятие тождества $a = b$ двух объектов $a, b: A$, одного и того же типа A можно понимать как существование пути p от точки a до точки b в пространстве A . Это также означает, что две функции $f, g: A \rightarrow B$ можно отождествить, если они гомотопны, поскольку гомотопия является просто (непрерывным) семейством путей p_x в B для любого $x: A$.

В теории категорий играет важную роль предпучок, предоставляющий мощный инструмент для исследования и анализа сложных топологических и алгебраических структур [33].

Преимущества использования предпучков:

- *Наглядность*: позволяет легко визуализировать сложные взаимосвязи между объектами и морфизмами.
- *Анализ*: помогает выявлять и анализировать скрытые структуры и зависимости.
- *Универсальность*: может применяться в различных областях математики и информатики.

Таким образом, предпучок в теории категорий – это мощный инструмент для исследования и анализа сложных топологических и алгебраических структур. Он обеспечивает наглядность и удобство в работе с абстрактными категориями и топосами.

Предпучок в контексте БНРТ представляет собой математическую конструкцию, которая описывает структуру и поведение сложных биологических и нанотехнологических систем. В своих исследованиях мы, оставаясь в пределах области определений БНРТ, представленных в [1, 2, 4, 10], и в рамках основных тезисов, описывающих модель когнитивной инфокоммуникационной системы (КИКС) БНРТ, представленных в [3, 4, 9, 11], намерены исходить из предположения о том, что исходя из [33–39] можно сформулировать основные аспекты определения предпучка для БНРТ в следующей форме:

1. *Топологическое пространство:*

- предпучок определяется на топологическом пространстве, которое может изменяться и адаптироваться в процессе функционирования системы;
- это позволяет учитывать динамические изменения в топологии и структуре системы.

2. *Структуры данных и операции:*

- предпучок включает в себя структуры данных и операции, которые стабильны относительно перестроек топологии;
- это обеспечивает устойчивость и предсказуемость системы, несмотря на изменения в ее структуре.

3. *Логическое исчисление:*

- логическое исчисление предпучка определяет способы слипания и склеивания точек пространственного континуума;
- это позволяет создавать устойчивые структуры и операции, необходимые для эффективного функционирования нанороботов и их интеграции в биологические системы.

Таким образом, предпучок в БНРТ может стать математической структурой, которая открывает возможность описывать и моделировать сложные биологические и нанотехнологические системы, обеспечивая их стабильность и предсказуемость в условиях динамических изменений.

Понятие «предпучок» в контексте КИКС в БНРТ [3, 4, 9] можно определить следующим образом:

Предпучок – это структурированный информационный процесс, который обрабатывается в доменах КИКС и содержит биологические, технологические, иные данные, интегрируемые и анализируемые для достижения целей БНРТ, обеспечивая более точные и обоснованные решения.

Структурированный информационный процесс – это организованный и упорядоченный подход к обработке информации, который включает в себя несколько ключевых этапов:

1. *Сбор информации:*

- определение источников данных;
- получение данных из различных источников.

2. *Анализ информации:*

- проверка данных на достоверность и полноту;
- выделение ключевых элементов и фактов.

3. *Систематизация информации:*

- группировка данных по определенным признакам;
- создание логических связей между группами.

4. *Хранение информации:*

- выбор и использование подходящих носителей;

- организация хранения данных для быстрого доступа.
5. *Обработка информации:*
- выполнение необходимых преобразований данных;
 - применение алгоритмов и методов для анализа и интерпретации данных.
6. *Передача информации:*
- обмен данными между различными устройствами или людьми;
 - использование соответствующих каналов связи.
7. *Представление информации:*
- визуализация данных в удобной для восприятия форме;
 - использование графиков, диаграмм, таблиц и других инструментов.
8. *Использование информации:*
- принятие решений на основе обработанных данных;
 - применение информации для достижения поставленных целей.

Эти этапы помогают организовать и упростить работу с информацией, что особенно важно в условиях большого объема данных и сложных задач.

Преимущества использования понятия «*предпучок*» в контексте КИКС:

1. *Интеграция данных:*

- предпучок позволит интегрировать данные из различных доменов и уровней системы, обеспечивая комплексное представление информации.

2. *Эффективность передачи данных:*

- использование предпучков позволит оптимизировать передачу данных, минимизируя потери и задержки.

3. *Интеллектуальное управление:*

- в когнитивном домене предпучки данных могут быть использованы для анализа ситуаций и принятия решений в реальном времени.

Применение понятия «*предпучок*» в контексте КИКС в БНРТ позволит эффективно интегрировать и обрабатывать информацию из различных доменов для повышения эффективности передачи данных, оптимизации управления и улучшения качества принимаемых решений.

«**Предпучок**» в контексте КИКС БНРТ представляет собой математическую структуру, которая позволяет анализировать и моделировать информационные процессы, происходящие в системе. Применение предпучка может открыть возможность описания и управления сложными взаимодействиями между различными компонентами системы, такими как биологические наноструктуры, информационные модели и интеллектуальные агенты. Использование этой структуры дает возможность эффективно моделировать и управлять взаимодействиями между различными компонентами системы, что критически важно для успешного применения нанотехнологий в медицине и экологии.

С развитием математической науки все более широким становилось применение математики в технике и соответственно в технических дисциплинах, развитие которых предъявляло все более и более высокие требования к трактовке теории множеств. В итоге это привело к появлению такого востребованного в компьютерных науках направления современной математики, как интуиционизм.

Интуиционизм был начат Л. Э. Я. Бауэром [40] и развит А. Гейтингом [41], а затем интерпретирован А. Н. Коломогоровым [42, 43] в независимое представление, ставшее основой исчисления задач Колмогорова. Впоследствии интуиционистская логика была использована А. А. Марковым для конструктивной математики [44].

В настоящее время интуиционисты создали свою логику, арифметику (теория чисел), теорию типов, теорию множеств, анализ [45].

Главные особенности интуиционизма: замена равенства эквивалентностью, слабый закон исключенного третьего (отрицание отрицания), рассмотрение в качестве объектов, основанных на умственных построениях утверждений (пропозиций) [46].

Вследствие необходимости подбора свойств в процессе прототипирования для БНРТ в интуиционизме привлекательна возможность построения в аксиоматике исчисления задач Колмогорова логических выражений и конструкций, основанных на пропозициях и с эквивалентностью вместо равенства.

Структура предметной области БНРТ может быть концептуализирована как многоуровневая когнитивная инфокоммуникационная система (КИКС) БНРТ, представляющая собой сложную сеть взаимодействий между различными уровнями организации. Данная система, разработанная нашим научным коллективом, служит платформой для выполнения широкого спектра экспериментальных исследований и симуляций поведения разнообразных типов бионаноструктур, охватывающих как природные, так и полусинтетические, а также полностью искусственно созданные системы. Помимо этого, КИКС БНРТ находит активное применение в процессе разработки как виртуальных, так и физических прототипов синтетических и полусинтетических бионанотехнологических систем и их отдельных компонентов.

Формирование базы знаний для БНРТ требует интеграции данных из разных наук, соответствующих системным представлениям БНРТ и КИКС.

«Сигнал – это изменяющаяся во времени физическая величина, описываемая функцией времени. Один из параметров этой функции содержит информацию о другой физической величине. Такой параметр сигнала (функции) называют информативным, а физическую величину, которой представлен сигнал, – носителем сигнала (несущей сигнала); сигнал имеет размерность этой величины» [47].

КИКС состоит из физической, информационной и когнитивной части, где физическая часть – это энергообеспечение и технические системы переноса информации от источника к потребителю; информационная – данные, знания, методы; когнитивная производит интеллектуальную деятельность по анализу ситуаций, оценке и принятию решений, а все эти части действуют на макро-, микро- и наноуровнях [3, 4, 8].

Рассмотрим сущность «сигнала» в рамках представлений о КИКС БНРТ.

Сигнал в КИКС существует во всех процессах:

- восприятие явлений и процессов внешней среды: наблюдение за внешней средой и получение сообщений из внешней среды;
- передача информации между элементами системы и внутри ее подсистем;
- воздействие на объекты и процессы внешней среды: изменение состояния объектов внешней среды и передача сообщений во внешнюю среду.

Внешней средой по отношению, КИКС БНРТ главным образом является бионаносреда, при взаимодействии с которой выполняется процесс познавательного моделирования, позволяющий строить представления о ее структуре, закономерностях, а также производить целенаправленный поиск решений прикладных задач БНРТ [2–4].

КИКС посредством сенсоров интерфейсной подсистемы наблюдает за явлениями и процессами во внешней среде, в т.ч. воспринимая управляющие сигналы от внешних источников информации. Далее посредством телекоммуникационной и информационно-управляющих подсистем информация преобразуется в множество сигналов системы, которые передают полученные и обработанные сведения в соответствующие прикладные подсистемы [3, 4, 8].

Таким же образом информация от прикладных подсистем КИКС передается к эффекторам интерфейсной подсистемы, с помощью которой КИКС оказывает воздействие на объекты и процессы внешней среды.

Передача информации между элементами КИКС осуществляется посредством сигналов. При этом форма и содержание сигнала задаются теми процессами, которые выполняются генерирующими их подсистемами:

- интерфейсной подсистемой;
- телекоммуникационной подсистемой;
- информационно-управляющей подсистемой.

Каждая указанная подсистема также включает в себя прикладные подсистемы нижнего уровня, которые функционально аналогичны им и в которых элементы информационно связаны посредством сигналов.

Доменное разделение элементов КИКС на части выполнено по признакам и свойствам, раскрывающим их основную сущность: материальность (свойства форм материи и энергии), информационность (свойства форм представления информации), когнитивность (свойства форм преобразования информации) [3–5, 8].

Рассмотрим теперь сущность сигнала в зависимости от доменной принадлежности элементов подсистем.

Физический домен

Для передачи сигнала физически требуются:

- эффлектор – физический преобразователь сообщения источника информации в воздействие на физическую среду;
- канал связи – физическая среда, в которой под действием эффлектора может изменяться определенная физическая величина в пространстве или времени, сохраняющая достаточный уровень изменений для восприятия сенсором в заданном местоположении и заданный момент времени;
- сенсор – физический преобразователь изменений физической величины среды канала связи в пространстве или времени в сообщение потребителю информации.

Физическая сущность эффлектора проявляется в том, что в соответствии с представлением сообщения в первичном сигнале от источника информации, поступающего на вход эффлектора, выполняется преобразование/изменение форм материи и энергии физической среды, характеризующее изменение заданной физической величины в пространстве или времени.

Физическая сущность сенсора представляет обратный процесс, заключающийся в том, что им воспринимаются изменения заданной физической величины окружающей среды или среды канала связи в пространстве или времени, преобразуемые в выходной сигнал, воспринимаемый потребителем информации. Особенностью сенсора является то, что его выходной сигнал может и не содержать сообщение от источника информации.

Физическая сущность канала связи заключается в том, что изменения физической величины среды в пространстве и времени, созданные эффлектором, могут быть восприняты сенсором.

Таким образом, эффлекторы, сенсоры и канал связи, с точки зрения передачи информации посредством сигналов, выступают в качестве физических преобразователей в пространстве или времени одних форм материи и энергии в другие формы материи и энергии, отражающих в изменениях физических величин содержание передаваемых сообщений.

Интерфейсная подсистема (ИП) КИКС включает в себя:

- сенсоры восприятия состояния физических величин внешней среды;
- эффлекторы для физического воздействия на внешнюю среду;
- интерфейсы, включающие в себя специализированные эффлекторы и сенсоры для информационного обмена с объектами внешней среды: внешними источниками и приемниками информации.

Сигналы в интерфейсной подсистеме существуют в технических устройствах сенсоров, эффекторов и интерфейсов во внутренних каналах связи между их элементами.

Телекоммуникационная подсистема (ТКП) включает в себя ресурсы сети связи, транспортную сеть, сеть коммутации, представляющие собой совокупность технических устройств прикладных подсистем узлов связи и технических устройств интерфейсов с устройствами информационно-управляющей и интерфейсной подсистем и совокупность линий каналов связи, представляющих физическую среду передачи сообщений. Сигналы в телекоммуникационной подсистеме существуют в каналах связи и внутри технических устройств прикладных подсистем узлов связи между элементами устройств.

Информационно-управляющая подсистема (ИУП) включает в себя серверы, накопители данных, носители информации, представляющие собой совокупность вычислительных устройств прикладных подсистем для приема, обработки, хранения и передачи информации. Сигналы в информационно-управляющей подсистеме существуют в каналах связи между элементами вычислительных и информационно-накопительных устройств.

Информационный домен

Сигналы подсистем верхнего уровня КИКС (интерфейсная, телекоммуникационная и информационно-управляющая подсистемы КИКС) несут информацию следующего содержания:

- сведения, получаемые от внешних источников информации;
- сведения, передаваемые внешним потребителям информации;
- сведения о состоянии физических величин внешней среды;
- сведения о заданных эффекторам параметрах воздействий на внешнюю среду;
- сведения о структуре и состоянии элементов подсистем (активность, настройка элементов и параметров связи элементов и т.п.);
- сведения для управления подсистемами (команды, параметры команд, включение/выключение элементов, настройка, изменение параметров связи элементов (схем) и т.п.);
- сведения, передаваемые потребителям информации в прикладных подсистемах и подсистемах нижнего уровня;
- сведения, передаваемые от источников информации из прикладных подсистем и подсистем нижнего уровня.

Таким образом, сигналы с входными сообщениями трансформируются/преобразуются в сигналы внутренних сообщений КИКС, которые распределяются в зависимости от своего назначения и содержания, сохраняются, повторно используются, преобразуются и передаются потребителям информации.

Когнитивный домен

Сигналы подсистем верхнего уровня КИКС несут сведения, на основании которых выполняются следующие управляющие функции анализа данных и принятия решений по управлению подсистемами КИКС:

- анализ воспринимаемых сигналов внешней среды;
- извлечение и анализ сообщений источников информации, в т.ч. пользователей;
- принятие решений и формирование сигналов управления пользовательскими подсистемами и устройствами, в т.ч. роботами;
- анализ данных, принятие решений и формирование сигналов по управлению телекоммуникационной, информационно-управляющей и интерфейсной подсистемами;
- поиск, анализ, принятие решений и формирование сигналов управления в прикладных подсистемах нижнего уровня.

Морфизмы сигнала в КИКС

Все сигналы КИКС связывают внешние источники и потребителей информации с внутренними преобразователями информации, которые в зависимости от своих свойств и принципов функционирования, законов, правил и т.п. по входным сообщениям формируют выходные сообщения и сигналы, в т.ч. направленные к внешним потребителям информации, включая эффекторы, воздействующие на внешнюю среду.

Преобразования сигналов в КИКС во всех ее подсистемах и на всех уровнях представляют собой морфизмы – стрелки.

Сигналы в КИКС распространяются по перечисленным выше подсистемам следующим образом: «сигнал из внешней среды → сигнал сенсора ИП → сигнал ТКП в ИУП → сигнал ИУП в ТКП → сигнал эффектору ИП → сигнал во внешнюю среду» (рис. 1).

При этом множество «сигналы сенсоров ИП» образовано группами «сигнал сенсора ИП» по всей КИКС.

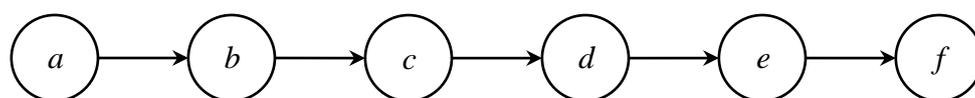


Рис. 1. Преобразования сигналов в КИКС:

a – сигнал из внешней среды, *b* – сигнал сенсора ИП, *c* – сигнал ТКП в ИУП,
d – сигнал ИУП в ТКП, *e* – сигнал эффектору ИП, *f* – сигнал во внешнюю среду

Fig. 1. Signal transformations in the cognitive infocommunication system (CICS):

a – signal from the external environment, *b* – signal from the sensor of interface subsystem (IS),
c – signal from the telecommunications subsystem (TCS) to information and control subsystem (ICS),
d – signal from ICS to TCS, *e* – signal to the effector of IS,
f – signal to the external environment

Для КИКС расслоение как топологическое пространство (рис. 2) включает топологические пространства (ТП):

- «сигналы из внешней среды»;
- «сигналы сенсоров ИП»;
- «сигналы ТКП в ИУП»;
- «сигналы ИУП в ТКП»;
- «сигналы эффектору ИП»;
- «сигналы во внешнюю среду».

Между ТП «сигналы внешней среды», «сигналы сенсоров ИП», «сигналы ТКП в ИУП» и так далее можно указать отношение, потому что их свойства коммутативны, что выражается следующим:

- 1) «сигнал из внешней среды» преобразуется сенсором ИП в «сигнал сенсора ИП»;
- 2) «сигнал сенсора ИП» преобразуется ТКП в «сигнал ТКП в ИУП»;
- 3) «сигнал из внешней среды» и «сигнал ТКП в ИУП» коммутативны через «сигнал сенсора ИП».

Можно построить «декартов» квадрат, в котором есть стрелки от «сигнал из внешней среды» к «сигнал сенсора ИП» и затем от «сигнал сенсора ИП» к «сигнал ТКП в ИУП», что и дает морфизм.

Теперь рассмотрим образование ТП как множества.

«Сигнал из внешней среды» образует топологическое пространство группой свойств сигналов внешней среды КИКС. Все сигналы из внешней среды КИКС обладают общими свойствами: вид физического свойства, количественная мера физического свойства, момент времени измерения, пространственное расположение точки измерения и т.д.

Каждое из этих свойств можно представить отдельной точкой, например: точка А – это вид физического свойства, точка В – это количественная мера физического свойства и точка В – это момент времени измерения. Через три точки можно провести плоскость, которая и есть ТП «сигнал из внешней среды».

Также образованы и другие ТП КИКС: «сигнал сенсора ИП», «сигнал ТКП в ИУП» и т.д.

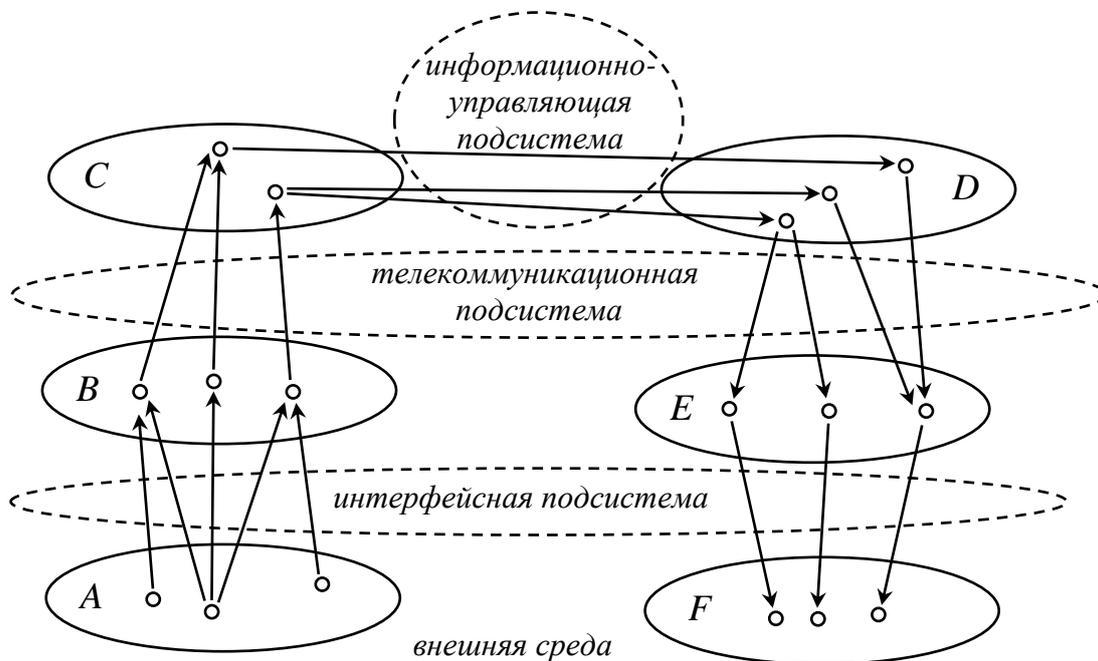


Рис. 2. *Расслоение топологического пространства КИКС:*
 А – ТП сигналов из внешней среды, В – ТП сигналов сенсоров ИП,
 С – ТП сигналов ТКП в ИУП, D – ТП сигналов ИУП в ТКП,
 E – ТП сигналов эффекторам ИП, F – ТП сигналов во внешнюю среду

Fig. 2. *Topological space (TS) bundle of the CICS:*
 A – TS of signals from the external environment, B – TS of signals from IS sensors,
 C – TS of signals from TCS to ICS, D – TS of signals from ICS to TCS,
 E – TS of signals to IS effectors, F – TS of signals to the external environment

Предпучок КИКС

Рассмотрим теперь морфизмы:

«сигнал из внешней среды → сигнал сенсора ИП»;

«сигнал сенсора ИП → сигнал ТКП в ИУП»;

«сигнал ТКП в ИУП → сигнал ИУП в ТКП»;

«сигнал ИУП в ТКП → сигнал эффектору ИП»;

«сигнал эффектору ИП → сигнал во внешнюю среду».

Морфизмы тоже образуют ТП «Морфизмы КИКС», отличие которых в том, что для каждого морфизма есть свое ТП. Следовательно, морфизмы соединяют все ТП расслоения КИКС таким образом, что из ТП морфизмов можно получить доступ к свойствам каждого элемента каждого ТП расслоения, что делает ТП морфизмов предпучком КИКС.

Представленное выше аксиоматическое задание морфизма описательной конструкцией допустимо для интуиционизма [41]. Р. Голдблатт в главе 4 книги по теории топосов в разделе «Пучки» определяет пучок как расслоение, обладающее дополнительной топологической структурой [36]. А. Гротендик в своей работе по теории пучков [34]

использует аналогичный подход к определению термина «предпучок» по отношению к ТП. Поэтому и мы тоже можем использовать в рамках и в пределах интуиционистской логики такое же представление о предпучке.

Выводы

Архитектура доменной области КИКС представляет собой многослойную систему, анализируемую посредством междисциплинарных методов и стандартизированной экспериментально-моделирующей платформы, что критически важно для исследования и прототипирования устройств и систем БНРТ. В связи со сложностью рассматриваемой области необходимо использовать широкий спектр имеющихся инструментальных средств, в частности, гомотопической теории типов, помощников по доказательству теорем, языков функционального и логического программирования, дискретно-событийных имитационных моделей.

Применение в исследованиях области БНРТ теоретико-категорного подхода и методов интуиционистской логики открывает возможности развития теоретических основ формализации и оптимизации биоинтегрированных киберфизических систем и сред БНРТ, предназначенных для познавательного моделирования, проектирования и физического прототипирования устройств и систем БНРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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
2. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* 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
3. *Абуталипов Р. Н., Заммоев 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
4. *Заммоев 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
5. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Актуальные методологические проблемы междисциплинарных исследований в области бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 6(92). С. 10–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-10-20
6. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Актуальные задачи бионаноробототехники в области виртуального прототипирования бионаноустройств // 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 года. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2020. С. 193–200. EDN: HDQFSF
7. *Абуталипов Р. Н., Заммоев 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

8. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск методов и исследование возможностей применения современных технологий виртуального прототипирования и конструирования биоинженерных систем при проектировании бионанороботов 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

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

10. *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

11. *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

12. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Разработка техники виртуального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Материалы XVIII всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара «Перспективные системы и задачи управления», п. Домбай, Карачаево-Черкесская Республика, 3–7 апреля 2023 года. Таганрог: Лукоморье, 2023. С. 302–313

13. *Князева Е. Н.* Трансдисциплинарные стратегии исследований // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011. № 10(112). С. 193–201. EDN: OJQDNT

14. *Чернышев Г. В.* К созданию информационных инструментальных средств поддержки представления знаний. XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 8762–8772.

15. *Чернышев Г. В.* О типизации иерархических структур данных // Междунар. науч. конф. «Дискретная математика, алгебра и их приложения». Минск, 14–18 сентября 2015 г. Минск: Институт математики НАН Беларуси, 2015. С. 139–141.

16. *Chernyshev G.* Theoretical aspects of definition for hierarchical structures types / Proceedings of International Russian-Chinese Conference “Actual Problems of Applied Mathematics and Physics”. Tegenekly village, Boarding House «Elbrus», 14–18, December 2015. Pp. 48–50.

17. Coq 8.20.0 documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://coq.inria.fr/doc/V8.20.0/refman/index.html> (дата обращения: 25.09.2024)

18. *Norell U.* Towards a practical programming language based on dependent type theory // Chalmers University of Technology, 2007. 166 p. URL: <https://ncatlab.org/nlab/files/Norell-PracticalDTT.pdf>

19. *Eilenberg S., MacLane S.* General theory of natural equivalences // Transactions of the American Mathematical Society. 1945. Vol. 58. No. 2. Pp. 231–294.

20. *Маклейн С.* Категории для работающего математика / пер. под ред. В. А. Артамонова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 351 с. ISBN: 5-9221-0400-4

21. *Category Theory (Stanford Encyclopedia of Philosophy)*. [Электронный ресурс]. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/category-theory/> (дата обращения: 25.09.2024)

22. *Fong B., Spivak D. I.* Seven sketches in compositionality: An invitation to applied category theory // arXiv. Preprint arXiv:1803.05316. 2018

23. Васюков В. Л. Логический плюрализм и неклассическая теория категорий // Логические исследования: ежегодник. 2012. № 18. С. 60–76. EDN: PFOEPV
24. Родин А. В. Теория категорий и поиски новых математических оснований физики // Вопросы философии. 2010. № 7. С. 67–81. EDN: MSXDKX
25. Гуц А. К., Паутова Л. А. Теория категорий в социологии: общества как объекты топоса Гротендика // Математические структуры и моделирование. 2015. № 3(35). С. 61–71. EDN: VCYUOF
26. Сергиенко Н. А. Теория категорий в отечественной и зарубежной науке: классический подход // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2017. № 7-1(73). С. 150–153. EDN: YQEELV
27. Жожикашвили А. В. Категорная технология создания и развития интеллектуальных систем, основанных на знании // Информационные процессы. 2016. Т. 16. № 4. С. 312–332. EDN: XEIEER
28. Игамбердиев А. У. Логика организации живых систем. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995. 152 с.
29. Ковалев С. П. Теория категорий как математическая прагматика модельно-ориентированной системной инженерии // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12. № 1. С. 95–104. DOI: 10.14357/19922264180112. EDN: YTTTRFC
30. Ковалев С. П. Алгебраические методы проектирования гетерогенных киберфизических систем // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 144–147. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_2_144
31. Ковалев С. П. Методы теории категорий в цифровом проектировании гетерогенных киберфизических систем // Информатика и ее применения. 2021. Т. 15. № 1. С. 23–29. DOI: 10.14357/19922264210104
32. Ковалев С. П. Проектирование гетерогенных киберфизических систем с применением теории категорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 2. С. 59–67. DOI: 10.17587/mau.23.59-67
33. MacLane S., Moerdijk L. Sheaves in geometry and logic: a first introduction to topos theory (Universitext). New York: Springer, 1994. 640 p.
34. Гротендик А. О некоторых вопросах гомологической алгебры: перевод с фр. Б. Б. Венкова / Под ред. А. Л. Онищика. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 175 с.
35. Гротендик А. Урожай и посевы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 288 с.
36. Голдблатт Р. Топосы. Категорный анализ логики. М.: Мир, 1983. 487 с.
37. Натанзон С. М. Введение в пучки, расслоения и классы Черна. М.: МЦНМО, 2010. 48 с. ISBN: 978-5-94057-647-1
38. Букур И., Деляну А. Введение в теорию категорий и функторов. М.: Мир, 1972. 260 с.
39. *Category Theory* (Теория категорий. Конспект лекций Н. А. Вавилова и А. Ю. Лузгарева). URL: <http://cadadr.org/notes/categories.pdf> (дата обращения: 25.09.2024).
40. Непейвода А. Н. Л.Э.Я. Брауэр «недостовержность принципов логики» // Логические исследования. 2016. Т. 22. № 1. С. 171–176. EDN: WHTPCT
41. Гейтинг А. Интуиционизм. Введение: перевод с англ. В. А. Янкова / Под ред. и с коммент. А. А. Маркова. М.: Мир, 1965. 200 с.
42. Колмогоров А. Н. О принципе tertium non datur // Математический сборник. 1925. Т. 32. № 4. С. 646–667.
43. Колмогоров А. Н. Современные споры о природе математики // Научное слово. 1929. Вып. 6. С. 41–54.
44. Марков А. А. Избранные труды. Т. II. Теория алгоритмов и конструктивная математика, математическая логика, информатика и смежные вопросы. М.: МЦНМО, 2003. 626 с. ISBN: 5-94057-113-1

45. Новоселов М. М. К истории дискуссий об интуиционистской логике // *Философия науки*. 1998. Т. 4. № 1. С. 223–232. EDN: UMMKVJ

46. Шанин Н. А. О конструктивном понимании математических суждений // *Проблемы конструктивного направления в математике: сборник работ*. Тр. МИАН СССР. 1958. Т. 52. С. 226–311.

47. Краус М., Кучбах Э., Вошни О.-Г. Сбор данных в управляющих вычислительных системах: пер. с нем. М.: Мир, 1987. 294 с.

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. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Interrepresentational networks (IN) and 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)

3. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Domain model of a cognitive infocommunication system for an intelligent medical online service based on bionano-sensory devices. *Slavyanskiy forum [Slavic Forum]*. 2018. No. 1(19). Pp. 104–113. EDN: YWXRMT. (In Russian)

4. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search, research and development of bionanorobotics technologies for the sustainable development of mountain territories in the era of the sixth technological structure. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy [Sustainable development of mountain territories]*. 2018. Vol. 10. No. 3(37). Pp. 447–457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457. (In Russian)

5. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Actual methodological problems of interdisciplinary research in the field of bionanorobotics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2019. No. 6(92). Pp. 10–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-10-20. (In Russian)

6. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Current problems of bionanorobotics in the field of virtual prototyping of bionanodevices. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya [Advanced systems and control problems]: Materialy XV vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XI molodezhnoy shkoly-seminara “Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh”*, Nizhniy Arkhyz, 5–9.10.2020. Rostov-on-Don: SFU, 2020. Pp. 193–200. EDN: HDQFSF. (In Russian)

7. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Progress and prospects of bionanorobotics at present stage of development of science and technology. Necessity and opportunity of modernization of bionanorobotics for molecular biomanufacturing. *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. (In Russian)

8. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search for methods and study of the possibilities of using modern technologies of virtual prototyping and design of 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. (In Russian)

9. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Domain model of a cognitive information and communication system as the basis for an environment for virtual prototyping of devices and bionanorobotics systems. *Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya: Sbornik nauchnykh trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Nal'chik, 1–4.10.2021. Pp. 140–148. EDN: DTKSPA. (In Russian)

10. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Development of elements of technology for experimental prototyping of soft polymer 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. (In Russian)

11. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. The problem of developing theoretical foundations for the design and prototyping of bionanorobots devices and systems in cyberphysical 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)
12. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Development of technology for virtual prototyping of soft polymer mechatronic structures. *Materialy XVIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the XVIII All-Russian scientific and practical conference and the XIV youth school-seminar “Advanced systems and management problems”]. Dombay, 3–7.04.2023. Taganrog: Lukomor'e, 2023. Pp. 302–313. (In Russian)
13. Knyazeva E.N. Transdisciplinary research strategies. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Tomsk State Pedagogical University Bulletin]. 2011. No. 10(112). Pp. 193–201. EDN: OJQDNT. (In Russian)
14. Chernyshev G.V. To create information tools to support knowledge representation. *XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014*. [Materials of the XII All-Russian Meeting on Management Problems] Moscow, 16–19.06.2014. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014. Pp. 8762–8772. (In Russian)
15. Chernyshev G.V. About typing hierarchical data structures. *Mezhdunar. nauch. konf. «Diskretnaya matematika, algebra i ikh prilozheniya»*. Minsk, 14–18 sentyabrya 2015 g. Minsk: Institut matematiki NAN Belarusi, 2015. Pp. 139–141. (In Russian)
16. Chernyshev G. Theoretical Aspects of Definition for Hierarchical Structures Types. *Proceedings of International Russian-Chinese Conference “Actual Problems of Applied Mathematics and Physics”*. Tegenevly village, Boarding House “Elbrus”, 14–18, December 2015. Pp. 48–50.
17. Coq 8.20.0 documentation. URL: <https://coq.inria.fr/doc/V8.20.0/refman/index.html> (date of request: 25.09.2024).
18. Norell U. Towards a practical programming language based on dependent type theory. *Chalmers University of Technology*, 2007. 166 p. URL: <https://ncatlab.org/nlab/files/Norell-PracticalDTT.pdf>
19. Eilenberg S., MacLane S. General theory of natural equivalences. *Transactions of the American Mathematical Society*. 1945. Vol. 58. No. 2. Pp. 231–294.
20. MacLane S. Categories for the working mathematician. Translated by B.A. Artamonova. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 351 p. ISBN: 5-9221-0400-4. (In Russian)
21. Category Theory (Stanford Encyclopedia of Philosophy). URL: <https://plato.stanford.edu/entries/category-theory/> (date of request: 25.09.2024).
22. Fong B., Spivak D.I. Seven sketches in compositionality: An invitation to applied category theory. *arXiv. Preprint arXiv:1803.05316*. 2018.
23. Vasyukov V.L. Logical pluralism and non-classical category theory. *Logicheskie issledovaniya* [Logical Investigations]. 2012. No. 18. Pp. 60–76. EDN: PFOEPV. (In Russian)
24. Rodin A.V. The theory of categories and searches of the new mathematical bases of physics. *Voprosy filosofii* [Russian Studies in Philosophy]. 2010. No. 7. Pp. 67–81. EDN: MSXDKX. (In Russian)
25. Gutz A.K., Pautova L.A. Category theory in sociology: societies as objects of the Grothendieck topos. *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and modeling]. 2015. No. 3(35). Pp. 61–71. EDN: VCYIOF. (In Russian)
26. Sergienko N.A. Category theory in domestic and foreign science: classical approach. *Filologicheskie nauki. Voprosy teorii i praktiki* [Philology. Theory & practice]. 2017. No. 7-1(73). Pp. 150–153. EDN: YQEEKV. (In Russian)

27. Zhzhikashvili A.V. Category technology for creating and developing intelligent systems based on knowledge. *Informatcionnye processy* [Information processes]. 2016. Vol. 16. No. 4. Pp. 312–332. EDN: XE1ENR. (In Russian)
28. Igamberdiev A.U. *Logika organizatsii zhivyykh sistem* [Logic of organization of living systems]. Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1995. 152 p. (In Russian)
29. Kovalyov S.P. Category theory as a mathematical pragmatics of model-based systems engineering. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and Applications]. 2018. Vol. 12. No. 1. Pp. 95–104. DOI: 10.14357/19922264180112. (In Russian)
30. Kovalyov S.P. Algebraic means of heterogeneous cyber-physical systems design. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technologies and Technics]. 2021. No. 2. Pp. 144–147. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_2_144. (In Russian)
31. Kovalyov S.P. Methods of the category theory in digital design of heterogeneous cyber-physical systems. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and Applications]. 2021. Vol. 15. No. 1. Pp. 23–29. DOI 10.14357/19922264210104. (In Russian)
32. Kovalyov S.P. Design of heterogeneous cyber-physical systems employing category theory. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control]. 2022. Vol. 23. No. 2. Pp. 59–67. DOI: 10.17587/mau.23.59-67. (In Russian)
33. MacLane, S., Moerdijk L. Sheaves in geometry and logic: a first introduction to topos theory (universitext). New York: Springer, 1994. 640 p.
34. Grotendic A. *O nekotorykh voprosakh gomologicheskoy algebry* [On some questions of homological algebra]. Translated from the French by B.B. Venkov; Edited by A.L. Onishchika. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1961. 175 p. (In Russian)
35. Grotendic A. *Urozhai i posevy* [Harvests and crops]. Izhevsk: NITs “Regularnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2001. 288 p. (In Russian)
36. Goldblatt R. Toposes. *Kategornyy analiz logiki* [Categorical analysis of logic]. Moscow: Mir, 1983. 487 p. (In Russian)
37. Natanzon S.M. *Vvedeniye v puchki, rassloeniya i klassy Cherna* [Introduction to sheaves, bundles, and Chern classes]. Moscow: MTsNMO, 2010. 48 p. ISBN: 978-5-94057-647-1. (In Russian)
38. Bukur I., Delyanu A. *Vvedeniye v teoriyu kategoriy i funktorov* [Introduction to the theory of categories and functors]. Moscow: Mir, 1972. 260 p. (In Russian)
39. Category Theory (Lectures Summary of N.A. Vavilov and A.Y. Luzgarev). URL: <http://cadadr.org/notes/categories.pdf> (date of request: 25.09.2024). (In Russian)
40. Nepeyvoda A.N. L.E.Ya. Brouwer “the unreliability of the principles of logic”. *Logicheskie issledovaniya* [Logical Research]. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 171–176. EDN: WHTPCT. (In Russian)
41. Geyting A. *Intuitsionizm. Vvedeniye* [Intuitionism. Introduction]. Transl. from Engl. In A. Yankov; Ed. by. and with comments. A. A. Markov. Moscow: Mir, 1965. 200 p. (In Russian)
42. Kolmogorov A.N. On the principle of tertium non datur. *Matematicheskiy sbornik* [Mathematical Collection]. 1925. Vol. 32. No. 4. Pp. 646–667. (In Russian)
43. Kolmogorov A.N. Modern disputes about the nature of mathematics. *Nauchnoe slovo*. 1929. No. 6. Pp. 41–54. (In Russian)
44. Markov A.A. Selected works. Vol. II. *Teoriya algoritmov i konstruktivnaya matematika, matematicheskaya logika, informatika i smezhnye voprosy* [Theory of algorithms and constructive mathematics, mathematical logic, computer science and related issues]. Moscow: MTsNMO, 2003. 626 p. ISBN: 5-94057-113-1. (In Russian)
45. Novoselov M.M. On the history of discussions about intuitionistic logic. *Filosofiya nauki* [Philosophy of Science]. 1998. Vol. 4. No. 1. Pp. 223–232. EDN: UMMKVJ. (In Russian)

46. Shanin N.A. On the constructive understanding of mathematical judgments. *Problemy konstruktivnogo napravleniya v matematike* [Proceedings of the Steklov Mathematical Institute]. 1958. Vol. 52. Pp. 226–311. (In Russian)

47. Kraus M., Kuchbach E., Voshni O.-G. *Sbor dannykh v upravlyayushchikh vychislitel'nykh sistemakh* [Data collection in control computing systems. Trans. from German]. Moscow: Mir, 1987. 294 p. (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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Абуталипов Ренат Надельшаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. совместной лаборатории ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная 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>, SPIN-код: 6219-9432

Заммоев Аслан Узеирович, канд. техн. наук, зав. совместной лабораторией ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная 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>, SPIN-код: 6317-3115

Чернышев Геннадий Васильевич, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. отдела автоматизации и информатизации региональных систем управления, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

henrychern@yandex.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0870-6318>, SPIN-код: 4103-0163

Information about the authors

Renat N. Abutalipov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher of the Joint Laboratory Android Technology and Bionanorobotics, 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;

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0187-563X>, SPIN-code: 6219-9432

Aslan U. Zammoev, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Joint Laboratory Android Technology and Bionanorobotics, 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;

zammoev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-3557>, SPIN-code: 6317-3115

Gennady V. Chernyshev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher of the Department of Automation and Informatization of Regional Management Systems, 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;

henrychern@yandex.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0870-6318>, SPIN-code: 4103-0163