

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ И ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ

А. А. Микрюков, М. Е. Мазуров, Д. А. Суздальский, К. Э. Чикунов

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,
Москва, Россия

В статье рассмотрены особенности математического аппарата когнитивного моделирования для решения задач анализа функционирования и прогнозирования развития слабоструктурированных и плохо формализуемых систем. Слабоструктурированные системы представляют собой сложные динамические системы, в которых важную роль играет человеческий фактор. Такие системы характеризуются неопределенностью входных и выходных данных, их невозможно описать точными формальными зависимостями. Сложность исследования плохо формализуемых систем заключается в необходимости учета различных, часто противоречивых показателей и критериев, которые не позволяют формально описать компоненты системы и ее функционал. Для моделирования такого класса систем находит применение математический аппарат когнитивного моделирования на основе когнитивных карт. Когнитивная карта позволяет дать целостное представление о слабоструктурированной и плохо формализуемой системе в виде графа, с помощью которого можно провести сценарное моделирование системы, разработать рекомендации по обеспечению ее устойчивого функционирования, а также решить задачи по прогнозированию ее развития. Авторами исследуются прикладные аспекты и особенности методов когнитивного моделирования. Кроме того, представлено описание математического аппарата и его возможностей, а также предложен методический подход к решению задач когнитивного моделирования и приведены примеры его применения.

Ключевые слова: когнитивная карта, целевые концепты, сценарное моделирование, математический аппарат.

ACUTE ISSUES OF COGNITIVE MODELING OF SEMI-STRUCTURED AND POORLY FORMALIZED SYSTEMS

**Andrey A. Mikryukov, Mikhail E. Mazurov,
Dmitriy A. Suzdalsky, Kirill E. Chikunov**

Plekhanov Russian Economic University, Moscow, Russia

The article studies specific features of mathematic tools of cognitive modeling meant to resolve tasks of analyzing functioning and forecasting the development of semi-structured and poorly formalized systems. Semi-structured systems are complicated dynamic systems, where human factor plays an important role. These systems are characterized by uncertainty of data-in and data-out and they cannot be described by precise formal dependencies. Difficulty of studying poorly formalized systems is connected with the necessity to take into account various and often contradicting figures and criteria, which would not allow us to describe formally components of the system and its functions. To model system of this class mathematic tools of cognitive modeling can be used on the basis of cognitive maps. Cognitive map can provide an integral idea of semi-structured and poorly formalized system in the form of a graph, which can help conduct scenario modeling of the system, prepare recommendations for its stable functioning and resolve problems of forecasting its development. The authors investigate applied aspects and specific features of methods of cognitive modeling. Apart from that they provided description of mathematic tools and their possibilities and put forward mathematic approach to solving tasks of cognitive modeling and gave examples of its use.

Keywords: cognitive map, target concepts, scenario modeling, mathematic tools.

Введение

Когнитивная карта представляет собой тип ментального представления об окружающей действительности или метафорическом пространственном окружении и взаимосвязи его компонентов. Концепция когнитивной карты впервые была введена Эдвардом Толменом в 1948 г. в работе «Когнитивные карты у крыс и человека», в которой введен термин «когнитивная карта» (познавательная карта). Процесс обучения в мозге крысы может быть представлен в виде карты окружающей обстановки. Она указывает пути (маршруты) движения и взаимосвязи элементов окружающей среды, включая реакции животного. С помощью когнитивной карты он попытался объяснить поведение крыс, которые, как казалось, осваивали пространственное расположение лабиринта. Впоследствии эта концепция была применена к другим животным, а также к поведению людей. Доказано, что когнитивные карты в мозге человека обеспечивают решение задач ориентации в окружающей среде, распознавания образов, вычисления направления и расстояния, выбора оптимальных маршрутов, а также критического мышления. В гиппокампе создаются ментальные карты социальных взаимодействий, которые обеспечивают предсказание результатов этих взаимодействий [2].

Широкое применение методов когнитивного моделирования обусловлено возможностями его математического аппарата. В общем случае когнитивная карта представляет собой схематичное, упрощенное описание картины мира индивида, а точнее – ее фрагмента, относящегося к конкретной проблемной ситуации.

Особенности когнитивного моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем

В слабоструктурированных системах практически отсутствуют количественные взаимосвязи между ее компонентами. В ходе структуризации таких систем число

компонентов и элементов сводят к минимуму, чтобы описание системы приобрело более определенный характер. Слабая структурированность, как правило, связана с наличием антропогенного фактора, при этом в плохо формализуемых системах (СПФ-системах), примерами которых являются социально-экономические системы (СЭС), человек представляет собой объект управления. Компоненты СЭС являются активными системами, цели функционирования которых могут не совпадать с целями функционирования системы в целом.

В плохо формализуемых системах их функционирование не поддается описанию количественными показателями, поскольку параметры исследуемой ситуации оцениваются не на основе объективных измерений, а путем опроса экспертов, в силу чего представляют собой субъективные оценки. Кроме того, заранее сформулированные альтернативы отсутствуют и возникают в процессе проведения анализа. Сложность структурирования и формализации СПФ-систем определяется такими их свойствами, как нелинейность, нестационарность, неаддитивность и стохастичность, которые напрямую связаны с наличием хаотической составляющей в динамике СПФ-систем и неопределенностью их поведения; нечеткой связью между управляющими воздействиями и реакцией объекта управления; невозможностью получения точного прогноза поведения СПФ-системы на протяженном горизонте прогнозирования и др. [6].

Когнитивное моделирование на основе когнитивных карт представляет собой способ анализа объекта исследования, обеспечивающий определение силы и направления влияния выявленных экспертами факторов на перевод объекта управления в целевое состояние с учетом сходств и различий во влиянии различных факторов на объект управления.

Классическая когнитивная карта – это ориентированный граф, в котором привилегированной вершиной является некото-

рое будущее (как правило, целевое) состояние объекта управления, описываемое набором показателей. Остальные вершины соответствуют факторам. Дуги, соединяющие факторы с вершиной целевого состояния, имеют знак и толщину, соответствующие силе и направлению влияния данного фактора на переход объекта управления в целевое состояние, а дуги, соединяющие факторы, показывают сходства и различия во влиянии этих факторов на объект управления. Вершины (узлы) когнитивной карты называются концептами (факторами). Существуют управляемые, неуправляемые и целевые концепты.

На рис. 1 представлен пример когнитивной карты, отражающей взаимосвязи разнообразных факторов между собой и степень (силу) этих взаимосвязей от незначительного до очень сильного.

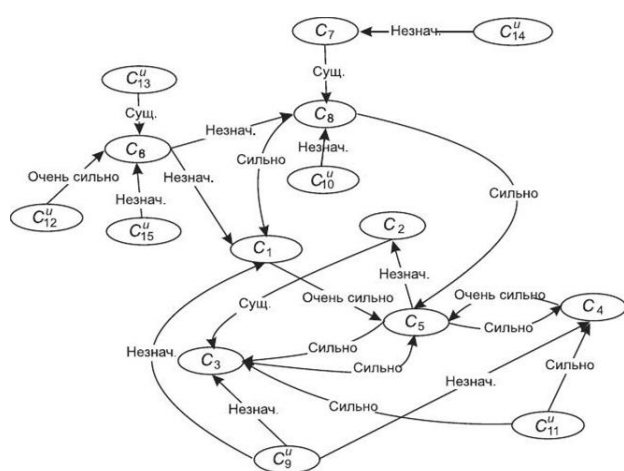


Рис. 1. Пример когнитивной карты взаимосвязи выявленных управляемых, неуправляемых и целевых концептов;
 C_i – неуправляемые и целевые концепты;
 C_i^u – управляемые концепты

Экспертным путем можно определить степень влияния факторов друг на друга и целевые показатели. Исследование на основе когнитивной модели позволяет определить, как изменится целевой показатель (концепт) когнитивной карты при изменении факторов (управляющих концептов), а также решить обратную задачу – сформировать вектор воздействий на управляю-

щие концепты для достижения требуемого значения целевого концепта в условиях заданных ограничений на ресурсы.

Одним из ключевых достоинств когнитивных моделей является возможность выявления структуры каузальных связей между компонентами сложных слабоструктурированных систем, которые не поддаются количественному анализу.

Когнитивное моделирование представляет собой циклический процесс, который обеспечивает анализ и принятие решений в плохо определенных ситуациях с использованием метода сценарного прогнозирования (планирования), который позволяет определить вероятные или возможные тенденции развития событий по альтернативным вариантам, а также возможные последствия принимаемых решений с целью выбора наиболее предпочтительной альтернативы.

Когнитивные модели позволяют обеспечить решение двух классов задач:

1) саморазвития (динамического анализа саморазвития ситуации для определения значений целевого фактора при текущих значениях внешних и внутренних факторов);

2) управляемого развития:

– прогнозирования ситуации путем определения состояния целевого фактора при существующих (текущих) и возможных воздействиях на внешние и внутренние факторы (прямая задача);

– определения того, какие воздействия необходимо оказать на внешние и внутренние факторы (концепты), чтобы достичь заданного состояния целевого фактора (обратная задача).

В настоящее время существуют разновидности когнитивных моделей и когнитивных карт. Наибольшее распространение получили нечеткие когнитивные модели (НКМ) на основе нечетких когнитивных карт (НКК). Отличительной особенностью НКМ является возможность описания степени влияния концептов друг на друга нечеткой переменной. Основными преимуществами нечетких НКМ являются

возможность формального описания неизмеримых факторов, представление взаимозависимостей между объектами и компонентами в виде нечетких отношений взаимовлияния с использованием методов нечеткой каузальной алгебры, а также использование неполной, нечеткой, в том числе противоречивой, информации. НКМ позволяют наилучшим образом отразить неопределенность динамики, а также состояние концептов когнитивной карты и их взаимосвязей. Модель НКК позволяет описать поведение сложной системы в целом, а каждый концепт НКК – ее факторную характеристику. В настоящее время на основе НКМ базируется большинство современных систем моделирования и прогнозирования сложных слабоструктурированных систем, отличающихся высокой степенью неопределенности и стохастичности, к классу которых относятся социальные, социально-экономические, организационно-технические системы и др.

Процесс когнитивного моделирования укрупненно включает следующие этапы [1; 3]:

- построение нечеткой когнитивной модели;
- структурно-целевой анализ и верификация когнитивной модели;
- сценарное моделирование в условиях заданных ограничений.

Результатами когнитивного моделирования являются выработка управляющих воздействий на выявленные факторы для обеспечения устойчивого функционирования СПФ-системы, оценка процесса саморазвития и прогнозирование целевых показателей. Ниже рассмотрены примеры, иллюстрирующие особенности использования НКК при моделировании СПФ-систем и процессов.

Прикладные аспекты решения задач на основе нечетких когнитивных моделей и методов

В представленных авторских примерах показаны возможности применения НКМ для решения задачи анализа и оценки ка-

чества программного обеспечения и задачи обеспечения устойчивого развития социально-экономической системы.

Задача оценки качества программного продукта на основе методов когнитивного моделирования

В статье А. А. Дрожжина «Подход к оценке качества программного обеспечения на основе когнитивной модели» [4] показано решение задачи оценки качества программного продукта на основе НКМ, которое включает следующие этапы:

1. Формирование списка концептов НКК реляционного типа, которые оказывают влияние на качество программного продукта.
2. Формирование на основе мнений экспертов множества R -отношений в виде причинно-следственных связей между концептами.
3. Формирование матрицы влияния основных факторов (свойств) на характеристики программного продукта, которая обеспечивает получение количественных характеристик влияния цепочек взаимодействующих концептов на целевые концепты.
4. Построение НКК на основе матрицы влияния (рис. 2).
5. Оценка влияния на целевые факторы импульсных воздействий, оказываемых на управляющие факторы, и ее интерпретация.

На рис. 3 представлены результаты моделирования, иллюстрирующие характер изменения значений управляющих и целевых концептов НКК.

Полученные результаты моделирования позволяют определить, какие факторы и цепочки факторов вносят наибольший вклад в обеспечение качества программного продукта. Кроме того, НКМ позволяют определить, какие воздействия необходимо оказать на управляющие факторы, чтобы обеспечить требуемое значение качества программного продукта.

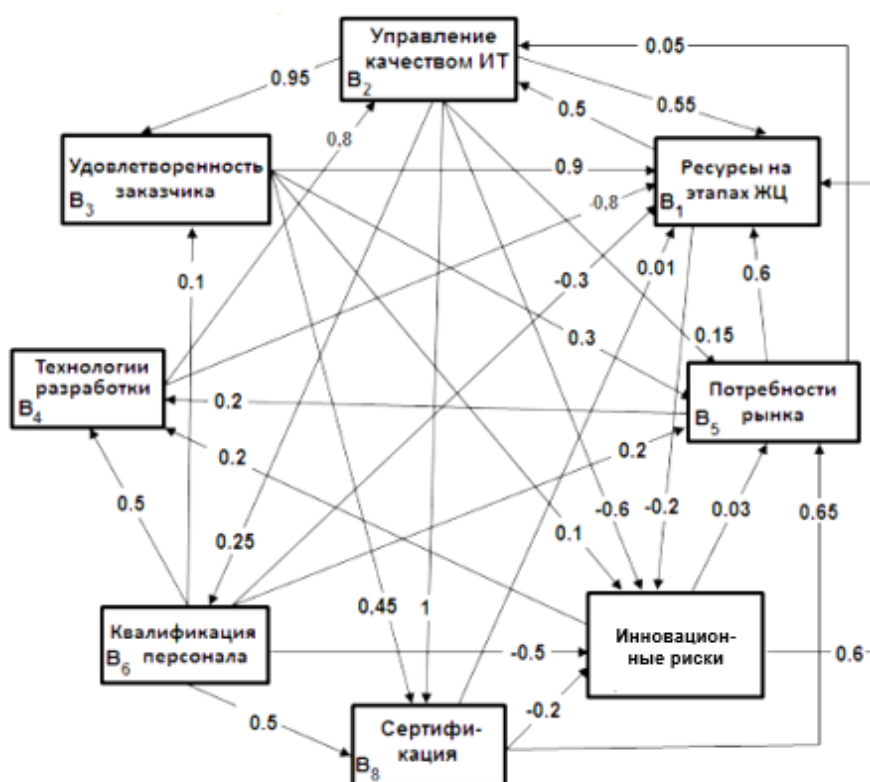


Рис. 2. Нечеткая когнитивная карта оценки качества программного обеспечения

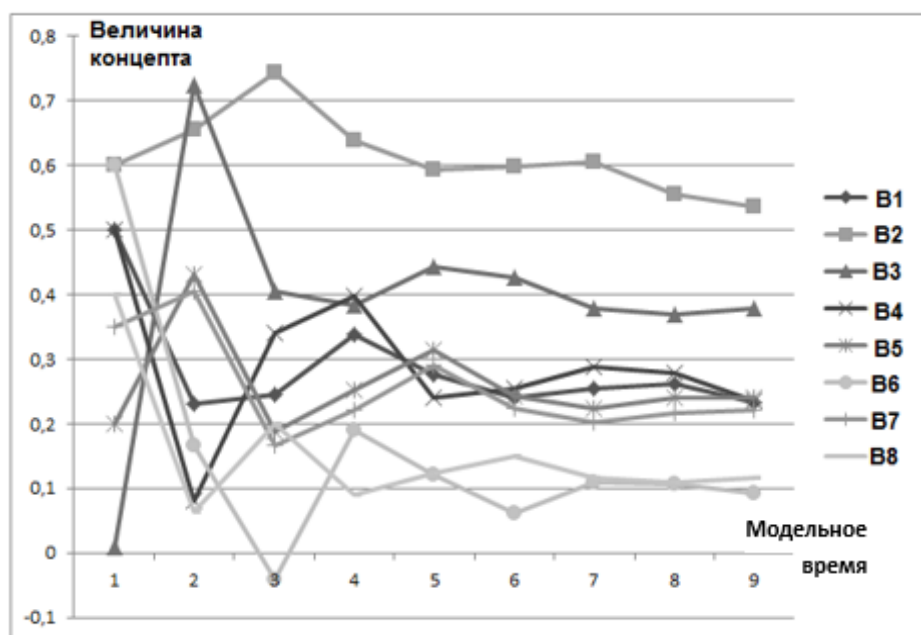


Рис. 3. Результаты расчета значений концептов для НКК
в тактах модельного времени

*Задача разработки научно обоснованных
предложений по обеспечению
устойчивого развития регионов
Арктической зоны Российской Федерации*

В статье А. А. Микрюкова, Д. А. Торсунова, К. Э. Чикунова и Т. П. Данько «Когнитивная модель устойчивого развития Арктического региона» [5] показано решение задачи выработки научно обоснованных предложений в программу обеспечения устойчивого развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Полученные результаты позволили обосновать необходимые экономические решения по обеспечению устойчивого развития АЗРФ. Разработанные предложения на основе анализа социально-экономической ситуации в Мурманской области могут лечь в основу дорожной карты развития Арктического региона.

На начальном этапе исследования с использованием материалов опроса группы экспертов решена задача идентификации факторов, влияющих на устойчивое развитие региона. С этой целью был использован подход на основе PESTLE-анализа, который позволил разделить множество выявленных факторов на группы: экономические, политические, социальные, технологические, законодательные и экологические. В результате PESTLE-анализа выявлено около 150 факторов, влияющих на устойчивое развитие региона, из которых экспертами определено 89 релевантных.

В качестве целевых факторов нечеткой когнитивной карты, отражающих устойчивость социально-экономического развития региона, экспертами выделены валовой региональный продукт (ВРП); уровень преступности; уровень жизни; уровень продовольственной безопасности; экологический индекс; уровень развития транспортной сети. На основе оценки взаимосвязей выявленных факторов построена когнитивная карта, отражающая причинно-следственные связи между концептами с указанием характера направленности связей и их силы.

На этапе структурно-целевого анализа разработанной НКК проведен расчет ее системных характеристик, который показал согласованность компонентов когнитивной модели и ее соответствие объекту исследования.

На следующем этапе проведено статическое и динамическое моделирование. Задачей статического моделирования является выявление точек бифуркации, в которых социально-экономическая система переходит в неустойчивое состояние. Статическое моделирование позволило выявить наиболее значимые классы управляющих концептов и их цепочек, оказывающих существенное влияние на целевые концепты. С этой целью построены альфа-срезы когнитивной карты (срезы α -уровня), обычно в интервале 75–90%. На этапе статического моделирования был получен срез когнитивной карты α -уровня (при $\alpha = 80\%$), представленный на рис. 4.

Проведенный анализ позволил оценить влияние цепочек факторов на целевые показатели. Например, ключевое влияние на целевой концепт «ВРП» оказывает следующая цепочка: объем запасов природных ресурсов – добывающая промышленность – ассортиментная структура производства – объем производства – объем продаж.

Ключевое влияние на целевой концепт «Уровень жизни» оказывает цепочка: производительность труда – средняя заработная плата.

На следующем шаге исследований проведено динамическое моделирование, по результатам которого в условиях заданных ограничений на ресурсы получено около 6 561 недоминируемого варианта социально-экономического развития региона Арктической зоны и выбраны наиболее предпочтительные в условиях заданных ограничений на ресурсы.

Таким образом, полученные результаты позволили в условиях заданных ограничений на выделение ресурсов выработать рациональное решение по вложению средств на приращение управляющих

факторов с целью достижения требуемых значений целевых показателей, обеспечи-

вающих устойчивое социально-экономическое развитие АЗРФ.

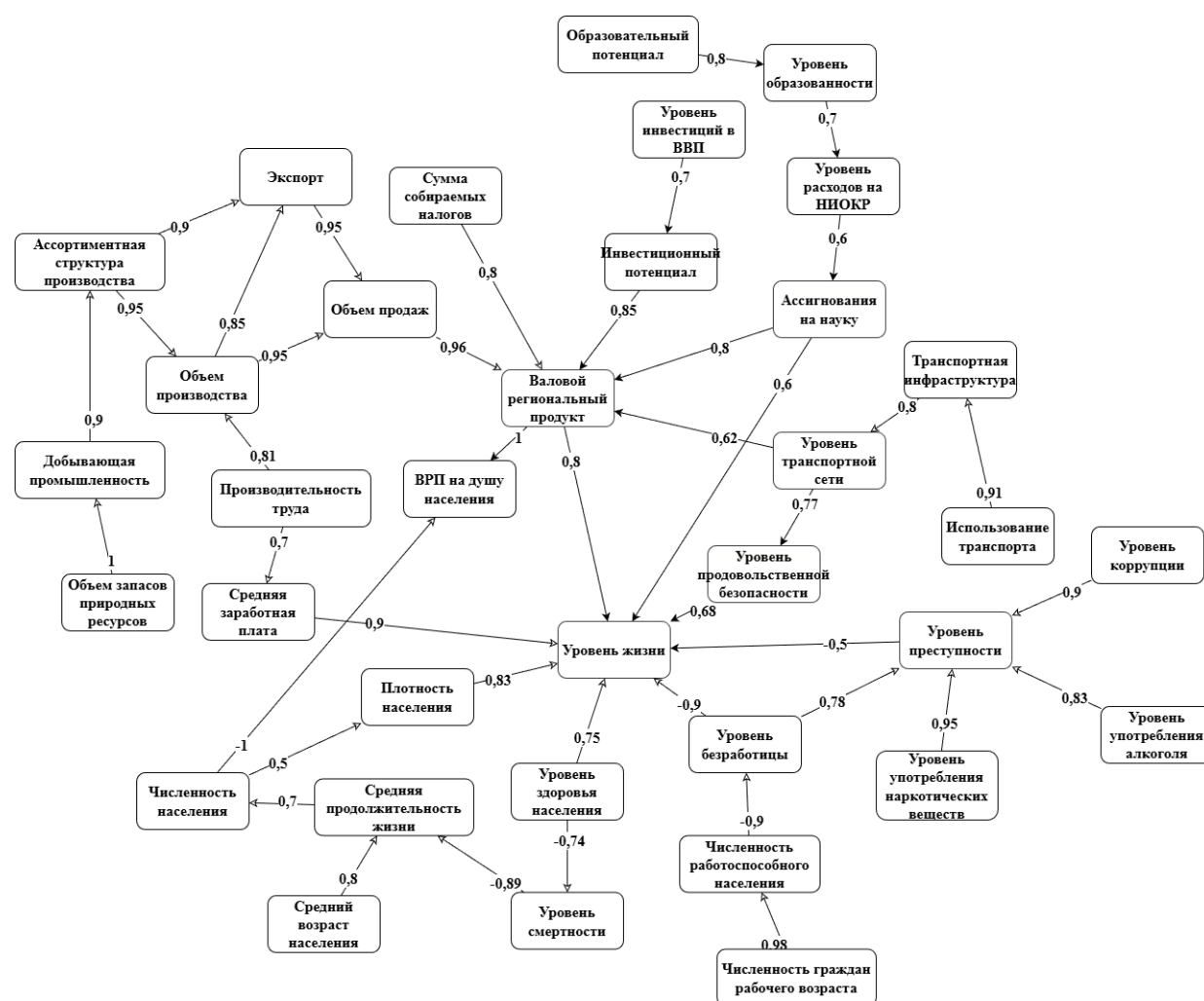


Рис. 4. Срез α -уровня когнитивной карты

Представленные примеры иллюстрируют эффективность аппарата НКМ при решении актуальных задач в различных предметных областях.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что эффективным математическим аппаратом для исследования класса слабоструктурированных и плохо формализуемых систем является когнитивное моделирование. Анализ публикаций показал большой интерес исследователей к применению методов когнитивного моделирования в различных предметных областях.

Разработанный авторами методический аппарат когнитивного моделирования, позволяющий снизить размерность решаемой задачи за счет исключения нерелевантных факторов при построении когнитивной карты, а также провести верификацию когнитивной модели на основе структурно-целевого анализа и расчета системных характеристик когнитивной карты, обеспечивающих адекватность и достоверность построенной модели, показал свою эффективность. Перспективным направлением совершенствования математического аппарата когнитивного моделирования является использование гибридного подхода, например, комбинации когни-

тивной карты с нейронной сетью, системой нечеткого логического вывода и др., а также реализация алгоритмов машинного обуче-

ния для настройки весов связей между концептами когнитивной карты.

Список литературы

1. Авдеева З. К., Коврига С. В. Формирование стратегии развития социально-экономических объектов на основе когнитивных карт. Методы решения слабоструктурированных проблем развития социально-экономических объектов на основе когнитивных карт. – Saarbrücken : LAMBERT Academic Publishing, 2011.
2. Базян А. С. Зеркальные нейроны, физиологическая роль, особенности функционирования и эмоционально насыщенная когнитивная карта мозга // Успехи физиологических наук. – 2019. – Т. 50. – № 2. – С. 42–62.
3. Васильев В. И., Кудрявцева Р. Т., Юдинцев В. А. Автоматизация процесса оценки информационных рисков с использованием нечетких когнитивных карт // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18. – № 3 (64). – С. 253–260.
4. Дрошкин А. А. Подход к оценке качества программного обеспечения на основе когнитивной модели // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2024. – Т. 21. – № 2 (134). – С. 36–467.
5. Микрюков А. А., Торсунов Д. А., Чикунов К. Э., Данько Т. П. Когнитивная модель устойчивого развития Арктического региона // XII Международная научно-практическая конференция имени А. И. Китова «Информационные технологии и математические методы в экономике и управлении» (ИТиММ-2023). 23–24 марта 2023 г. : сборник статей : в 2 кн. – Кн. 2. – М. : ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2023. – С. 217–224.
6. Петров Л. Ф. Нелинейные модели в экономических и социальных исследованиях // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2022. – № 4 (124). – С. 23–31.

References

1. Avdeeva Z. K., Kovriga S. V. Formirovanie strategii razvitiya sotsialno-ekonomicheskikh obektov na osnove kognitivnykh kart. Metody resheniya slabostrukturirovannykh problem razvitiya sotsialno-ekonomicheskikh obektov na osnove kognitivnykh kart [Elaborating Strategy of Social and Economic Development of Projects on the Basis of Cognitive Maps. Methods of Resolving Semi-Structured Problems of Social and Economic Projects on the Basis of Cognitive Maps]. Saarbrücken, LAMBERT Academic Publishing, 2011. (In Russ).
2. Bazyan A. S. Zerkalnye neyrony, fiziologicheskaya rol, osobennosti funktsionirovaniya i emotsionalno nasyshchennaya kognitivnaya karta mozga [Smooth Neurons, Physiological Role, Specific Functioning and Emotionally Saturated Cognitive Map of the Brain]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* [Successes of Physiological Science], 2019, Vol. 50, No. 2, pp. 42–62. (In Russ).
3. Vasilev V. I., Kudryavtseva R. T., Yudintsev V. A. Avtomatizatsiya protsessa otsenki informatsionnykh riskov s ispolzovaniem nechetkikh kognitivnykh kart [Automation of the Process of Assessing Information Risks by Using Fuzzy Cognitive Maps]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aircraft Technical University], 2014, Vol. 18, No. 3 (64), pp. 253–260. (In Russ).
4. Drozhkin A. A. Podkhod k otsenke kachestva programmnoy obespecheniya na osnove kognitivnoy modeli [Approach to Estimating Quality of Software on the Basis of Cognitive

Model]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2024, Vol. 21, No. 2 (134), pp. 36–467. (In Russ).

5. Mikryukov A. A., Torsunov D. A., Chikunov K. E., Danko T. P. Kognitivnaya model ustoychivogo razvitiya Arkticheskogo regiona [Cognitive Model of Sustainable Development of the Arctic Region]. *12th International Conference named after A. I. Kitov 'Information Technologies and Mathematic Methods in Economics and Management' (IT&MM-2023). 23–24 March, 2023: collection of articles*, in 2 books, book 2. Moscow, The Plekhanov Russian University of Economics, 2023, pp. 217–224. (In Russ).

6. Petrov L. F. Nelineynye modeli v ekonomicheskikh i sotsialnykh issledovaniyakh [Non-Linear Models in Economic and Social Research]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2022, Vol. 19, No. 4 (124), pp. 23–31. (In Russ).

Поступила: 21.03.2025

Принята к печати: 07.04.2025

Сведения об авторах

Андрей Александрович Микрюков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной
информатики и информационной
безопасности РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: Mikrukov.aa@rea.ru

Михаил Ефимович Мазуров

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры прикладной
информатики и информационной
безопасности РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: Mazurov37@mail.ru

Дмитрий Андреевич Суздальский

аспирант кафедры прикладной
информатики и информационной
безопасности РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: t7699690@gmail.com

Кирилл Эдуардович Чикунов

аспирант кафедры прикладной
информатики и информационной
безопасности РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: CHikunov.KE@rea.ru

Information about the authors

Andrey A. Mikryukov

PhD, Assistant Professor,
Assistant Professor of the Department
for Applied Informatics
and Information Security of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992, Russian Federation.
E-mail: Mikrukov.aa@rea.ru

Mikhail E. Mazurov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, Professor of the Department
for Applied Informatics
and Information Security of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992, Russian Federation.
E-mail: Mazurov37@mail.ru

Dmitriy A. Suzdalsky

Post-Graduate Student of the Department
for Applied Informatics and Information
Security of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992, Russian Federation.
E-mail: t7699690@gmail.com

Kirill E. Chikunov

Post-Graduate Student of the Department
for Applied Informatics and Information
Security of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992, Russian Federation.
E-mail: CHikunov.KE@rea.ru