

Научная статья
УДК 004.94, 510.644.4
doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.006

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Елена Олеговна Неупокоева^{1✉}, Светлана Николаевна Малыгина², Виталий Викторович Быстров³

^{1–3}Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

²Филиал МАУ в г. Апатиты, Апатиты, Россия

¹e.neupokoeva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4059-8724>

²s.malygina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6010-5662>

³v.bystrov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9369-8457>

Аннотация

Имитационное моделирование является одним из популярных методов изучения сложных систем разной природы. В работе анализируется существующий опыт применения аппарата нечеткой логики для имитационного моделирования процессов и систем. Рассматриваются основные направления интеграции нечеткой логики и имитационного моделирования. Приводятся примеры компьютерных моделей из разных предметных областей, построенных на базе нечеткой логики, в разрезе методов имитационного моделирования. Отмечаются способы технической реализации интеграции двух рассматриваемых инструментов. Авторы делают вывод о возможности применения нечеткой логики для моделирования жизнеспособности региональных социально-экономических систем.

Ключевые слова:

имитационное моделирование, нечеткая логика, системная динамика, нечеткие когнитивные карты, агентное моделирование

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Института информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема научно-исследовательской работы — «Методология создания информационно-аналитических систем поддержки управления региональным развитием, основанных на формирующем искусственном интеллекте и больших данных» (регистрационный номер 122022800551-0).

Для цитирования:

Неупокоева Е. О., Малыгина С. Н., Быстров В. В. Практика применения нечеткой логики для имитационного моделирования сложных систем // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 3. С. 69–81. doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.006.

Original article

THE PRACTICE OF USING FUZZY LOGIC FOR SIMULATION OF COMPLEX SYSTEMS

Elena O. Neupokoeva^{1✉}, Svetlana N. Malygina², Vitaliy V. Bystrov³

^{1–3}Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

²Apatity branch of Murmansk Arctic State University, Apatity, Russia

¹e.neupokoeva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4059-8724>

²s.malygina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0924-0188>

³v.bystrov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9369-8457>

Abstract

Simulation modeling is one of the popular methods for studying complex systems of different nature. The paper analyzes the existing experience of using the fuzzy logic apparatus for simulation modeling of processes and systems. The main directions of integration of fuzzy logic and simulation modeling are considered. Examples of computer models from different subject areas, built on the basis of fuzzy logic, in the context of simulation modeling methods are given. The ways of technical implementation of the integration of the two considered means are noted. The authors conclude that fuzzy logic can be used to model the resilience of regional socio-economic systems.

Keywords:

simulation modeling, fuzzy logic, system dynamics, fuzzy cognitive maps, agent-based modeling

Acknowledgments:

the study was carried out within the framework of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences state assignment of the Ministry of Science

and Higher Education of the Russian Federation, research topic “Methodology for creating information and analytical systems to support the management of regional development based on formative artificial intelligence and big data” (registration number of the research topic 122022800551-0).

For citation:

Neupokoeva E.O., Malygina S.N., Bystrov V.V. The practice of using fuzzy logic for simulation of complex systems // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 69–81. doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.006.

Введение

В наше время многие ученые отмечают, что долгосрочное планирование становится недостаточно гибким для быстро меняющихся параметров реальности [1]. На передний план среди методов прогнозирования выдвигается имитационное моделирование, обладающее множеством достоинств, например, возможность:

- исследовать слабоструктурированные системы, о функционировании которых доступен существенно ограниченный объем информации;
- изучить свойства систем, которые невозможно анализировать в реальных условиях или данные действия потребует большого объема ресурсов;
- детализировать модель, выделив различные агенты для реально существующих объектов и придав каждому уникальные свойства;
- задать различное поведение для отдельных агентов;
- отразить взаимосвязи между агентами;
- использовать случайно возникающие события и т. д.

В Институте информатики и математического моделирования им. В.А. Путилова ФИЦ КНЦ РАН ведется исследования по разработке методических и инструментальных средств информационно-аналитической поддержки управления жизнеспособностью региональных социально-экономических систем. Блок задач этого исследования связан с вопросами имитационного моделирования данного класса сложных систем. В частности, разрабатывается комплекс компьютерных моделей для оценки жизнеспособности (resilience) региональных «Бизнес-Сообщество-Власть»-систем (БСВ-систем). Предложенный метод оценки БСВ-систем базируется на вычислительных процедурах над многомерными структурами данных — гиперкубом жизнеспособности [2]. Эта структура формируется на основе сбора и обработки статистических данных, результатов анкетирования, экспертных мнений и др. Элементами гиперкуба жизнеспособности могут являться как количественные, так и качественные показатели. Одним из формальных аппаратов оперирования качественными показателями, зарекомендовавшим себя в разных предметных областях, является теория нечетких множеств и нечеткая логика. Чтобы осуществить поставленные задачи текущего исследования, возникла идея интегрировать имитационное моделирование и нечеткую логику для реализации возможности работать с качественными оценками. Для этого сперва необходимо проанализировать имеющейся практический опыт других исследовательских команд в области совместного использования двух этих инструментов для построения адекватных моделей сложных систем.

Имитационное моделирование позволяет подстраиваться под быстро меняющиеся исходные данные, обновляющиеся в результате социальных, политических и экономических изменений. Для расширения возможностей традиционных имитационных моделей с целью исследования поведения сложных объектов используется нечеткая логика (fuzzy logic).

Классическая четкая логика дает однозначный ответ «да» или «нет». Нечеткая логика оперирует более расширенным диапазоном понятий — «с какой вероятностью этот ответ правильный». В том числе это позволяет более естественно, чем формально-логические системы, описывать ход человеческого мышления. Существуют различные инструменты, основанные на нечеткой логике [3]:

- нечеткие нейронные сети;
- адаптивные нечеткие системы;
- нечеткие запросы к базам данных;
- нечеткие ассоциативные правила;
- нечеткие когнитивные карты;
- нечеткая кластеризация.

Нечеткая логика находит свое применение в разных видах имитационного моделирования. В случае с агентным моделированием она используется для задания поведения агентов, например, для имитации поведения человека или отдельных его аспектов, а в системной динамике — для вычисления нечетких параметров, например, плавающих показателей торговли и промышленности. Сочетание имитационного моделирования и нечеткой логики используется при моделировании сложных систем из разных предметных областей: складской системы [4], в создании модели управляющих действий летчика [5], управлении установками уличного освещения [6], выбора метода проращивания риса [7], анализе неисправностей в энергосистеме [8] и т. п. Также подобная связка инструментов часто применяется для моделирования социальных, экономических и социально-экономических процессов.

Для того чтобы выявить, как именно применяется нечеткая логика при разработке компьютерных моделей, ниже будут рассмотрены некоторые работы в разрезе применяемых методов имитационного моделирования.

Реализация нечеткой логики на базе агентных моделей

Довольно большой кластер имитационного моделирования с использованием нечеткой логики занимают агентные модели. Тематика этих моделей довольно обширна. Например, в работе [9] описывается инструмент моделирования, который позволяет имитировать социальные процессы в многоагентной системе, где агенты принимают решения в соответствии с правилами нечеткой логики. Инструмент предлагает тороидальный, непрерывный мир, в котором могут существовать два вида растений (пряность и сахар) и произвольное количество агентов разных видов. Агенты имеют потребности и могут быть наделены различными правилами и стратегиями, среди которых они выбирают действия для удовлетворения своих потребностей. В работе [10] описывается применение нечеткой логики для моделирования динамики дружбы в агентной модели. Моделирование было сконфигурировано с использованием популяции из 3 тыс. статических агентов, случайным образом распределенных в пространстве. Имитация осуществлялась в течение 20 лет (1 тыс. шагов агента). Агенты способны взаимодействовать, устанавливая дружеские и супружеские отношения, а также размножаться. Агент сможет общаться примерно с 50 другими «возможными друзьями» на протяжении всей своей жизни. Из них каждый агент сможет выбрать, с кем из них он будет общаться, будет дружить. Этот выбор задается правилами нечеткой логики.

Модель виртуального поселка

В работе [11] рассмотрено создание модели виртуального поселка, наполненного игровыми персонажами. Каждый игровой персонаж при этом оснащен системой принятия решений на основе нечеткой логики. Авторы утверждают, что при рассмотрении системы принятия решений с использованием нечеткой логики для одного персонажа результаты предсказать довольно просто ввиду небольшого количества конечных состояний, но при увеличении количества систем задача становится нетривиальной. Целью создания модели является классификация и описание активностей персонажей, руководствующихся нечеткой логикой при принятии решений. При этом персонажи взаимодействуют в рамках модели и оказывают влияние на свойства друг друга. Набор активных действий и свойств персонажа представлен на рис. 1.



Рис. 1. Активности и свойства игрового персонажа [11]

Всего в модели используется 70 уникальных агентов. Нечеткой логикой персонажи руководствуются в случаях принятия решений, связанных со здоровьем, бюджетом и доверием к другим персонажам. Например, в случае, когда игровой персонаж увольняется с работы, используются три лингвистические переменные, отображающие следующие свойства:

- возраст персонажа (четырёхпараметрическая криволинейная трапеция);
- бюджет (четырёхпараметрические и двухпараметрические функции);
- расстояние (трапециевидные и пирамидальные функции). Математическое представление переменной «расстояние» [11] показано на рис. 2:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & -\infty \leq x \leq -b; \\ 0,5 + 0,5 * \sin \left\{ \pi \left[x + \frac{a+b}{2} \right] / (b-a) \right\}, & -b \leq x \leq -a \\ 1, & -a \leq x \leq a \\ 0,5 - 0,5 * \sin \left\{ \pi \left[x - \frac{a+b}{2} \right] / (b-a) \right\}, & a \leq x \leq b \\ 0, & b \leq x \leq \infty \end{cases}$$

Рис. 2. Математическое представление лингвистической переменной «расстояние» [11]

Модель трудовой миграции населения

В модели [12] рассматриваются миграционные процессы населения. В качестве параметров используются социально-экономические показатели региона. Регионом исследования является Сибирский федеральный округ в составе 10 субъектов. Источник данных — ресурсы Федеральной службы государственной статистики за 2010–2021 гг. Язык разработки — C#, для реализации механизма нечеткой логики используется библиотека Accord.Fuzzy. Агентами модели выступают объекты типа «Человек», обладающие набором различных параметров, например, пол, возраст, фактическая заработная плата (рассчитывается из прожиточного минимума и уровня образования агента) и т. п. Продукционные правила нечеткой логики сформированы с помощью механизма «Если-То» и устанавливают зависимость между желаемым уровнем жизни агента, уровнем образования и неудовлетворенностью заработной платой. Пользовательский интерфейс включает возможность манипулировать параметрами трудового возраста населения, а также просматривать различные показатели результатов моделирования с разделением по территориальным субъектам. Графический интерфейс представлен на рис. 3.

Погрешность динамики численности населения в сравнении с реальными показателями не превысила 10 %, следовательно, модель адекватна. Предполагается использовать ее для анализа демографической обстановки и контроля миграционной динамики.

Модель взаимовлияния миграционной активности населения и экономического развития региона

Авторы работы [13] утверждают, что в связи с событиями последних лет уровень миграции за границу сильно возрос, особенно заметен отток высококвалифицированных специалистов. Для выявления взаимовлияния миграции населения и социально-экономических факторов была создана имитационная агентно-ориентированная модель, которая была протестирована на данных Сибирского федерального округа.

В разработанной модели используется два вида агентов: «Человек» и «Регион». «Регион» объединяет в себе 47 субъектов Российской Федерации, которые внесли наибольший вклад в миграцию из Республики Башкортостан. В качестве исходных данных для заполнения атрибутов агента «Регион» используются данные Федеральной службы государственной статистики.

Количество агентов типа «Человек» высчитывается в масштабе 1:1000 от населения Республики Башкортостан. Агент обладает различными параметрами (пол, возраст, заработная плата и т. п.), которые заполняются на основе статистических данных, и подчиняется общим правилам (рождение,

миграция, смерть и т. п.) Также для каждого агента производится расчет предпочтительного уровня жизни с помощью нечеткой логики, для этого в модели сформированы 34 правила вида «Если-То». Расчеты реализованы в расширении Fuzzy Logic Toolbox в среде Matlab.

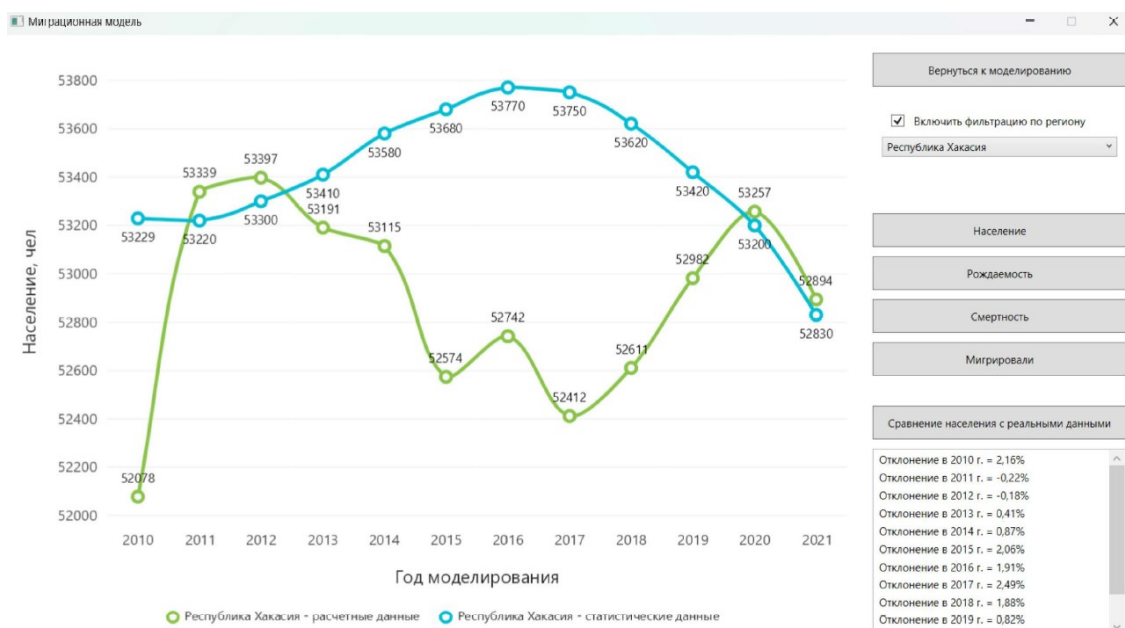


Рис. 3. Графический интерфейс модели динамики трудовой миграции населения [12]

Реализация нечеткой логики на базе системно-динамических моделей

Кроме использования в агентных моделях, нечеткая логика может выступать частью системно-динамических моделей (СД-моделей), подменяя один или несколько параметров лингвистическими переменными. Нечеткая логика помогает имитировать уровень удовлетворенности товаром [14], изменение урожайности риса от температуры [7], функционирование строительных систем [15] и т. п.

Модель продаж и обслуживания

В работе [14] предложен метод включения нескольких лингвистических или нечетких переменных в структуру модели системной динамики. Предложенная методика реализована в среде моделирования VENSIM на примере модели продаж и обслуживания (рис. 4). В модели две лингвистические переменные (удовлетворенность клиента в отношении обслуживания и время выполнения заказа, связанное с продуктом) влияют на преобразование потенциальных клиентов в клиентов.

Для определения лингвистических переменных используются треугольные функции принадлежности. Для дефазсификации используется понятие наибольшего из максимума, чтобы перевести нечеткое представление объединенного эффекта в четкое значение.

Моделирование производительности землеройных работ

В работе [15] предложена методика реализации применения нечетких данных для моделирования строительных систем на основе моделей системной динамики. Авторами данного исследования представлен гибридный метод, заключающийся в интеграции нечеткой системной динамики (fuzzy system dynamics, FSD) с гибридными нейро-нечеткими системами, названный нейро-нечеткая системная динамика (neuro-fuzzy system dynamics, N-FSD). Для определения нелинейных, сложных и многомерных отношений между системными переменными в N-FSD используются гибридные нейро-нечеткие системы, что, по словам авторов метода, повышает точность моделей FSD в строительных приложениях. Для определения нечетких переменных используются гауссовские функции принадлежности. Применимость метода N-FSD проверяется путем моделирования производительности землеройных работ (рис. 5).

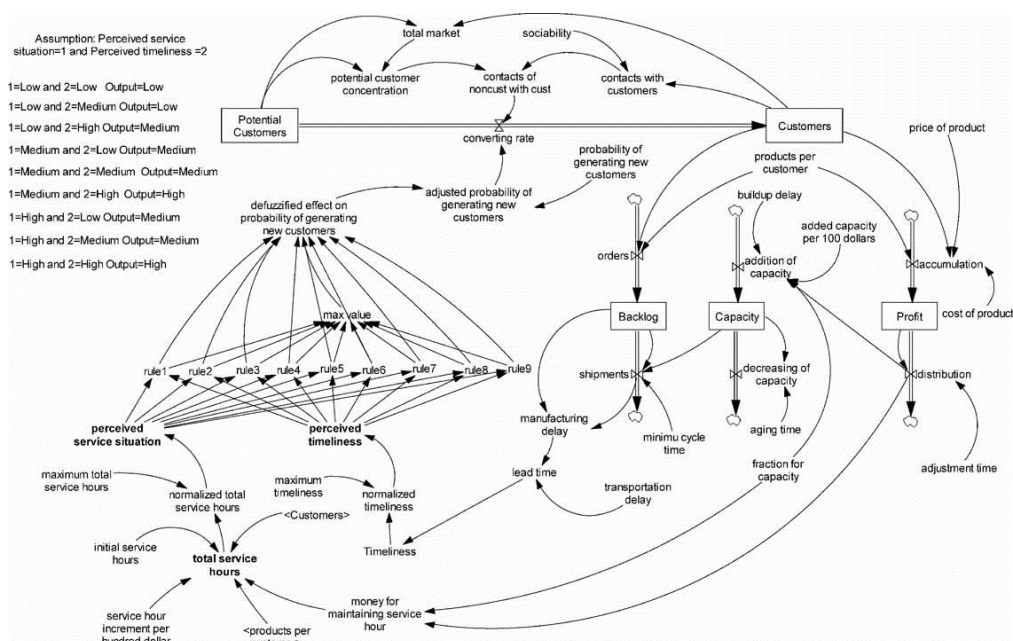


Рис. 4. СД-модель, демонстрирующая комбинированный эффект двух лингвистических переменных [14]

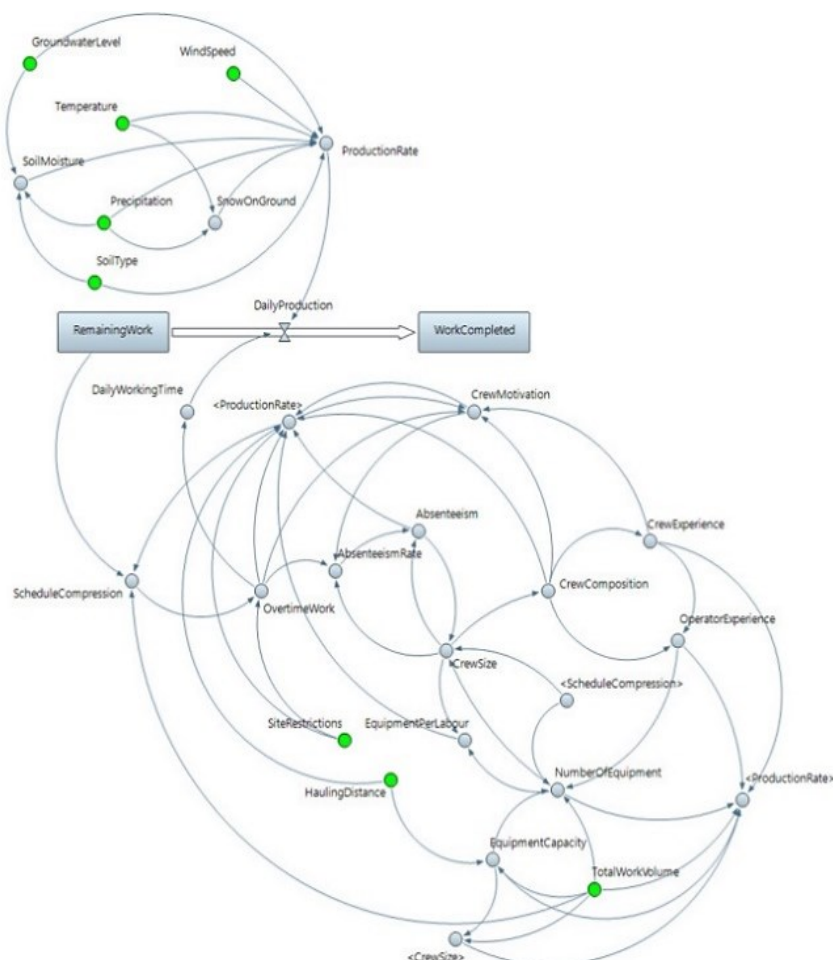


Рис. 5. Качественная модель N-FSD производительности земляных работ [15]

Модель N-FSD землеройных работ, представленная в этой работе, была разработана в AnyLogic с онлайн-подключением к MATLAB. В этой архитектуре модели на каждом шаге времени моделирования AnyLogic отправляет значение входных переменных для каждой системной связи в MATLAB, а MATLAB определяет выходные данные системных связей и возвращает результаты в AnyLogic.

Модель производства риса

В работе [7] предложен метод для реализации СД-модели, основанной на нечеткой логике. Этот метод был протестирован с помощью нечеткого СД-моделирования для системы производства риса, в которой нечеткая логика была применена для учета изменений урожайности риса в зависимости от температуры. На рис. 6 представлена простая модель динамики нечеткой системы для системы производства риса. Вспомогательная переменная с именем 'Fuzzy_Rice_yield' является переменной, выведенной нечеткой логикой.

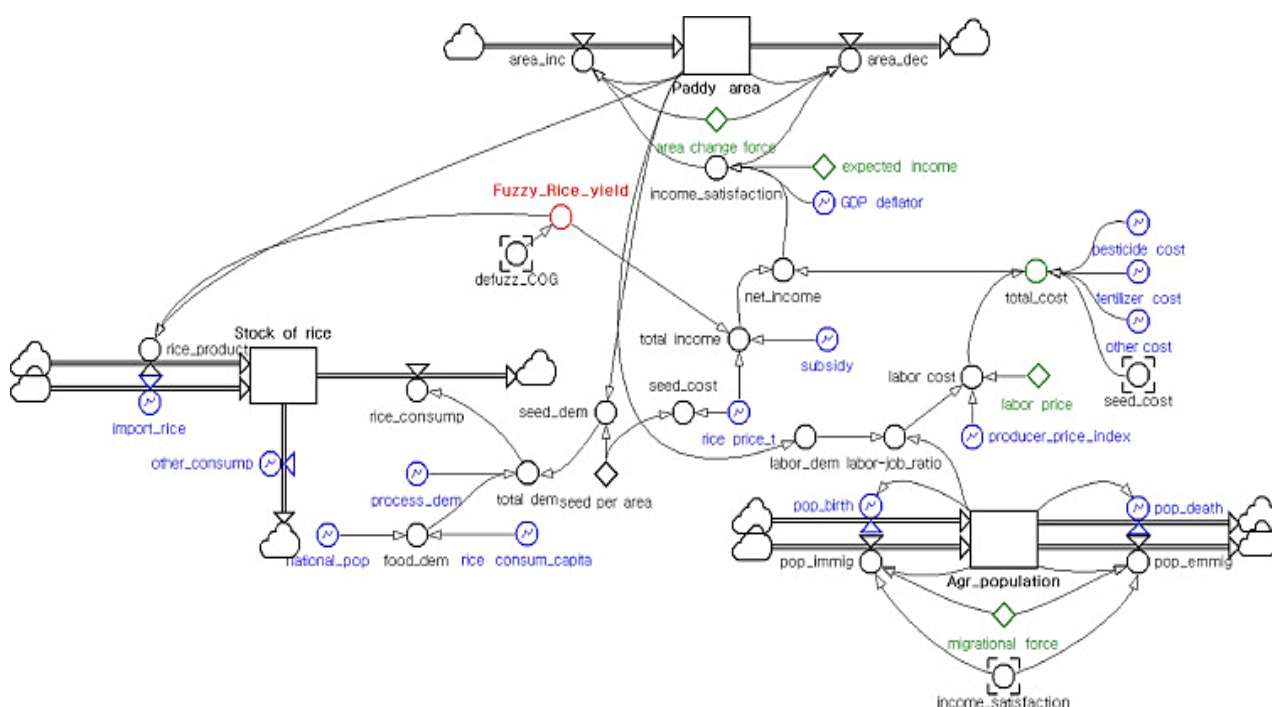


Рис. 6. Модель динамики нечеткой системы для системы производства риса [7]

Урожайность риса, рассчитанная с помощью нечеткой логики в рамках модели, соответствовала историческим данным. Разработанная методология включает процедуры построения нечеткой логики: фаззификацию, нечеткий вывод и оптимизацию на платформе SD. На рис. 7 представлена нечеткая логика для связи между средней температурой и урожайностью риса, реализованная в системно-динамической среде моделирования.

Использование когнитивных карт

Одним из методов нечеткой логики являются нечеткие когнитивные карты. Они используются для моделирования причинно-следственных взаимосвязей и позволяют наглядно представить систему, подвергаемую анализу. Нечеткие когнитивные карты представляют собой ориентированный граф, состоящий из узлов в виде нечетких множеств. Связи между узлами показывают, насколько сильно те или иные показатели влияют друг на друга.

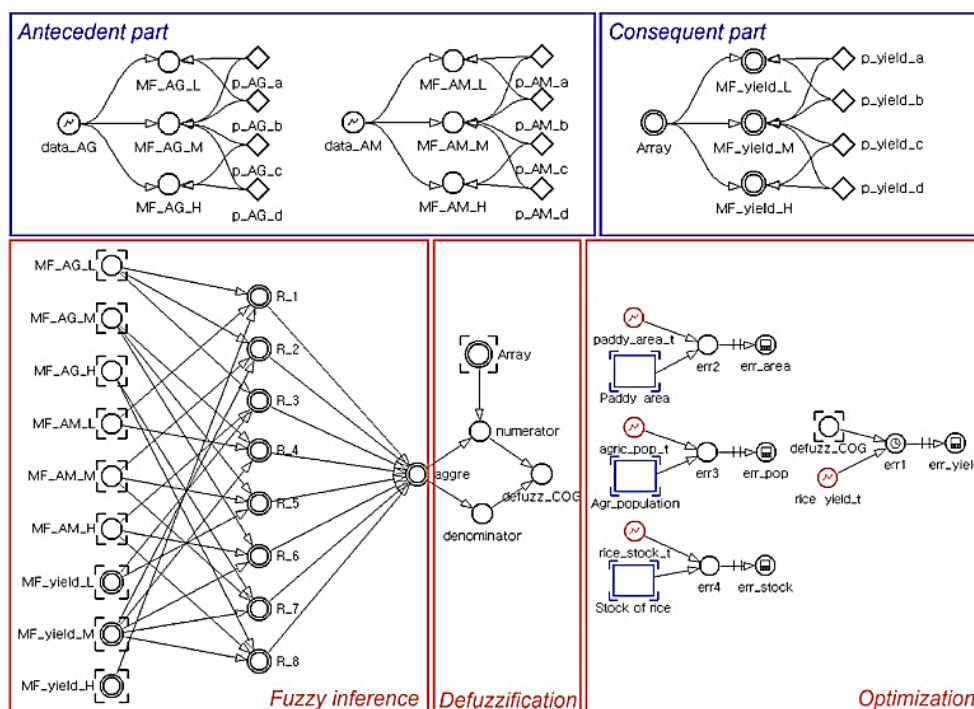


Рис. 7. Модель нечеткой логики [7]

Модель распространения болезней

В работе [16] описывается разработка модели пространственно-временного распространения болезней на примере городского округа Бангалор, Индия. Была реализована агентная модель (Agent-Based Modeling, ABM) с применением нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Map, FCM) (рис. 8) для моделирования индивидуальной поведенческой логики агентов.

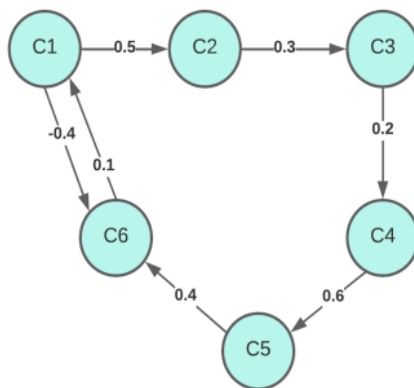


Рис. 8. Пример когнитивной карты [16]

С помощью когнитивных карт моделируется процесс «Восприимчивый — подвергшийся воздействию — заразившийся — удаленный» (SEIR) независимого индивидуального поведения агента, которое влияет на общее изменение тенденции. Когнитивная карта представляет собой граф, вершинами которого являются понятия (например, осознание болезни, страх, профилактические меры), а ребрами обозначают причинно-следственные связи между этими понятиями. Каждому ребру присваивается вес, указывающий силу и направление влияния.

В работе представлена высокоуровневая архитектура модели, имитирующая процесс SEIR (рис. 9).

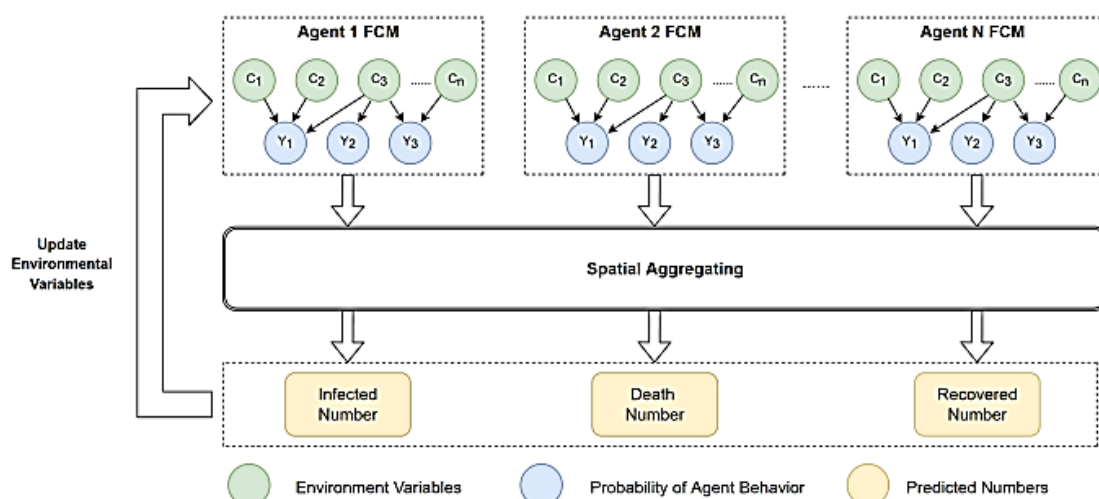


Рис. 9. Высокоуровневая архитектура гибридной модели FCM-ABM, имитирующая процесс SEIR [16]

Прогнозирование развития экономической ситуации

В основе модели, предложенной Заграновской и Эйсером [1], лежат нечеткие когнитивные карты. Авторы утверждают, что в условиях быстро меняющейся ситуации традиционная разработка долгосрочной стратегии не приносит желаемых результатов, поэтому необходимо моделировать сценарии развития экономической ситуации предприятия, и убедительно доказывают, что наиболее предпочтительным методом их создания выступает имитационное моделирование. При этом нечеткая логика хорошо подходит для описания экспертных оценок, поскольку эксперт не всегда абсолютно уверен в определенном результате. Нечеткая логика позволяет добавить такой параметр, как степень уверенности эксперта.

В качестве инструмента для работы с нечеткими когнитивными картами авторы предлагают использовать программное средство FCMapper, созданное на основе электронных таблиц Excel. Внешний вид нечеткой когнитивной карты представлен на рис. 10.

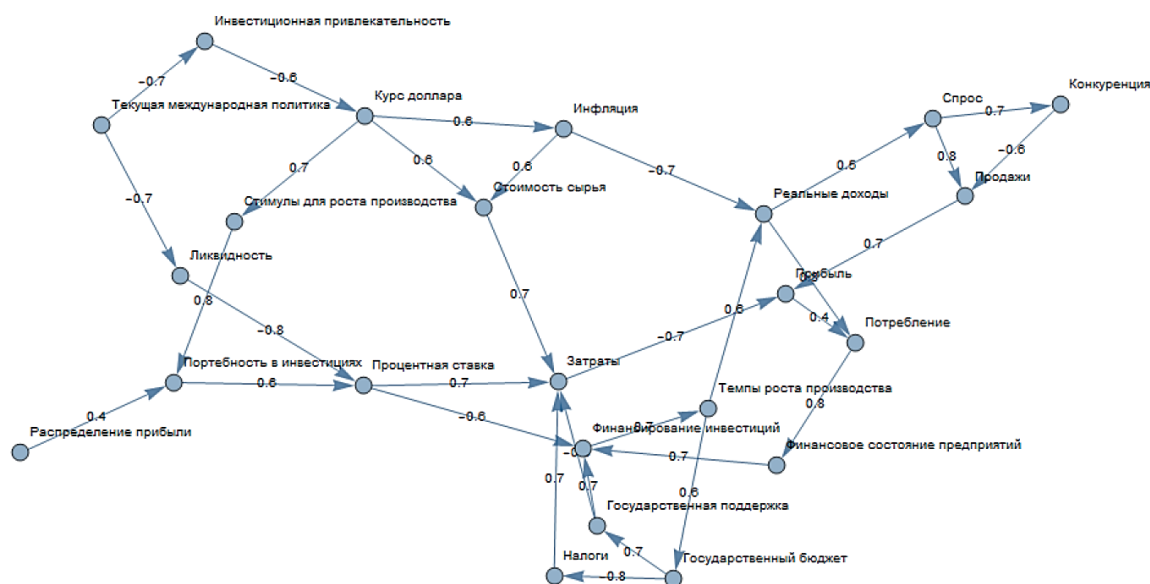


Рис. 10. Когнитивная карта экономической ситуации [1]

С помощью имитационного моделирования предполагается рассматривать различные сценарии. Для этого в первую очередь выявляется стабильное, долгосрочное состояние системы с помощью матрицы смежности. Далее определяются три сценария с различными значениями параметров, для которых производится расчет. Из результатов видно, какие параметры оказывают наиболее сильное влияние на систему, как модель себя поведет, если один из параметров превысит свое значение в несколько раз, и так далее. Авторы считают, что использование нечетких когнитивных карт в совокупности с имитационным моделированием помогает увеличить возможности масштабирования модели и улучшить качество сценариев.

Проведенный анализ открытых источников информации по изучаемой теме показал, что применение нечеткой логики при имитационном моделировании сложных систем довольно распространено и используется для исследования технических, биологических, техногенных и социально-экономических объектов. Вне зависимости от применяемого метода имитационного моделирования нечеткая логика в большинстве случаев используется как механизм выработки неоднозначного решения и способ оперирования экспертными оценками.

Заключение

В настоящее время российские и зарубежные ученые широко применяют нечеткую логику при реализации имитационных моделей для изучения систем различной природы. В зависимости от применяемого метода имитационного моделирования можно выделить основные способы применения данного формального аппарата. Так, для большинства системно-динамических моделей характерно использование нечеткой логики для вычисления внутренних переменных, обладающих разной степенью неопределенности. Для моделей, разработанных с помощью агентного подхода, сложилась практика имитировать поведение отдельных агентов на основе нечетких продукционных правил. Если же рассматривать вопрос программной реализации способа интеграции нечеткой логики и имитационного моделирования, то в реализованных проектах можно встретить разные варианты ее осуществления. В целом, интеграция выполняется двумя основными способами: аппарат нечеткой логики реализуется непосредственно внутри компьютерной модели с использованием элементов конкретного инструментального средства моделирования либо он функционирует на стороне внешних специализированных пакетов (например, MATLAB), а модель взаимодействует с ними через программный интерфейс.

Проведенный анализ источников показал, что первоначальная идея о применении нечеткой логики для имитационного моделирования жизнеспособности региональных социально-экономических систем состоятельна. Опыт совместного использования нечеткой логики и имитационного моделирования обширен и затрагивает вопросы изучения самых разнообразных систем и объектов. При этом использование аппарата нечеткой логики как способа оперирования качественными оценками при имитационном моделировании также реализуемо на практике.

Список источников

1. Заграновская А., Эйсснер Ю. Моделирование сценариев развития экономической ситуации на основе нечетких когнитивных карт // Современная экономика: проблемы и решения. 2017. № 10. С. 33–47.
2. Халиуллина Д. Н., Быстров В. В. Теоретические основы оценки жизнеспособности региональных социально-экономических систем // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 2. С. 78–92.
3. Лебедева М. Е. Нечеткая логика в экономике — формирование нового направления // Идеи и идеалы. 2019. Т. 11, № 1–1. С. 197–212. doi:10.17212/2075-0862-2019-11.1.1-197-212.
4. Сажина Ю. В., Липинский Л. В., Свиридова А. С. Применение имитационного моделирования при разработке системы, основанной на нечеткой логике // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 2, № 4(14). С. 202–206.

5. Верещиков Д. В., Волошин В. А., Ивашков С. С., Васильев Д. В. Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика // Труды МАИ. 2018. № 99. С. 13.
6. Марушко В. А. Имитационное моделирование системы управления установками уличного освещения в среде MATLAB с помощью нечеткой логики // Инновационное развитие науки и образования: сб. ст. XVII Междунар. науч.-практич. конф. (Пенза, 30 янв. 2023 г.). Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2023. С. 33–36.
7. Kim Y, Lee M., Hong J., Lee Yun-Sik, Wee J., Cho K. Development of a fuzzy logic-embedded system dynamics model to simulate complex socio-ecological systems // Ecological Modelling. — Elsevier, 2024. Vol. 493. 110738. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110738>.
8. Md. Aminur Rahman, Kazi Main Uddin Ahmed, Md. Rayhanus Sakib modeling of a novel fuzzy based overcurrent relay using Simulink // International Journal of Scientific & Technology Research — 2012. Vol. 1, Issue 4. P. 24–29.
9. Epstein, J. G., Möhring M., Klaus G. T. Fuzzy-logical rules in a multi-agent system // Social-Economic Phenomena and Processes. 2006. No. 1-2(1-2). P. 35–39.
10. Hassan, S., Salgado, M., Pavon, J. Friends Forever: Social Relationships with a Fuzzy Agent-Based Model // Hybrid Artificial Intelligence Systems. HAIS 2008. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. Vol. 5271. P. 523–532. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87656-4_65.
11. Коваленко, Н. Е., Новиков С. П. Разработка имитационной модели виртуального поселка с использованием системы принятия решений на основе нечеткой логики // Научный альманах. 2019. № 5–2(55). С. 35–41.
12. Корчевская, О. В., Бобровский, В. Е. Разработка агент-ориентированной модели и программного обеспечения трудовой миграции населения // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 8. С. 74–77.
13. Низамутдинов, М. М., Ахметзянова, М. И. Подход к моделированию взаимовлияния миграционной активности населения и экономического развития региона с применением нечеткой логики, геоинформационных технологий и агент-ориентированного моделирования // Системное моделирование социально-экономических процессов: тр. XLVI Междунар. науч. школы-семинара (Уфа, 09–15 окт. 2023 г.). Воронеж: Издательство «Истоки», 2024. С. 91–97. doi:10.5281/zenodo.10938968.
14. Liu, S., Triantis, K.P., Sarangi, S. Representing qualitative variables and their interactions with fuzzy logic in system dynamics modeling // Systems Research and Behavioral Science. 2011 Vol. 28. P. 245–263. <https://doi.org/10.1002/sres.1064>.
15. Seresht, N.G., Fayek, A.R. Neuro-fuzzy system dynamics technique for modeling construction systems. // Applied Soft Computing. 2020. Vol. 93, 106400. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106400>.
16. Song, Z.; Zhang, Z.; Lyu, F.; Bishop, M.; Liu, J.; Chi, Z. From Individual Motivation to Geospatial Epidemiology: A Novel Approach Using Fuzzy Cognitive Maps and Agent-Based Modeling for Large-Scale Disease Spread. // Sustainability, 2024. Vol. 16. 5036. <https://doi.org/10.3390/su16125036>.

References

1. Zagranovskaya A., Ejssner YU. Modelirovanie scenariy razvitiya ekonomicheskoy situatsii na osnove nechetkikh kognitivnykh kart [Modeling scenarios for the development of the economic situation based on fuzzy cognitive maps]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya* [Modern economy: problems and solutions], 2017, No 10, pp. 33–47. (In Russ.).
2. Khaliullina D.N., Bystrov V.V. Teoreticheskie osnovy ocenki zhiznesposobnosti regional'nykh social'no-ekonomicheskikh system [Theoretical foundations for assessing the viability of regional socio-economic systems]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences]. 2022. Vol. 13. No. 2. Pp. 78–92. (In Russ.).
3. Lebedeva, M. E. Nechyotkaya logika v ekonomike - formirovaniye novogo napravleniya [Fuzzy logic in economics - formation of a new direction]. *Idei i Idealy* [Ideas and ideals], 2019, vol. 11, No. 1–1, pp. 197–212. doi:10.17212/2075-0862-2019-11.1.1-197-212. (In Russ.).

4. Sazhina, Yu. V., Lipinskiy, L. V., & Sviridova, A. S. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya pri razrabotke sistemy, osnovannoy na nechyotokoy logike [Application of simulation modeling in the development of a fuzzy logic-based system]. *Aktual'nyye Problemy Aviatsii i Kosmonavтики* [Current problems of aviation and cosmonautics]. 2018, vol. 2, No. 4(14), pp. 202–206. (In Russ.).
5. Vereshchikov, D. V., Voloshin, V. A., Ivashkov, S. S., & Vasilyev, D. V. Primenenie nechyotokoy logiki dlya sozdaniya imitatsionnoy modeli upravlyayushchikh deystviy letchika [Applying fuzzy logic for developing simulation model of pilot's control actions]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2018, No 99, P. 13. (In Russ.).
6. Marushko, V. A., & Semenova, N. G. Imitatsionnoe modelirovanie sistemy upravleniya ustanovkami ulichnogo osveshcheniya v srede MATLAB s pomoshch'yu nechyotokoy logiki [Simulation modeling of street lighting control systems in MATLAB using fuzzy logic]. *Innovacionnoe razvitie nauki i obrazovaniya: sbornik statej XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 30 yanvarya 2023 goda* [Innovative development of science and education: collection of articles of the XVII International Scientific and Practical Conference]. Penza, Publ. Nauka i Prosveshchenie, 2023, pp. 33–36. (In Russ.).
7. Kim Y, Lee M., Hong J., Lee Yun-Sik, Wee J., Cho K. Development of a fuzzy logic-embedded system dynamics model to simulate complex socio-ecological systems. *Ecological Modelling*. Publ. Elsevier, 2024, Vol. 493, 110738. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110738>.
8. Md. Aminur Rahman, Kazi Main Uddin Ahmed, Md. Rayhanus Sakib modeling of a novel fuzzy based overcurrent relay using Simulink. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2012, Vol. 1, Issue 4, pp. 24–29.
9. Epstein J. G., Möhring M., Klaus G. T. Fuzzy-logical rules in a multi-agent system. *Social-Economic Phenomena and Processes*, 2006, No. 1-2(1-2), pp. 35–39.
10. Hassan S., Salgado M., Pavon J. Friends Forever: Social Relationships with a Fuzzy Agent-Based Model. *Hybrid Artificial Intelligence Systems. HAIS 2008. Lecture Notes in Computer Science*. Publ. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, Vol. 5271, pp. 523–532. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87656-4_65.
11. Kovalenko N. E., & Novikov S. P. Razrabotka imitatsionnoy modeli virtual'nogo poselka s ispol'zovaniem sistemy prinyatiya resheniy na osnove nechyotokoy logiki [Development of a simulation model of a virtual village using a fuzzy logic-based decision-making system]. *Nauchnyy Almanakh* [Scientific Almanac], 2019, No 5–2 (55), pp. 35–41. (In Russ.).
12. Korchevskaya, O. V., & Bobrovskiy, V. E. Razrabotka agent-orientirovannoy modeli i programmnogo obespecheniya trudovoj migracii naseleniya [Development of agent-oriented model and software of labor migration of the population]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical volga region bulletin], 2023, No 8, Pp. 74–77. (In Russ.).
13. Nizamutdinov, M. M., Ahmetzyanova, M. I. Podhod k modelirovaniyu vzaimovliyaniya migracionnoj aktivnosti naseleniya i ekonomicheskogo razvitiya regiona s primeneniem nechetkoj logiki, geoinformacionnyh tekhnologij i agent-orientirovannogo modelirovaniya [An approach to modeling the interaction of migration activity of the population and economic development of the region using fuzzy logic, geoinformation technologies and agent-oriented modeling]. *Sistemnoe modelirovanie social'no-ekonomicheskikh processov : trudy 46-oj Mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly-seminara, Ufa, 09–15 oktyabrya 2023 goda* [System modeling of socio-economic processes : proceedings of the 46th International Scientific School Seminar]. Voronezh: Istoki Publishing House, 2024, Pp. 91–97. doi:10.5281/zenodo.10938968. (In Russ.).
14. Liu S., Triantis K.P., Sarangi S. Representing qualitative variables and their interactions with fuzzy logic in system dynamics modeling. *Systems Research and Behavioral Science*, 2011, Vol. 28, pp. 245–263. <https://doi.org/10.1002/sres.1064>.
15. Seresht N.G., Fayek A.R. Neuro-fuzzy system dynamics technique for modeling construction systems. *Applied Soft Computing*, 2020, Vol. 93, 106400. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106400>.

16. Song Z.; Zhang Z.; Lyu F.; Bishop M.; Liu J.; Chi Z. From Individual Motivation to Geospatial Epidemiology: A Novel Approach Using Fuzzy Cognitive Maps and Agent-Based Modeling for Large-Scale Disease Spread. *Sustainability*, 2024, Vol. 16, 5036. <https://doi.org/10.3390/su16125036>.

Информация об авторах

Е. О. Неупокоева — стажер-исследователь;

С. Н. Малыгина — кандидат технических наук, научный сотрудник;

В. В. Быстров — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

E. O. Neupokoeva — Trainee Researcher;

S. N. Malygina — Candidate of Science (Tech.), Research Fellow;

V. V. Bystrov — Candidate of Science (Tech.), Lead Research Fellow

Статья поступила в редакцию 18.10.2024; одобрена после рецензирования 05.11.2024; принята к публикации 11.11.2024.
The article was submitted 18.10.2024; approved after reviewing 05.11.2024; accepted for publication 11.11.2024.