

Научная статья
УДК 004.89, 005.4
EDN RDPYQB
DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).256-271



А.В. Родионов

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

С.В. Чупров

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Нечёткие модели в алгоритмах производственного и финансового менеджмента

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор развития теории нечётких множеств и её приложений в задачах производственного и финансового менеджмента. Показаны методологические предпосылки использования нечётко-множественной формализации при описании сложных социально-экономических систем и процессов принятия решений в условиях неполной, слабо структурированной и лингвистически заданной информации. Прослежена эволюция нечётких моделей от базовых построений Л.А. Заде до современных гибридных нейро-нечётких систем, интегрируемых с методами машинного обучения и глубокого обучения. Систематизированы ключевые направления применения нечётких моделей в менеджменте: описание поведения и классификация производственных систем, анализ финансово-экономических процессов, поддержка принятия решений, нечёткая оптимизация производственного планирования, экспертные и интеллектуальные системы. Показано, что наибольшая эффективность нечётких моделей проявляется в задачах, где наряду с количественными показателями существенную роль играют экспертные оценки, лингвистические переменные и трудно формализуемые ограничения. В качестве перспективных направлений выделены глубокие нейро-нечёткие архитектуры, предиктивное обслуживание, цифровые двойники и интеграция нечёткой логики в системы объяснимого искусственного интеллекта.

Ключевые слова. Искусственный интеллект, лингвистическая переменная, нечёткое множество, нечёткая логика, нечёткая модель, нечёткая оптимизация, нейро-нечёткая система, менеджмент.

Информация о статье. Дата поступления: 12 марта 2026 г.; дата принятия к публикации: 15 мая 2026 г.; дата онлайн-размещения: 29 июня 2026 г.

Original article

A.V. Rodionov

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

S.V. Chuprov

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

Fuzzy Models in Algorithms of Production and Financial Management

Abstract. The paper presents an analytical review of the development of fuzzy set theory and its applications to production and financial management. The methodological grounds for applying fuzzy-set formalization to the description of complex socio-economic systems and decision-making processes under incomplete, weakly structured, and linguistically expressed information are discussed. The evolution of fuzzy models is traced from L.A. Zadeh's foundational works to modern hybrid neuro-fuzzy systems integrated with machine learning and deep learning techniques. The review systematizes the main application areas of fuzzy models in management, including the description and classification of production systems, analysis of financial and economic processes, decision support, fuzzy optimization of production planning, and expert and intelligent systems. It is shown that fuzzy models are especially effective in tasks where expert judgments, linguistic variables, and poorly formalized constraints complement quantitative indicators. Promising directions for further research include deep neuro-fuzzy architectures, predictive maintenance, digital twins, and the integration of fuzzy logic into explainable artificial intelligence systems.

Keywords. Artificial intelligence, linguistic variable, fuzzy set, fuzzy logic, fuzzy model, fuzzy optimization, neuro-fuzzy system, management.

Article info. Received 12 March; Accepted 15 May, 2026; Available online 29 June, 2026.

Введение

Бурное вторжение концепции нечётких множеств испытали различные области науки и техники, среди которых и сфера экономики: расплывчатость знания об условиях среды побуждала аналитиков осмыслить применение перспективной теории в процессе анализа и разработки управленческих решений. Притягательность нечётких множеств объяснялась их возможностью формализовать неопределённость информационной среды, факторы которой были «окутаны туманом», а преследуемые цели отличались достаточной размытостью в воображении аналитиков и менеджеров. И поэтому неудивительно, что за шесть десятилетий после выхода первой публикации [1] по теории нечётких множеств она обогатилась новыми приложениями и дала жизнь оригинальным средствам анализа сложных систем и разработки решений.

Основоположник теории нечётких множеств американский математик Лотфи А. Заде (Lotfi A. Zadeh, 1921–2017) выдвинул принцип несовместимости, утверждающий, что «чем сложнее си-

стема, тем менее мы способны дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о её поведении. Для систем, сложность которых превосходит некоторый пороговый уровень, точность и практический смысл становятся почти исключаящими друг друга характеристиками»¹ [3, с. 7]. Доказательством этому служит наше стремление оперировать в плохо формализуемых ситуациях расплывчатыми категориями, не имеющими чётких границ, что не мешает нам понимать друг друга и принимать решения. Вот почему Л.А. Заде полагал, что точный количественный анализ не имеет, по-видимому, «большого практического значения в реальных социальных, экономических и других задачах, связанных с участием одного человека или группы людей» [3, с. 7].

Нелишне напомнить, что нечёткое множество отличается от обычного тем, что представляет класс объектов, в котором нет разграничительной линии между входящими и не входящими в него объектами. На этом основании нечёткое множество вводится через функцию принадлежности, значения которой указывают на степень принадлежности в единичном интервале $[0,1]$ объектов некоторой совокупности данному нечёткому множеству. Тем самым, если величина функции принадлежности минимальна (равна 0), то соответствующий ей объект не принадлежит нечёткому множеству. Но если величина функции прибавляет, то возрастает и степень принадлежности, и при её максимуме (равном 1) объект полностью принадлежит нечёткому множеству.

Непрерывный спектр значений функции принадлежности позволяет применить в качестве величин переменных не только числа, но и слова или предложения естественного или искусственного языка. Подобные переменные получили название лингвистических, значения которых не имеют строгих очертаний и благодаря этому позволяют описывать неопределённую обстановку (например, лингвистическая переменная «устойчивость предприятия» может иметь значения «хорошая», «нормальная», «удовлетворительная», «слабая», «критическая» и др., лишённые точных границ между собой). Обработывая эти сведения формальными приёмами, получают такие же приближенные выводы, вполне отвечающие нечёткости мышления человека.

В настоящее время тематика публикаций по теории нечётких множеств и её приложений чрезвычайно многообразна. В связи с этим авторы статьи видят свою цель в обзоре направлений применения нечётких моделей в задачах менеджмента, прежде всего анализа поведения производственных систем и поиска решений в них, не исчерпывая всего массива задач такого рода. Разумеется,

¹ Позднее Л.А. Заде конкретизировал свой постулат: сложность системы и точность её анализа, утверждал он, обратно пропорциональны в первом приближении [2, с. 10].

подобная группировка областей приложений тоже будет нечёткой, поскольку они не отделены друг от друга «перегородками» и будут естественным образом пересекаться между собой.

Принимая во внимание вызванную этим условность разделения сфер приложения нечётких множеств, можно назвать следующие направления их применения в производственном и финансовом менеджменте:

1. Описание поведения производственных систем, тесно связанное с формализацией их функционирования и проблемой адекватности отражения реальных условий работы.
2. Классификация производственных систем, в которой границы между смежными классами размыты, и потому переход от одного класса к другому естественно описывать с помощью функции принадлежности.
3. Анализ протекающих в производственных системах процессов в терминах нечётких выражений.
4. Поиск решений в процессе управления производственными системами в плохо определённой ситуации на базе специально сконструированных нечётких моделей.
5. Оптимизация решений традиционными методами в рамках нечётких представлений о критериях и ограничениях моделируемой производственной системы.
6. Решение эвристических задач менеджмента на базе применения экспертных систем и систем искусственного интеллекта

Эволюцию теории нечётких множеств можно проследить по содержанию публикаций. С зарождением нечётких множеств сначала превалировала сугубо теоретическая тематика, затем продвижение её идей сопровождалось разработкой инструментального аппарата и приложениями в ряде областей и, наконец, наступило время практической реализации алгоритмов нечётких моделей и их внедрения на предприятиях. Современный этап характеризуется интеграцией нечётких методов с технологиями искусственного интеллекта, машинного обучения и больших данных.

В нашей стране нечёткие множества привлекли к себе внимание широкого круга специалистов различного профиля. В Москве, Ленинграде, Новосибирске, Риге, Баку, Тбилиси, Таганроге и других городах стали складываться научные коллективы, принявшие деятельное участие в развитии теоретических, методологических и прикладных разделов теории нечётких множеств. Результаты разработок наших исследователей получили известность и высокую оценку не только на страницах отечественных, но и зарубежных изданий.

Первые публикации по теории нечётких множеств в 70-х гг. прошлого века были посвящены изложению её содержательных и формальных основ и мало касались прикладных аспектов новой

теории, что кстати дало повод для сомнений в ее состоятельности. Так, Н.Н. Моисеев и Ю.Б. Гермейер в своём предисловии к статье Л.А. Заде указывали «на спорность ряда конкретных предположений автора и на отсутствие пока практических примеров использования предлагаемого автором математического способа описания нечёткости» [4, с. 5]. Между тем акцент на исходные посылы и формальные начала был вполне резонным для молодой научной дисциплины, появившейся лишь в 1965 г.

Обрисует коротко сферы и характер примечательных приложений моделей теории нечётких множеств.

1. Описание поведения и классификации производственных систем

Очевидное преимущество нового математического языка заключалось прежде всего в возможности дать формализованное описание нечёткости информации, так как общепринятые количественные методы не располагали подходящими для этого приёмами. Только начиная с 1980-х гг. теория стала получать убедительное подкрепление от результатов практической реализации её методов и алгоритмов.

В историческом плане существенно, что «развитие теории размытых множеств в начале шестидесятых годов обязано большей частью своих исходных идей задачам, относящимся к распознаванию образов, в первую очередь анализу отношений сходства...» (Л.А. Заде, [5, с. 208]). Дифференцированность организации производственных систем находит выражение в их параметрах, среди которых сложность и длительность цикла изготовления продукции, тип организации и др. В частности, тип организации производства имеет шкалу от единичного до серийного и массового, причём границы между ними были по традиции чётко закреплены. Возникало противоречие между непрерывностью изменения типа в реальности и прерывностью установленной для него дискретной шкалы, состоящей из непересекающихся диапазонов. Отсюда для полноценного описания типа организации производственных систем уместно ввести сплошную меру без каких-либо разграничительных линий между смежными типами.

В результате производственная система характеризовалась меньшей или большей степенью принадлежности к единичному, серийному и массовому типам [6]. Методологическая проблема решения этих задач — корректный выбор функций принадлежности, поскольку их поиск и обоснование диктуются субъективными соображениями аналитика. Очевидно, доказательство пригодности конкретной функции должно опираться не только на содержательные доводы, но и на формально-логические приёмы. Окончательный же вывод об адекватности функций принадлежности опи-

сываемым объектам и процессам можно сделать лишь по итогам анализа их практического применения.

Аналогичные рассуждения справедливы и по отношению к другим параметрам производственной системы. Возвращаясь к оценке устойчивости предприятия, можно задать функцию, оценивающую степень принадлежности этого параметра к «хорошей», «нормальной», «удовлетворительной», «слабой», «критической» и другим градациям устойчивости. Такой многозначный подход лучше отражает ситуацию, особенно когда устойчивость предприятия находится в пограничной зоне (например, между «слабой» и «критической») и указать лишь на одну свойственную ей градацию вряд ли возможно.

Сложность производственных систем проявляет себя в том, что достаточно трудно (за редким исключением) приписать их определённому классу, поскольку в действительности они могут быть в той или иной мере отнесены к разным классам. В этой связи концепция и аппарат теории нечётких множеств были «восприняты» алгоритмами распознавания образов и кластер-анализа [5; 7]. Автоматическая классификация социально-экономических объектов приобретает достоверность и практичность, когда она основывается на предположении об условных, а не жёстких границах между классами.

Отказ от разделяющих соседние классы «барьеров» и построенное размытой классификации превалирует и в том случае, если классификационный признак становится параметром с непрерывностью своих значений какой-либо математической модели. Например, введение в модель формирования плана производства параметра типа организации производственной системы позволяет настроить модель на необходимый режим работы [8] и тем самым приблизить условия планирования к существующим в действительности.

2. Нечёткий анализ финансово-экономических процессов в промышленности

Нечёткие множества демонстрируют закономерное применение и при анализе экономических и финансовых процессов. Для финансового менеджмента характерны для ситуации, когда объектом оценки выступают риск, устойчивость, ликвидность, инвестиционная привлекательность или кредитоспособность — категории, часто описываемые экспертно и с использованием лингвистических шкал. Так, несмотря на возможность количественного представления, оценочные суждения о финансовом состоянии предприятия обычно формируются в терминах «высокая устойчивость», «умеренный риск», «достаточная ликвидность», «неблагоприятная динамика» и т.п. Нечёткая формализация позволяет перевести подобные характеристики в вычислимую форму без грубого упрощения их содержания и повысить качество и эффективность аналитической работы [9].

Нечёткие модели активно используются для оценки рисков, кредитоспособности заёмщиков, инвестиционной привлекательности проектов и прогнозирования банкротства [10]. Многокритериальные задачи принятия решений — такие как методы TOPSIS, VIKOR, АНР в нечёткой постановке — позволяют системно учитывать неопределённость экспертных оценок. Методы нечёткого анализа финансовых данных особенно востребованы в условиях волатильности рынков, когда детерминированные и стохастические модели оказываются недостаточно гибкими для отражения реальной ситуации.

3. Нечёткие модели принятия решений в управлении производством и финансами

Начало семидесятых годов XX в. было отмечено появлением публикаций, посвящённых применению алгоритмов теории нечётких множеств в задачах поиска решений и оптимизации. В 1970 г. вышла и стала популярной статья Р. Беллмана и Л. Заде «Принятие решений в расплывчатых условиях» [11] (у нас она была переведена в 1976 г.), в которой был изложен принципиально новый и изящный подход к поиску решения в нечёткой среде.

Оригинальность принципа Беллмана-Заде проявляется в простоте (по сравнению со стандартными методами) схемы принятия решения при расплывчатых целях и ограничениях. В таких условиях цели и ограничения описываются одинаковым способом, и тем самым стирается различие между ними: они рассматриваются как расплывчатые в пространстве альтернатив и предпочтительное решение представляет собой обычное логическое пересечение функций принадлежности всех целей и ограничений. Причём, многокритериальность в данном случае не сопровождается усложнением алгоритма, поскольку добавление дополнительных целей влечёт за собой лишь увеличение объёма вычислений.

Исследование возможностей приложения нечёткого подхода к теории систем и принятия решений предпринял румынский математик К. Негойцэ [12]. В этом контексте теория нечётких систем, по его мнению, представляет собой попытку понять самоорганизацию в неравновесных системах. С позиций качественной динамики систем К. Негойцэ обсуждает методы оптимального управления в нечёткой формулировке, рассматривая схемы нечёткого математического и робастного (грубого) программирования и многокритериальной оптимизации. Свои результаты он иллюстрирует на примере промышленности: планирования работы производственной системы с нечёткими целями и ограничениями и задачи распределения на заводе ресурсов времени и сырья.

Эвристический подход к календарному планированию производства предложен в статье Д.Б. Ринкса [13] с использованием

нечётких алгоритмов для планирования производительности и затрат рабочей силы, исходя из прогнозируемого спроса на выпускаемую продукцию. С помощью лингвистических переменных были описаны уровни рабочей силы и ее изменение, производительности, запасов готовой продукции и прогноза сбыта. На примере фабрики по производству красок автор показал достаточную эффективность такого приближенного метода, получив минимум затрат лишь на 5 % хуже, чем при обычном поиске экстремума функции и решении системы линейных уравнений.

Приложение теории нечётких множеств к управлению производством промышленных предприятий нашло отражение в книге М.И. Мельцера «Диалоговое управление производством (модели и алгоритмы)» [14]. Для среды трудно формализуемых и неформализуемых факторов автор разрабатывает языковые средства для ведения диалога с решающей системой, для чего прибегает к лингвистическим переменным как способу оперирования естественными словами и предложениями.

Пятнадцатилетний опыт применения теории нечётких множеств и её моделей к проблемам оптимизации и принятия решений был подведён в опубликованной в 1986 г. коллективной работе под редакцией Д.А. Поспелова [15]. В ней изложена общая точка зрения авторов на состояние работ в этой области и охарактеризованы нечёткие модели различных классов с большим списком тематической литературы. В продолжение темы монография [16] дала представление о направлениях исследований и приложений, прикладных алгоритмах анализа решений и программных средствах обработки нечёткой информации.

Добротным пособием для овладения техникой нечёткой математики стала монография А.Н. Борисова, О.А. Крумберга и И.П. Федорова «Принятие решений на основе нечётких моделей: Примеры использования» [17], написанная в стиле руководства для практического применения и насыщенная вычислительными реализациями нечётких моделей. Среди рассматриваемых в монографии условий принятия решений заслуживает внимания ситуация, когда состояния системы известны неточно и также неточно определены полезности решений в различных её состояниях.

Методологические и прикладные аспекты применения нечётких множеств раскрываются в книге Р.А. Алиева, А.Э. Церковного и Г.А. Мамедовой «Управление производством при нечёткой исходной информации» [18] с резюмированием исследовательского материала и опыта управления промышленными объектами. Эта книга, по-видимому, одна из первых отечественных публикаций, в которых реализация нечётких моделей доведена до программных разработок и внедрения в производстве.

Формальный аппарат нечётких множеств вошёл и в учебную литературу. Например, в известном курсе теории экономического анализа рассматривается задача планирования перспективного ассортимента оптового предприятия в одном товарном профиле при фиксированной торговой зоне [19, с. 184–190]. Принимая во внимание нечёткий характер соответствия свойств товаров как признакам, так и требованиям торговых предприятий, алгоритм задачи позволяет найти выгодный ассортимент товаров с учётом значения (веса) этих предприятий для оптового поставщика.

В учебнике [20] описывается схема поиска предпочтительного решения в многокритериальной задаче методом максиминной свёртки на примере сферы банковского кредитования. Такой метод применяется в том случае, когда необходимо выбрать решение, в наибольшей степени отвечающее ряду критериев одновременно. При этом каждому решению соответствует нечёткое множество — формализованное описание степени его удовлетворения всем критериям.

4. Нечёткая оптимизация производственного планирования и её современное развитие

Богатый спектр задач нечёткой оптимизации теперь мотивировал советских математиков [21; 22]. овладевать каноническими схемами математического программирования в терминах нечётких множеств. Подход к традиционным оптимизационным задачам с позиций нечётких множеств придаёт процессу поиска решения больше универсальности и гибкости, поскольку позволяет обойти жёсткость ограничений и допустить в заданной мере их расплывчатость. Благодаря этому удаётся регулировать степень несовместимости накладываемых ограничений и обеспечить приемлемую согласованность неравенств.

Подобный алгоритм реализован в задаче линейной оптимизации, параметрами которой служат весовые коэффициенты, указывающие на важность соответствующих ограничений, и мера их размытости [23]. Постановка является обобщением обычной задачи математического программирования с линейной целевой функцией и строгими ограничениями и сводится к ней в частном случае. В практике планирования деятельности предприятий гибкая линейная оптимизация может служить средством нахождения предпочтительной программы производства изделий в ситуации, когда запас ресурсов известен неточно или может варьировать в диапазоне с размытыми границами [8].

Обсуждение нечётких постановок задач математического программирования приводится в работе [15], в том числе изложены модели со «смягчением» накладываемых ограничений, с нечёткими коэффициентами и др.

В современных исследованиях нечёткая оптимизация прогрессирует в ряде профильных нечётко-множественных областей. Во-первых, расширился класс используемых нечетких чисел: наряду с треугольными и трапецеидальными нечёткими числами применяются интуиционистские, пифагоровы и нейтрософские нечёткие множества, позволяющие моделировать не только неопределённость значений параметров, но и степень уверенности аналитика в своих оценках. Во-вторых, нечёткое математическое программирование интегрируется с эволюционными и метаэвристическими алгоритмами (генетическими алгоритмами, методами роя частиц) с решением многомерных задач с нечёткими целями и ограничениями, не поддающихся аналитическим методам. В-третьих, нечёткая оптимизация находит растущее применение в задачах управления цепочками поставок, логистики и календарного планирования в условиях Индустрии 4.0, когда неопределённость спроса, сроков поставки и качества ресурсов требуют адекватных инструментов формализации [24; 25].

5. Нечёткие модели и искусственный интеллект в менеджменте

Перспективы развития теории нечётких множеств и её модельных приложений ныне связаны с созданием экспертных систем и систем искусственного интеллекта, накапливающих знания и предлагающих решение трудно формализуемых проблем, в частности, в промышленности.

В развитие идей нечётких множеств Д. Дюбуа и А. Прад для целей представления знаний в информатике аргументировали свой подход к анализу неопределённости, мер возможности и необходимости [26]. В рамках теории возможностей они обосновали её приложение к экспертным системам, реляционным базам знаний и приближённым рассуждениям. К 20-летию введения профессором Л.А. Заде понятия нечётких множеств было представлено издание, освещающее состояние теории нечётких множеств и возможностей: к тому времени было опубликовано уже более 3000 статей, посвящённых теоретическим и прикладным вопросам нечётких множеств [27].

Экспертные системы с нечёткой логикой получили быстрое распространение, в частности, для классификации, анализа риска и информационного поиска [28]. Среди экспертных систем для производственного планирования — ROME, выполняющая анализ ресурсов при долгосрочном планировании, и IMS для реализации календарного планирования [29]. Причём, последняя на основе данных о заказах и их изменении формирует график выполнения каждого заказа и его возможные коррекции для погашения сбоев в управлении. Наряду с характеристикой этих систем и значительной библиографией авторы [29] представили разработку

роботов-сортировщиков для Сумгаитского алюминиевого завода с использованием системы искусственного интеллекта (интеллектуальных роботов) для отбраковки изделий на потоке.

Принципиально новым направлением стало развитие глубоких нейро-нечётких систем (Deep Neuro-Fuzzy Systems, DNFS), объединяющих способности глубоких нейронных сетей к извлечению признаков из больших объёмов данных с интерпретируемостью и прозрачностью нечётких правил вывода. Системы типа ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) и их глубокие модификации демонстрируют высокую эффективность в задачах прогнозирования, классификации и управления [30]. В 2024 г. была предложена глубокая свёрточная нейро-нечёткая система вывода (DCNFIS), обеспечивающая точность, сопоставимую с классическими свёрточными нейронными сетями, при существенно более высокой интерпретируемости решений [31].

Обширным полем приложений нечёткой логики становится концепция Индустрии 4.0 и интеллектуального производства (Smart Manufacturing). Нечёткие методы и модели применяются для предиктивного обслуживания промышленного оборудования, где нечёткие контроллеры интегрируются с системами машинного обучения для оптимизации сроков технического обслуживания в условиях неопределённости сенсорных данных [32]. В управлении цепочками поставок нечёткие модели учитывают неопределённость спроса, темпов порчи продукции и колебания рыночных условий [24].

Актуальным трендом является интеграция нечетких методов с концепцией объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI, XAI). Глубокие нейронные сети при всей их эффективности порицают за непрозрачность — характеристику «чёрного ящика». Нечеткая логика, оперирующая лингвистическими правилами вида «ЕСЛИ..., ТО...», представляет собой естественный инструмент повышения прозрачности моделей искусственного интеллекта. Гибридные архитектуры, сочетающие глубокое обучение с нечётким выводом, позволяют генерировать интерпретируемые объяснения принятых решений, что критически важно для доверия к автоматизированным системам в производственном и финансовом менеджменте [25].

Заключение

Анализ рассмотренных направлений позволяет сделать три вывода. Во-первых, нечёткие модели наиболее эффективны там, где данные не являются полностью точными, а существенная часть знания задаётся экспертно. Во-вторых, для производственного менеджмента наибольшую ценность представляют нечёткая оптимизация, календарное планирование, диагностика и экспертные системы. В-третьих, для финансового менеджмента на первый план выходят задачи оценки риска, устойчивости, кредито-

способности и инвестиционной привлекательности. Современный этап развития связан не столько с изолированным применением классической нечёткой логики, сколько с её гибридизацией с нейросетевыми и обучающимися архитектурами

В завершение обзора следует отметить, что теория нечётких множеств прошла путь от фундаментальной концепции описания размытых границ и лингвистически выраженной неопределённости до развитого инструментария моделирования и поддержки принятия решений в управлении. Для производственного менеджмента её особая ценность состоит в возможности более адекватно описывать сложные системы, осуществлять нечёткую классификацию, строить модели планирования и оптимизации в условиях неполной информации, а также разрабатывать интеллектуальные экспертные контуры управления. Для финансового менеджмента нечёткие модели важны как средство интеграции количественных показателей и экспертных оценок в задачах анализа риска, устойчивости, инвестиционного выбора и диагностики финансового состояния. Современный этап развития нечётких моделей характеризуется их активной интеграцией с технологиями искусственного интеллекта, прежде всего с машинным обучением, глубокими нейронными сетями и средствами объяснимого искусственного интеллекта. Благодаря сочетанию интерпретируемости и вычислительной адаптивности нечёткие модели сохраняют методологическую и практическую значимость в исследованиях и приложениях, ориентированных на цифровую трансформацию промышленности и экономики. Таким образом, потенциал нечётко-множественного подхода в алгоритмах производственного и финансового менеджмента не исчерпан. Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований представляются разработка глубоких нейро-нечётких архитектур, интеграция нечёткой логики в цифровые двойники производственных систем, развитие explainable AI на базе нечётких правил и построение гибридных моделей поддержки решений для задач высокоуровневого управления.

Список использованной литературы

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets / L.A. Zadeh // Information and Control. — 1965. — Vol. 8. — P. 338–353.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. — Москва : Мир, 1976. — 165 с.
3. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л.А. Заде // Математика сегодня. — Москва : Знание, 1974. — С. 5–49.
4. Моисеев Н.Н. Предисловие / Н.Н. Моисеев, Ю.Б. Гермейер // Математика сегодня. — Москва : Знание, 1974. — С. 3–5.
5. Заде Л.А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе / Л.А. Заде // Классификация и кластер. — Москва : Мир, 1980. — С. 208–247.

6. Чупров С.В. Типология производственных систем при нечётких представлениях о степени однородности и регулярности их деятельности / С.В. Чупров // Экономические проблемы научно-технического прогресса в машиностроении : сб. науч. тр. — Иркутск, 1988. — С. 150–156.

7. Елисеева И.И. Группировка, корреляция, распознавание образов (Статистические методы классификации и измерения связей) / И.И. Елисеева, В.О. Рукавишников. — Москва : Статистика, 1977. — 143 с. — EDN TLVAKX.

8. Чупров С.В. Формирование плана производства машиностроительного предприятия в размытых ограничениях / С.В. Чупров // Роль научно-технического прогресса в интенсификации машиностроения области : тез. докл. — Иркутск, 1987. — С. 18–19.

9. Лукасевич И.Я. Моделирование процессов анализа финансового положения предприятий в условиях рынка / И.Я. Лукасевич. — EDN SBHNYT // Финансы. — 1993. — № 3. — С. 49–52.

10. Недосекин А.О. Нечётко-множественный анализ рисков фондовых инвестиций / А.О. Недосекин. — Санкт-Петербург, 2002. — 181 с.

11. Bellman R.E. Decision-Making in a Fuzzy Environment / R.E. Bellman, L.A. Zadeh // Management Science. — 1970. — Vol. 17, no. 4. — P. 141–164.

12. Негойцэ К. Применение теории систем к проблемам управления / К. Негойцэ: пер. с англ. — Москва : Мир, 1981. — 182 с.

13. Ринкс Д.Б. Эвристический подход к обобщённому календарному планированию производства с использованием лингвистических переменных: методология и применение / Д.Б. Ринкс // Нечёткие множества и теория возможностей. Последние достижения : сб. статей / под ред. Р.Р. Ягера. — Москва, 1986. — С. 349–370.

14. Мельцер М.И. Диалоговое управление производством (модели и алгоритмы) / М.И. Мельцер. — Москва : Финансы и статистика, 1983. — 240 с.

15. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун [и др.]; под ред. Д.А. Поспелова. — Москва : Наука, 1986. — 312 с.

16. Обработка нечёткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева [и др.]. — Москва : Радио и связь, 1989. — 304 с.

17. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечётких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. — Рига : Зинатне, 1990. — 184 с.

18. Алиев Р.А. Управление производством при нечёткой исходной информации / Р.А. Алиев, А.Э. Церковный, Г.А. Мамедова. — Москва : Энергоатомиздат, 1991. — 240 с.

19. Баканов М.И. Теория экономического анализа / М.И. Баканов, А.Д. Шеремет. — 4-е изд. — Москва : Финансы и статистика, 1997. — 414 с.

20. Андрейчиков А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчиков. — Москва : Финансы и статистика, 2000. — 368 с.

21. Орлов А.И. Задачи оптимизации и нечёткие переменные / А.И. Орлов. — Москва : Знание, 1980. — 64 с.

22. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечёткой исходной информации / С.А. Орловский. — Москва : Наука, 1981. — 208 с.

23. Шер А.П. Решение задачи математического программирования с линейной целевой функцией в размытых ограничениях / А.П. Шер // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 7. — С. 137–143.

24. De S.K. Influence of a Cloudy Fuzzy Environment for Deteriorating Products with Ramp-Type Demand under a Supply Chain Management / S.K. De, S.K. Mahato // Humanities and Social Sciences Communications. — 2025. — Vol. 12. — Art. 1017.

25. Kahraman C. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: a Comprehensive Review of Concepts, Trends, and Applications / C. Kahraman // *International Journal of Physics*. — 2025. — Vol. 7, iss. 2. — P. 12–29.
26. Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. — Москва : Радио и связь, 1990. — 288 с.
27. Нечёткие множества и теория возможностей. Последние достижения / под ред. Р.Р. Ягера. — Москва : Радио и связь, 1986. — 408 с.
28. Убейко В.М. Экспертные системы / В.М. Убейко, В.В. Убейко. — Москва : Изд-во МАИ, 1992. — 83 с.
29. Алиев Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р.А. Алиев, Н.М. Абдикеев, М.М. Шахназаров. — Москва : Радио и связь, 1990. — 264 с. — EDN TMAMKL.
30. Acharjee T. Deep Neuro-Fuzzy System Application Trends, Challenges, and Future Perspectives: a Systematic Survey / T. Acharjee, S. Borah, P. Dutta, W.S. Yap // *Artificial Intelligence Review*. — 2022. — Vol. 55, no. 7. — P. 5015–5066.
31. Yeganejou M. DCNFIS: Deep Convolutional Neuro-Fuzzy Inference System / M. Yeganejou., S. Dick, J. Miller // *Expert Systems with Applications*. — 2024. — Vol. 240. — Art. 122593.
32. Feng J. A Novel Multi-Objective Fuzzy Deep Learning Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things / J. Feng, J. Kan // *IEEE Access*. — 2025. — Vol. 13. — P. 41955–41973.

References

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
2. Zade L.A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Making Approximate Decisions. *Information Sciences*, 1975, no. 8, pp. 199–249. (Russ. ed.: Zade L.A. *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Making Approximate Decisions*. Moscow, Mir Publ., 1976. 165 p.).
3. Zade L.A. Fundamentals of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision-Making Processes. *Mathematics Today*. Moscow, Znanie, 1974, pp. 5–49.
4. Moiseev N.N., Germeier Yu.B. Preface. *Mathematics Today*. Moscow, Znanie Publ., 1974, pp. 3–5.
5. Zade L.A. Fuzzy sets and their application in pattern recognition and cluster analysis. *Classification and cluster*. Moscow, Mir Publ., 1980, pp. 208–247.
6. Chuprov S.V. A typology of production systems with unclear notions of the degree of homogeneity and regularity of their activities. *Economic problems of scientific and technological progress in mechanical engineering. Collected Papers*. Irkutsk, 1988, pp. 150–156. (In Russian).
7. Eliseeva I.I., Rukavishnikov V.O. *Grouping, correlation, pattern recognition (Statistical methods for classification and measurement of relationships)*. Moscow, Statistika Publ., 1977. 143 p. EDN: TLVAKX.
8. Chuprov S.V. Formulating a production plan for a mechanical engineering enterprise under fuzzy constraints. *The role of scientific and technological progress in intensifying the region's mechanical engineering industry. Collected Papers*. Irkutsk, 1987, pp. 18–19. (In Russian).
9. Lukasevich I.Ya. Modeling of processes for analyzing the financial position of enterprises in market conditions. *Finansy = Finance*, 1993, no. 3, pp. 49–52. (In Russian). EDN: SBHKYT.
10. Nedosekin A.O. *Fuzzy-set analysis of stock investment risks*. Saint Petersburg, 2002. 181 p.
11. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 141–164.

12. Negoitseh K. *Manogement Applications of System Theory*. Bazel; Stuttgart, Birkhäuser, 1979. 152 p. (Russ. ed.: Negoitseh K. *Application of systems theory to control problems*. Moscow, Mir Publ., 1981. 182 p.).
13. Rinks D.B. A heuristic approach to generalized production scheduling using linguistic variables: methodology and application. Yager R.R. (ed.). *Fuzzy sets and possibility theory. Recent advances. Collected Papers*. Moscow, 1986, pp. 349–370. (In Russian).
14. Mel'tser M.I. *Dialogue control of production (models and algorithms)*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983. 240 p.
15. Averkin A.N., Batyrshin I.Z., Blishun A.F. [et al.]; Pospelov D.A. (ed.). Moscow, Nauka Publ., 1986. 312 p.
16. Borisov A.N., Alekseev A.V., Merkur'eva G.V. [et al.]. *Processing fuzzy information in decision-making systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 304 p.
17. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Decision Making with Fuzzy Models: Use Cases*. Riga, Zinatne Publ., 1990. 184 p.
18. Aliev R.A., Tserkovnyi A.Eh., Mamedova G.A. *Production management with fuzzy initial information*. Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 1991. 240 p.
19. Bakanov M.I., Sheremet A.D. *Theory of economic analysis*. 4th ed. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1997. 414 p.
20. Andreichikov A.V., Andreichikov O.N. *Analysis, synthesis, and planning of decisions in economics*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2000. 368 p.
21. Orlov A.I. *Optimization problems and fuzzy variables*. Moscow, Znanie Publ., 1980. 64 p.
22. Orlovskii S.A. *Problems of decision-making with fuzzy initial information*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 208 p.
23. Sher A.P. Solving a mathematical programming problem with a linear objective function under fuzzy constraints. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemekhanics*, 1980, no. 7, pp. 137–143. (In Russian).
24. De S.K., Mahato S.K. Influence of a Cloudy Fuzzy Environment for Deteriorating Products with Ramp-Type Demand under a Supply Chain Management. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2025, vol. 12, art. 1017.
25. Kahraman C. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: a Comprehensive Review of Concepts, Trends, and Applications. *International Journal of Physics*, 2025, vol. 7, iss. 2, pp. 12–29.
26. Dubois Didier, Prade Henri. *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York, Plenum Press, 1988. 263 p. (Russ. ed.: Dyubua D., Prad A. *Capability Theory: Applications to Knowledge Representation in Computer Science*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 288 p.).
27. Yager R.R. (ed.). *Fuzzy Sets and Possibility Theory: Recent Advances*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 408 p.
28. Ubeiko V.M., Ubeiko V.V. *Expert systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1992. 83 p.
29. Aliev R.A., Abdikeev N.M., Shakhnazarov M.M. *Artificial Intelligence-Powered Manufacturing Systems*. Moscow, MAI Publ., 1990. 264 p. EDN: TMAMKL.
30. Acharjee T., Borah S., Dutta P., Yap W.S. Deep Neuro-Fuzzy System Application Trends, Challenges, and Future Perspectives: a Systematic Survey. *Artificial Intelligence Review*, 2022, vol. 55, no. 7, pp. 5015–5066.
31. Yeganejou M., Dick S., Miller J. DCNFIS: Deep Convolutional Neuro-Fuzzy Inference System. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 240, art. 122593.
32. Feng J.A., Kan J. Novel Multi-Objective Fuzzy Deep Learning Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things. *IEEE Access*, 2025, vol. 13, pp. 41955–41973.

Информация об авторах

Родионов Алексей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, 664003, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: avr-v@yandex.ru.

Чупров Сергей Витальевич — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента и сервиса, Байкальский государственный университет, 664003, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: ChuprovSV@yandex.ru.

Information about the Authors

Alexey V. Rodionov — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, 11 Lenin Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation, e-mail: avr-v@yandex.ru.

Sergey V. Chuprov — D.Sc. in Economics, Professor, Department of Management and Service, Baikal State University, 11 Lenin Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation, e-mail: ChuprovSV@yandex.ru.

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.

Для цитирования

Родионов А.В. Нечёткие модели в алгоритмах производственного и финансового менеджмента / А.В. Родионов, С.В. Чупров. — DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).256-271. — EDN RDPYQB // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2026. — Т. 8, № 2. — С. 256–271.

For Citation

Rodionov A.V., Chuprov S.V. Fuzzy Models in Algorithms of Production and Financial Management. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2026, vol. 8, no. 2, pp. 256–271. (In Russian). EDN: RDPYQB. DOI: 10.17150/2713-1734.2026.8(2).256-271.