УДК 004.8:519.816:504.06
DOI 10.17513/snt.40929

CC BY 4.0

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ К ДЕКАРБОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И НЕЧЕТКОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Морковкин Д. Е. ORCID ID 0000-0002-5372-8519,
Перская В. В. ORCID ID 0000-0002-1988-4374,
Страхов И. А. ORCID ID 0009-0008-7277-9910

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Российская Федерация, e-mail: 9154007013@mail.ru

Переход промышленности к низкоуглеродному развитию требует средств сопоставления отраслей при разнородных шкалах измерения, неполноте данных и официально признаваемой погрешности исходной статистики. Цель исследования состоит в разработке и апробации метода оценки технологической готовности отраслей промышленности России к декарбонизации, понимаемой как движение к углеродной нейтральности, в котором неопределенность исходных данных не устраняется, а формализуется методами искусственного интеллекта. Использованы данные государственной статистики за 2020–2025 годы по шестнадцати видам экономической деятельности и национального доклада о кадастре антропогенных выбросов. Построена система из восьми количественных критериев, значения представлены треугольными нечеткими числами, границы которых калиброваны по опубликованным оценкам неопределенности национальной системы инвентаризации и по фактическому размаху межгодовой вариации показателей. Веса критериев определены объективным методом на основе контраста и взаимной конфликтности, агрегирование проведено средствами нечеткого многокритериального анализа, а типы отраслей выделены методом нечетких средних, относящимся к обучению без учителя. Построено ранжирование отраслей промышленности по готовности к углеродно-нейтральному переходу, выделены три класса готовности и два типа профиля. Проведена верификация, включающая сопоставление с четкими методами упорядочения и компромиссного ранжирования, вариацию весов, замену вида функций принадлежности и испытание на обращение порядка при изменении состава сравниваемых отраслей. Установлено, что классическая схема нормирования допускает обращение порядка, тогда как предложенная модификация с фиксированной базой нормирования его не допускает ни в одном из испытаний с неизменными весами. Метод реализован в виде программного комплекса на языке Python с фиксированным начальным состоянием генератора псевдослучайных чисел, устойчивость разбиения на типы подтверждена бутстрэпом. Авторы пришли к выводу, что в пределах рассмотренной выборки метод дает устойчивое ранжирование, а монотонной связи между типом профиля и уровнем готовности не обнаружено. Доказаны инвариантность схемы с фиксированной базой к составу сравниваемого множества, липшицева устойчивость показателя к возмущению весов и точность интервального распространения неопределенности по α-срезам, на которой построен численный метод оценки достоверности упорядочения; инвариантность подтверждена серией из тысячи случайных наборов данных. Внешняя валидация по натурным данным о выбросах загрязняющих веществ показала отрицательную связь готовности с изменением удельных выбросов ($\rho = -0{,}51$, $p = 0{,}054$).

Ключевые слова: декарбонизация, углеродная нейтральность, промышленность, технологическая готовность, нечеткое множество, нечеткая кластеризация методом c-средних, многокритериальный анализ, искусственный интеллект, устойчивость ранжирования, программный комплекс, воспроизводимость, α-срез, внешняя валидация

ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL READINESS OF RUSSIAN INDUSTRIAL SECTORS FOR DECARBONIZATION BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS AND FUZZY MULTI-CRITERIA ANALYSIS

Morkovkin D. E. ORCID ID 0000-0002-5372-8519,
Perskaya V. V. ORCID ID 0000-0002-1988-4374,
Strakhov I. A. ORCID ID 0009-0008-7277-9910

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation, e-mail: 9154007013@mail.ruAbstract

The low-carbon transition of industry requires means of comparing sectors under heterogeneous measurement scales, incomplete data and an acknowledged margin of error in the source statistics. The aim of the study is to develop and test a method for the assessment of the technological readiness of Russian industrial sectors for decarbonization understood as movement towards carbon neutrality, in which the uncertainty of the source data is not eliminated but formalized by artificial intelligence methods. Data of state statistics for 2020–2025 on sixteen economic activities and of the national inventory report of anthropogenic emissions were used. A system of eight quantitative criteria was built, its values being triangular fuzzy numbers calibrated against the published uncertainty estimates of the national inventory system and the actual range of interannual variation. Criteria weights were

determined by an objective method based on contrast and mutual conflict, the aggregation was performed by fuzzy multi-criteria analysis, and sector typification by the fuzzy c-means method of unsupervised learning. A ranking of industrial sectors by readiness for the carbon-neutral transition was constructed, three readiness classes and two profile types were identified. Verification included comparison with crisp ordering and compromise ranking, weight variation, replacement of membership functions, and a test for order reversal under a changing set of sectors. The classical normalization scheme was found to admit order reversal, whereas the proposed modification with an fixed normalization base produced no reversal in any of the fixed-weight tests. The method is implemented as a Python software package with a fixed random seed, and the stability of the partition is confirmed by bootstrap. Within the sample considered the method yields a stable ranking, while no monotonic relationship between the profile type and the readiness level was detected. Invariance of the fixed-base scheme to the composition of the compared set, Lipschitz stability of the index to weight perturbation and exactness of interval propagation of uncertainty over α-cuts are proved, the latter underlying a numerical method for assessing ranking reliability; invariance is confirmed on a series of one thousand random data sets. External validation against actual pollutant emission data showed a negative relationship between readiness and the change in specific emissions ($\rho = -0.51$, $p = 0.054$).

Keywords: decarbonization, carbon neutrality, industry, technological readiness, fuzzy set, fuzzy c-means clustering, multi-criteria analysis, artificial intelligence, ranking stability, software package, reproducibility, α-cut, external validation

Введение

Управление переходом промышленности к углеродной нейтральности ставит многокритериальную задачу. Набор технологий сокращения выбросов для разных отраслей различен [1], а соотношение между сокращением выбросов и приспособлением к климатическим изменениям остается предметом обсуждения [2; 3]. Отрасли различаются по составу выбросов, состоянию фондов и финансовым возможностям, шкалы несовместимы, часть данных отсутствует, а статистика выбросов публикуется с признаваемой погрешностью, для отдельных категорий источников достигающей десятков процентов. Оценки сроков и стоимости перехода у разных аналитических центров при этом также расходятся [4]. Скалярная оценка теряет ту информацию, которая определяет решение, поскольку одинаковый балл отвечает противоположным конфигурациям частных характеристик.

Сложившиеся подходы для этой задачи ограниченны. Шкала уровней технологической готовности [5] и ее отечественная адаптация к отбору проектов [6] описывают отдельную технологию, а не отрасль. Композитные показатели [7] в типичной реализации агрегируют точечные значения, и погрешность исходных данных в итоговой оценке при этом не отображается, хотя анализ ее робастности возможен отдельной процедурой, а модели зрелости производственных систем [8; 9] на официальной статистике не воспроизводятся.

Методы на нечетких множествах [10; 11] позволяют смягчить это ограничение, поскольку представляют величину интервалом и переносят его до итогового показателя, хотя и ценой дополнительных допущений о форме функции принадлежности. Наряду с методами многокритериального выбора [12] и нечеткой кластеризацией [13] они относятся к мягким вычислениям, то есть к методам искусственного интеллекта для приближенных и неполных данных. Отечественные решения на том же аппарате известны [14; 15]. Применялись они, однако, к выбору технологий, поставщиков и проектов [16; 17; 18]. В энергетике ими оценивались возобновляемые источники, причем полигоном служили Турция [19] и Индия [20]. Той же схемой изучались технологии производства водорода [21], системы улавливания углерода [22] и накопители энергии [23]. Исследованы также барьеры низкоуглеродного перехода [24] и поддержка политики низкоуглеродных технологий [25]. Объектом всюду выступают отдельные технологии, проекты или поставщики зарубежных экономик, тогда как сопоставление отраслей промышленности России в такой постановке не выполнялось.

Нерешенными остаются две проблемы. Параметры функций принадлежности задаются экспертно и внешнего основания не имеют, хотя национальная система инвентаризации публикует оценки неопределенности по категориям, а последовательные редакции кадастра дают фактическую нестабильность оценок. Мешает и вычислительное свойство классического метода упорядочения по сходству с идеальным решением, который нормирует значения на экстремумы самого сравниваемого множества, из-за чего изменение состава отраслей переставляет местами альтернативы, которых оно не касалось.

Цель исследования – разработка метода оценки технологической готовности отраслей промышленности к декарбонизации на основе методов искусственного интеллекта, включающего: правило калибровки параметров нечетких чисел по двум независимым внешним основаниям; процедуру нормирования, инвариантную к составу сравниваемого множества альтернатив; процедуру типизации отраслей средствами обучения без учителя; протокол верификации устойчивости получаемого упорядочения;

аналитическое обоснование свойств схемы нормирования и численный метод оценки достоверности упорядочения по α-срезам; программную реализацию метода в виде воспроизводимого комплекса, а также апробацию и внешнюю валидацию метода на данных государственной статистики Российской Федерации.

Исследовательский вопрос состоит в том, допускает ли отраслевая статистика с признаваемой погрешностью построение упорядочения, устойчивого к вариации весов и к изменению состава сравниваемых отраслей. Проверяются три положения.

1. Упорядочение, полученное на нечетких числах, сохраняется при вариации весов в пределах, отвечающих неопределенности их оценивания.

2. Замена нормирующих величин на фиксированную базу, не пересчитываемую при изменении состава совокупности, снижает число случаев обращения порядка.

3. Форма профиля частных оценок несет информацию, не выводимую из уровня интегрального показателя. Построение показателя, его проверка и содержательное истолкование разнесены далее по отдельным подразделам.

Материалы и методы исследования

При построении критериальной системы оценки технологической готовности отраслей промышленности России к декарбонизации и углеродно-нейтральному переходу использованы ряды государственной статистики за 2020–2025 годы[1], формы статистического наблюдения о текущих затратах на охрану окружающей среды[2] и данные национального доклада о кадастре антропогенных выбросов[3]. Основу вычислительной схемы образуют методы искусственного интеллекта в части мягких вычислений. Исходные величины формализованы треугольными нечеткими числами, веса критериев получены объективным методом на основе контраста и взаимной конфликтности [26] с контролем по экспертной схеме парных сравнений [27]. Из семейства методов нечеткого многокритериального анализа [12; 28] при агрегировании применен метод упорядочения по сходству с идеальным решением [29]. Для сопоставления привлечены его четкий вариант и метод компромиссного ранжирования [30]. Типизация выполнена методом нечетких средних с контролем качества разбиения по коэффициенту разбиения, энтропии и индексу Се и Бени, верификация проведена ранговой корреляцией Спирмена, конкордацией Кендалла и методом статистических испытаний. Вычисления выполнены авторским программным комплексом на языке Python, описанным в разделе о программной реализации, с независимым контрольным пересчетом в книге электронных таблиц.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка технологической готовности к декарбонизации выполняется по разнородным сведениям о состоянии производственного аппарата, о природоохранной практике и о финансовом положении вида экономической деятельности. По Дж. Манкинсу, готовность есть измеряемая характеристика зрелости, а шкала готовности есть систематическая измерительная система, поддерживающая оценку зрелости конкретной технологии [5]. При таком подходе единицей оценки выступает отдельная технология, а состояние описывается стадией жизненного цикла. Перенос на отрасль требует смены единицы оценки, поскольку отрасль объединяет производства разной зрелости и описывается не стадией, а совокупностью показателей.

На основе этого подхода авторами сформулировано следующее понятие технологической готовности отрасли промышленности к декарбонизации. Под ней понимается сложившееся сочетание производственных, воспроизводственных, природоохранных и финансовых характеристик вида экономической деятельности, определяющее возможность движения отрасли к углеродной нейтральности без изменения профиля выпуска. Декарбонизация выступает здесь процессом, а углеродная нейтральность его конечным состоянием, при котором выбросы парниковых газов уравновешиваются поглощением. Определение задает четыре компоненты оценки и переводит задачу в многокритериальную постановку.

[1] Промышленное производство в России. 2025: статистический сборник / Федеральная служба государственной статистики. Москва: Росстат, 2025. Табл. 1.12, 3.3, 3.5, 5.4, 7.3, 9.4, 10.8, 10.10, 10.11. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prom_2025.pdf (дата обращения: 08.08.2026).

[2] Сведения о текущих затратах на охрану окружающей среды и экологических платежах (форма № 4-ОС) за 2020–2025 годы // Федеральная служба государственной статистики. Москва, 2026. Бюллетени за 2020–2025 годы, таблица «Текущие (эксплуатационные) затраты на охрану окружающей среды по видам экономической деятельности», графа 2 «на охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата». URL: https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13295 (дата обращения: 08.08.2026).

[3] Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2023 гг. Часть 1 / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. Москва, 2025. Табл. Р. 2, 4.1; п. 3.2.5.2; рис. 3.16; Приложение II. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RUS_NIR_2025_v1_rev_2025-04-18.pdf (дата обращения: 08.08.2026).

Авторами заданы множество альтернатив $A = \{a_1,\ldots,a_m\}$ мощности $m = 16$, множество критериев $C = C^+ \cup C^-$ мощности $n = 8$, где C^+ объединяет максимизируемые, а C^- минимизируемые критерии, и матрица $X = [x_{ij}]_{m\times n}$, элементы которой известны с погрешностью. Требуется построить отображение $F:(X,W)\to R$, где $W = (w_1,\ldots,w_n)$ при условии

$$\sum_j w_j = 1,$$

а R означает упорядочение альтернатив по интегральному показателю готовности $CC_i \in [0;1]$, устойчивое к вариации весов, к виду функций принадлежности и к изменению состава множества A. Сформулированная многокритериальная задача решается средствами искусственного интеллекта, поскольку признанная погрешность исходных рядов требует аппарата, работающего с приближенными величинами. Общая схема разработанного метода оценки технологической готовности к декарбонизации приведена на рисунке 1. Она объединяет пять последовательных блоков и контур корректировки параметров по результатам верификации.

Объектом оценки выступают 16 видов экономической деятельности промышленности России, наименования которых приведены в таблице 3.

Отобранные критерии охватывают четыре компоненты технологической готовности к декарбонизации. Это технологическая база производства, состояние и обновление основных фондов, фактическая природоохранная деятельность и финансовая способность ее поддерживать. Состав системы приведен в таблице 1.

Стоимостные показатели таблицы 1 нормированы на объем отгруженных товаров собственного производства. Критерий K_7 характеризует фактическую полноту улавливания загрязняющих атмосферу веществ и тем самым состояние газоочистной инфраструктуры отрасли. Прямым измерителем готовности к улавливанию диоксида углерода этот критерий не является и в такой роли далее не используется.

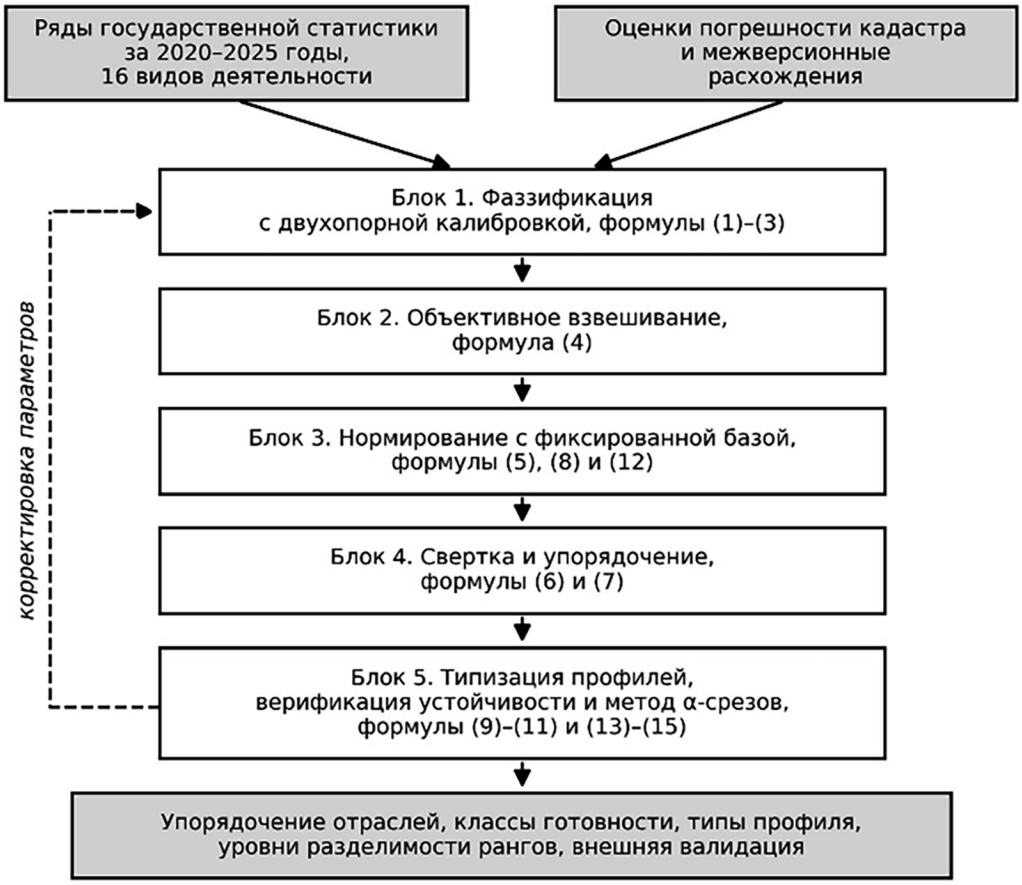


Рис. 1. Схема метода оценки технологической готовности отраслей промышленности к декарбонизации
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Система критериев оценки технологической готовности

Обозначение	Содержание	Единица	Направление	Годы
K_2	Электроемкость выпуска	кВт·ч / тыс. руб.	min	2020–2024
K_4	Степень износа основных фондов	%	min	2020–2024
K_5	Коэффициент обновления основных фондов	%	max	2020–2024
K_6	Затратоемкость климатической деятельности	руб. / тыс. руб.	max	2020–2025
K_7	Доля улавливания загрязняющих веществ	%	max	2020–2024
K_8	Доля инновационных товаров, работ, услуг	%	max	2020–2024
K_9	Климатическая инвестоемкость	руб. / тыс. руб.	max	2020–2024
K_{12}	Рентабельность проданных товаров	%	max	2020–2024

Примечание: составлено авторами на основе источников, указанных в сносках 1 и 2.

Критерий K_{12} введен как показатель реализуемости, поскольку техническая возможность декарбонизации при нулевой марже готовности не создает. Матрица содержит одну документированную условность. Статистика не публикует долю инновационных товаров внутри раздела «Добыча полезных ископаемых», поэтому для видов деятельности 05, 06 и 07 взято значение раздела в целом. Три наблюдения из 128, то есть 2,3%, являются замещающими, и по критерию K_8 эти альтернативы неразличимы. Это единственное совпадение во всей матрице, его влияние проверено отдельно.

Соответствие критериев источникам раскрыто построчно. Критерий K_2 вычислен как отношение потребления электроэнергии по виду деятельности (табл. 5.4 сборника Росстата) к объему отгруженных товаров собственного производства (табл. 1.12); критерии K_4 и K_5 взяты из табл. 3.5 и 3.3 (степень износа и коэффициент обновления основных фондов по полному кругу организаций на конец года); K_7 из табл. 10.8 (доля уловленных и обезвреженных веществ в общем объеме загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников); K_8 из табл. 9.4 (доля инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров); K_{12} из табл. 7.3 (рентабельность проданных товаров, продукции, работ, услуг). Критерий K_6 образован отношением текущих затрат на охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата (графа 2 «на охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата» таблицы «Текущие (эксплуатационные) затраты на охрану окружающей среды по видам экономической деятельности» бюллетеней Росстата по форме № 4-ОС за 2020–2025 годы) к объему отгруженных товаров; критерий K_9 образован отношением инвестиций в основной капитал, направленных на охрану атмосферного воздуха (графа «на охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата» табл. 10.10 за 2020–2022 годы и табл. 10.11 за 2023–2024 годы того же сборника), к тому же знаменателю. Все стоимостные величины взяты в текущих ценах, дефлирование не применялось, знаменатель един для всех удельных критериев. Критерии K_6, K_7 и K_9 измеряют масштаб природоохранной практики и природоохранного капитала отрасли, а не результат декарбонизации; их валидность как индикаторов готовности ограничена тем, что затраты и инвестиции могут отражать как модернизацию, так и компенсацию высокой исходной эмиссионности, что учтено при истолковании типов и отнесено к ограничениям метода. Исходная дефаззифицированная матрица 16 × 8 приведена в таблице 10, полные ряды по годам содержит книга расчетов репликационного пакета.

Каждый элемент матрицы представлен треугольным нечетким числом

$$\tilde{x}_{ij} = \left(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}\right),$$

функция принадлежности которого задана формулой (1)

$$\mu_{\tilde{x}}(z) = \begin{cases} (z-l)/(m-l), & l \le z \le m \\ (u-z)/(u-m), & m \le z \le u \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \quad (1)$$

где z – текущее значение показателя; l, m и u – нижняя граница, мода и верхняя гра-

ница носителя нечеткого числа; $\mu_{\tilde{x}}(z)$ – степень принадлежности значения z нечеткому числу $\tilde{x}$.

Калибровка опирается прежде всего на межгодовую вариацию показателя. Для критериев, наблюдаемых в динамике, параметры l_{ij}, m_{ij} и u_{ij} функции (1) вычисляются по формуле (2)

$$l_{ij} = \min_t x_{ij}^{(t)},\ m_{ij} = x_{ij}^{(2024)},\ u_{ij} = \max_t x_{ij}^{(t)}, \quad (2)$$

где $x_{ij}^{(t)}$ – значение j-го критерия для i-й отрасли в году t; t – год наблюдения из периода 2020–2024 годов; l_{ij}, m_{ij} и u_{ij} – нижняя граница, мода и верхняя граница носителя нечеткого числа для i-й отрасли по j-му критерию. Размах ряда служит эмпирической, а не экспертной оценкой ширины носителя. Он объединяет по меньшей мере четыре различные по природе составляющие, а именно межгодовую вариацию показателя под действием конъюнктуры и технологических сдвигов, погрешность измерения вместе с пересмотрами методологии учета, пропуски наблюдений и сценарную неопределенность будущей динамики. Раздельно по открытым данным эти составляющие не оцениваются, поэтому носитель формулы (2) трактуется как их верхняя огибающая, а не как оценка погрешности измерения; в формуле (3) погрешность измерения выделена явно, а пропуски и методологические разрывы учитываются отдельными надбавками к носителю, указанными ниже. Для критерия K_6 ряд продолжен на 2025 год, модой принято значение последнего отчетного года, а при ее выходе за фактический размах параметры носителя упорядочиваются по возрастанию, что сохраняет соответствие определению (1).

Наряду с этим используются официальные оценки погрешности. Для показателей, полученных пересчетом секторных данных кадастра, носитель нечеткого числа $\tilde{x}_{ij}$ задается объединенной неопределенностью категории u_c согласно формуле (3)

$$\tilde{x}_{ij} = \left(m_{ij}\left(1-u_c/100\right), m_{ij}, m_{ij}\left(1+u_c/100\right)\right), \quad , \quad , \quad (3)$$

$$u_c = \max\left\{\sqrt{u_1^2+u_к^2}, \hat{\delta}_c\right\},\ u_1 = \frac{\sqrt{\sum_k \left(u_k E_k\right)^2}}{\sum_k E_k},$$

где u_c – объединенная неопределенность категории c, процентов; u_1 – неопределенность, распространенная по составляющим категории; u_K – погрешность округления долей подкатегорий, процентов; $\hat{\delta}_c = \left|E_c^{(2025)} / E_c^{(2023)} - 1\right|$ – фактическое расхождение оценок одного и того же года в двух последовательных редакциях кадастра; E_k – выбросы k-й составляющей категории; u_k – заявленная неопределенность k-й составляющей, процентов; $E_c^{(2025)}$ и $E_c^{(2023)}$ – оценки выбросов категории c в редакциях кадастра 2025 и 2023 годов. При методологическом разрыве ряда, вызванном изменением статистической графы в 2023 году для критериев K_6 и K_9, носитель расширяется на 15%, при отсутствии наблюдений за часть периода на 30%. Неопределенность при таком правиле формализуется, а не замещается импутированным средним.

Определение весов. На нормированной по направлению предпочтения матрице D^n веса критериев w_j вычисляются по формуле (4)

$$C_j = \sigma_j \sum_{q=1}^{n}\left(1-r_{jq}\right),\ \ w_j = C_j / \sum_q C_q, \quad (4)$$

где C_j – информационная емкость j-го критерия; σ_j – среднеквадратическое отклонение j-го столбца нормированной матрицы D^n; r_{jq} – коэффициент линейной корреляции j-го и q-го столбцов; w_j – вес j-го критерия; n – число критериев. Веса вычисляются однократно по полной совокупности и при последующих испытаниях с сокращенным составом отраслей не пересчитываются. Объективная процедура выбрана потому, что работа проверяет свойства самого вычислительного метода. Экспертная схема воспроизведена как контрольный сценарий при показателе согласованности парных сравнений CR = 0,002 и пороге 0,1.

Расчет по формуле (4) дает наибольший вес критерию электроемкости выпуска, равный 0,211, что объясняется одновременно высоким разбросом значений по отраслям и слабой согласованностью этого критерия с остальными. Коэффициенты корреляции K_2 с затратоемкостью климатической деятельности, долей улавливания и климатической инвестоемкостью равны минус 0,73, минус 0,61 и минус 0,74. Наименьшие веса получили износ основных фондов и рентабельность, сближенные по отраслям. Результаты трех схем взвешивания приведены в таблице 2.

Таблица 2

Веса критериев при трех схемах взвешивания

Критерий	Объективная схема (базовая)	Энтропийная схема	Экспертная схема
K_2	0,2112	0,0655	0,1919
K_4	0,0902	0,0510	0,1919
K_5	0,1089	0,0929	0,1031
K_6	0,1115	0,1558	0,1031
K_7	0,1339	0,0547	0,1919
K_8	0,1427	0,1404	0,0575
K_9	0,1097	0,2774	0,1031
K_{12}	0,0919	0,1624	0,0575

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

Выявленные корреляции обосновывают применение схем, учитывающих взаимозависимость критериев. Пары «износ и обновление» при r = 0,62 и «затратоемкость и инвестоемкость» при r = 0,67 описывают связанные стороны одного процесса воспроизводства фондов.

Агрегирование средствами нечеткого многокритериального анализа. Нормированное нечеткое значение $\tilde{v}_{ij}$ вычисляется по формуле (5)

$$\tilde{v}_{ij} = \begin{cases} \left(l_{ij}/u_j^+, m_{ij}/u_j^+, u_{ij}/u_j^+\right), & c_j \in C^+,\ u_j^+ = \max\limits_i u_{ij}, \\ \left(l_j^-/u_{ij}, l_j^-/m_{ij}, l_j^-/l_{ij}\right), & c_j \in C^-,\ l_j^- = \min\limits_i l_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

где $\tilde{v}_{ij}$ – нормированное нечеткое значение j-го критерия для i-й отрасли; u_j^+ – наибольшая верхняя граница носителя по j-му критерию из множества максимизируемых C^+; l_j^-– наименьшая нижняя граница носителя по j-му критерию из множества минимизируемых C^-.

Взвешенные значения $\tilde{y}_{ij} = \tilde{v}_{ij} \otimes w_j$ лежат в [0; w_j], что задает нечеткие идеальное $\tilde{y}_j^+ = \left(w_j, w_j, w_j\right)$ и антиидеальное $\tilde{y}_j^- = \left(0,0,0\right)$ решения. Расстояние $d\left(\tilde{a},\tilde{b}\right)$ между двумя треугольными нечеткими числами вычисляется по вершинам согласно формуле (6)

$$d\left(\tilde{a},\tilde{b}\right) = \sqrt{1/3\left[\left(l_a - l_b\right)^2 + \left(m_a - m_b\right)^2 + \left(u_a - u_b\right)^2\right]}, \quad (6)$$

где $\tilde{a} = \left(l_a, m_a, u_a\right)$ и $\tilde{b} = \left(l_b, m_b, u_b\right)$ – сравниваемые треугольные нечеткие числа; $d\left(\tilde{a},\tilde{b}\right)$ – расстояние между ними, вычисленное по вершинам.

После этого интегральный показатель технологической готовности, обозначаемый далее как коэффициент близости к идеальному решению CC_i, вычисляется по формуле (7)

$$d_i^+ = \sum_j d\left(\tilde{y}_{ij}, \tilde{y}_j^+\right),\ d_i^- = \sum_j d\left(\tilde{y}_{ij}, \tilde{y}_j^-\right),\ CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad (7)$$

где d_i^+ и d_i^-– суммарные расстояния i-й отрасли до нечеткого идеального и антиидеального решений; $\tilde{y}_{ij}$ – взвешенное нормированное нечеткое значение; CC_i – интегральный показатель технологической готовности i-й отрасли.

Нормирующие величины u_j^+ и l_j^- формулы (5) определяются составом сравниваемого множества, вследствие чего исключение одной альтернативы способно переставить местами другие. Для устранения этого свойства предложена модификация, в которой нормирующие величины заменяются фиксированными базовыми значениями нормирования u_j^* и l_j^* согласно формуле (8)

$$u_j^* = 1{,}25 \max_i u_{ij},\ \ l_j^* = 0{,}8 \min_i l_{ij}, \quad (8)$$

где u_j^* и l_j^* – базовые значения нормирования по j-му критерию; коэффициенты 1,25 и 0,8 задают вынос базового значения за пределы наблюдаемого диапазона значений.

Базовые значения рассчитываются однократно и не пересчитываются при изменении состава множества A. Вычислительная сложность составляет $O(mn+n^2)$ при определении весов по формуле (4) и $O(mn)$ при агрегировании по формулам (5) и (7), что допускает полный перебор сценариев в анализе чувствительности.

Выбор коэффициентов 1,25 и 0,80 проверен отдельно. При их совместном изменении в пределах от 1,05 и 0,95 до 1,35 и 0,75 упорядочение отраслей не меняется ни на одну позицию, при значениях 1,50 и 0,65 ранговая корреляция с базовым упорядочением составляет 0,994 при взаимной перестановке двух пар соседних отраслей. Результат к конкретной величине выноса, следовательно, не чувствителен, существенно лишь то, что база не пересчитывается при изменении состава сравниваемых отраслей. База строится по экстремумам исходной выборки с выносом за ее пределы и потому является фиксированной, а не нормативно независимой, поскольку она устраняет зависимость нормирования от последующих изменений состава сравниваемого множества, но не от исходной выборки, по которой вычислена. Инвариантность к составу при фиксированной базе следует непосредственно из формул (5)–(7), поскольку при неизменных весах и неизменных базовых значениях u^* и l^* нормированное значение, расстояния до идеального и антиидеального решений и показатель CC_i каждой альтернативы вычисляются только по ее собственным нечетким числам и не зависят от остальных строк матрицы, тогда как в классической схеме нормирующие величины суть функции всего множества A. Общность этого утверждения ограничена условием неизменности весов, а его вычислительная проверка выполнена на одном наборе данных.

Свойства схемы с фиксированной базой. Для четкой реализации схемы (8), в которой каждое значение представлено модой, расстояния (6) сводятся к модулям разностей, а нормированные значения не превышают 0,8 в силу выноса базы, поэтому показатель (7) принимает линейный вид (9)

$$CC_i=\sum_{j=1}^{n} w_j v_{ij}, \qquad v_{ij}=\frac{x_{ij}}{u_j^*} \text{ при } c_j\in C^+,\ v_{ij}=\frac{l_j^*}{x_{ij}} \text{ при } c_j\in C^- \tag{9}$$

где v_{ij} – четкое значение j-го критерия для i-й отрасли, нормированное на фиксированную базу; сумма $d_i^+ + d_i^-$ при этом равна единице, что и дает линейную форму. Из формулы (9) непосредственно следуют три утверждения, проверенные также вычислительно (табл. 6). Утверждение 1 (инвариантность к составу). При фиксированных весах и базовых значениях показатель CC_i зависит только от i-й строки матрицы, поэтому упорядочение любого подмножества альтернатив совпадает с сужением упорядочения полного множества, и число случаев обращения порядка равно нулю для любого набора данных. Утверждение 2 (устойчивость к возмущению весов). Показатель (9) удовлетворяет условию Липшица (10)

$$\left|CC_i(w)-CC_i(w')\right|\le \max_j v_{ij}\cdot \|w-w'\|_1 \le 0{,}8\,\|w-w'\|_1, \tag{10}$$

где $\|\cdot\|_1$ – сумма модулей координат; константа 0,8 определена выносом базы (8). Возмущение каждого веса в пределах 20% при перенормировании дает $\|w - w'\|_1 \le 0{,}4$, откуда сдвиг показателя не превышает 0,32; фактический наибольший сдвиг в двух тысячах прогонов составил 0,043 при наибольшем отношении сдвига к возмущению 0,38, что лежит внутри границы. Утверждение 3 (точность интервального распространения). Показатель (9) монотонно не убывает по каждому v_{ij}, поэтому при любом уровне принадлежности α точные нижняя и верхняя границы показателя достигаются на границах α-срезов исходных нечетких чисел и вычисляются по формуле (11) без перебора и без выборочной ошибки

$$CC_i^L(\alpha)=\sum_{j=1}^{n} w_j v_{ij}\left(x_{ij}^L(\alpha)\right),\ CC_i^U(\alpha)=\sum_{j=1}^{n} w_j v_{ij}\left(x_{ij}^U(\alpha)\right),$$

$$x_{ij}^L(\alpha)=l_{ij}+\alpha\left(m_{ij}-l_{ij}\right),\ x_{ij}^U(\alpha)=u_{ij}-\alpha\left(u_{ij}-m_{ij}\right), \tag{11}$$

где $x_{ij}^L(\alpha)$ и $x_{ij}^U(\alpha)$ – границы α-среза треугольного числа, для минимизируемых критериев подставляемые в обратном порядке; $CC_i^L(\alpha)$ и $CC_i^U(\alpha)$ – нижняя и верхняя границы показателя на уровне α. Для схемы с вершинными расстояниями (6) утверждения 2 и 3 проверены численно.

На утверждениях 1 и 3 построен численный метод оценки достоверности упорядочения, названный далее методом α-срезов. Для пары альтернатив i и k, упорядоченных по показателю (7), определяется уровень разделимости (12)

$$\alpha_{ik}^{*} = inf\left\{\alpha \in [0;1] : CC_k^U(\alpha) < CC_i^L(\alpha)\right\}, \quad (12)$$

где α_{ik}^{*} – наименьший уровень принадлежности, при котором интервалы показателя перестают пересекаться; значение 0 означает разделимость на всем носителе, значение 1 означает, что порядок пары не подтверждается даже модами. Интервалы (11) монотонно сужаются по α, поэтому уровень (12) находится бисекцией, сходящейся линейно и достигающей точности 10^{-6} за 20 шагов; сложность метода составляет $O(mn)$ на один уровень и $O(m^2 n \log(1/\varepsilon))$ для всех пар, что при $m = 16$ и $n = 8$ дает порядка десяти тысяч элементарных операций против двух тысяч полных прогонов при статистических испытаниях. Метод дополняет стохастическую вариацию весов, поскольку описывает неопределенность самих исходных данных, а не весов, и оценивает ее точно, а не выборочно.

Результаты вычислительного эксперимента. Значения интегрального показателя готовности отраслей промышленности России к декарбонизации, вычисленные по формуле (7), лежат в интервале от 0,248 до 0,485. Умеренный максимум означает, что ни одна отрасль к идеальному профилю не приближается, а лидер превосходит остальных не по всем критериям сразу, а по их совокупности. Ранжирование с разбиением на классы представлено на рисунке 2, числовые значения приведены в таблице 3.

Штриховка столбцов на рисунке 2 отвечает трем классам готовности, пунктирные линии показывают положение терцильных порогов. Числовые значения показателя и расстояний до идеального и антиидеального решений приведены в таблице 3.

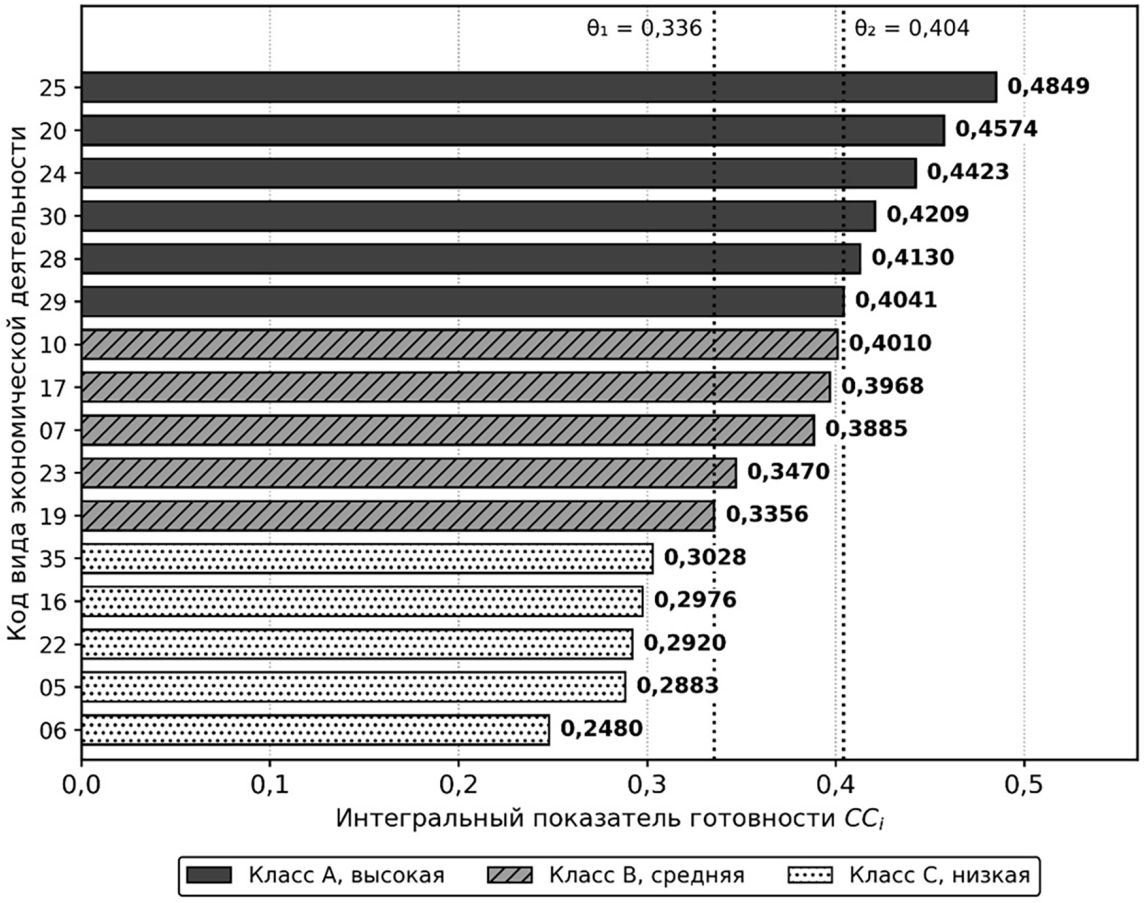


Рис. 2. Ранжирование отраслей по интегральному показателю технологической готовности и классы готовности
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования
Значения интегрального показателя безразмерны

Таблица 3

Интегральный показатель технологической готовности и классы готовности

Ранг	Код	Вид экономической деятельности	d^+	d^-	CC_i	Класс
1	25	Производство готовых металлических изделий	0,553	0,520	0,4849	A
2	20	Производство химических веществ	0,562	0,474	0,4574	A
3	24	Производство металлургическое	0,571	0,453	0,4423	A
4	30	Производство прочих транспортных средств	0,584	0,425	0,4209	A
5	28	Производство машин и оборудования	0,596	0,419	0,4130	A
6	29	Производство автотранспортных средств	0,611	0,414	0,4041	A
7	10	Производство пищевых продуктов	0,603	0,404	0,4010	B
8	17	Производство бумаги и бумажных изделий	0,620	0,408	0,3968	B
9	07	Добыча металлических руд	0,623	0,396	0,3885	B
10	23	Производство прочей неметаллической минеральной продукции	0,656	0,349	0,3470	B
11	19	Производство кокса и нефтепродуктов	0,674	0,340	0,3356	B
12	35	Обеспечение электрической энергией, газом и паром	0,701	0,305	0,3028	C
13	16	Обработка древесины	0,712	0,302	0,2976	C
14	22	Производство резиновых и пластмассовых изделий	0,717	0,296	0,2920	C
15	05	Добыча угля	0,742	0,301	0,2883	C
16	06	Добыча нефти и природного газа	0,761	0,251	0,2480	C

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования. Классы A, B и C отражают положение отрасли внутри рассмотренной выборки, их границы заданы терцилями распределения при $\theta_1 = 0{,}336$ и $\theta_2 = 0{,}404$.

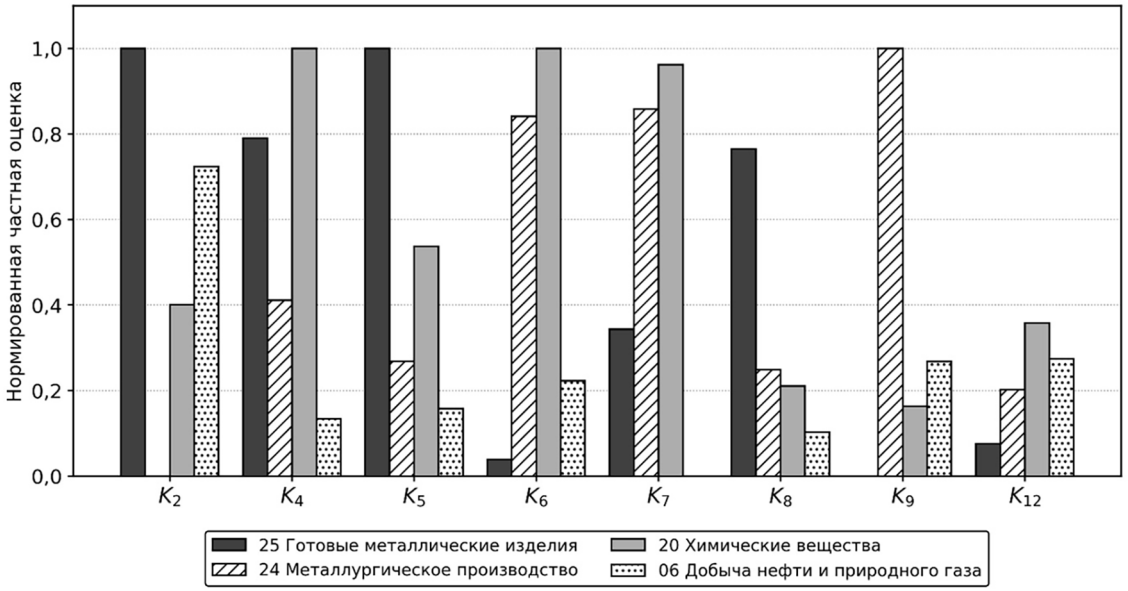


Рис. 3. Профили частных оценок отраслей с различной конфигурацией технологической готовности
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования
Значения нормированных частных оценок безразмерны и лежат в интервале от нуля до единицы

Верх упорядочения сформирован обрабатывающими производствами с высокой долей инновационной продукции и низкой электроемкостью, низ занимают добывающие отрасли, для которых углеродно-нейтральный переход означает перестройку основного передела, а не модернизацию вспомогательных процессов [31].

Таблица 4

Профили отраслей с крайними значениями внутренней неоднородности

Код	CC_i	K_2	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{12}	СКО профиля
25	0,4849	1,000	0,790	1,000	0,039	0,343	0,765	0,000	0,075	0,407
24	0,4423	0,000	0,411	0,268	0,842	0,859	0,249	1,000	0,202	0,346
20	0,4574	0,401	1,000	0,537	1,000	0,962	0,211	0,163	0,358	0,334
06	0,2480	0,724	0,134	0,158	0,222	0,000	0,103	0,268	0,274	0,203

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования. Значения нормированы в интервал от нуля до единицы с учетом направления предпочтения.

При рентабельности добычи нефти и природного газа 27,8% эта отрасль имеет минимальную долю улавливания и наибольший износ фондов, что финансовыми возможностями не компенсируется.

Основной содержательный результат состоит в том, что близкие значения интегрального показателя технологической готовности достигаются несовпадающими конфигурациями частных оценок. Профили четырех отраслей приведены на рисунке 3, мерой внутренней противоречивости взято среднеквадратическое отклонение нормированных частных оценок, значения которого даны в таблице 4.

Столбцы рисунка 3 сгруппированы по критериям, что позволяет сопоставлять отрасли по каждой компоненте готовности отдельно. Числовые значения тех же оценок вместе с мерой внутренней неоднородности профиля приведены в таблице 4.

Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий различаются по интегральному показателю на 0,04, однако их профили противоположны, что видно на рисунке 3. У первого климатическая инвестоемкость и доля улавливания дают нормированные оценки 1,000 и 0,859 при худшей в выборке электроемкости с оценкой 0,000, у второго наилучшие электроемкость и обновление фондов при нулевой оценке климатической инвестиционной активности. Конфигурации требуют разных управленческих решений, тогда как скалярное агрегирование признает их почти эквивалентными, поэтому итог оценки следует читать вместе с профилем. Отрасль, готовая к декарбонизации по одной группе критериев, может не иметь заделов по другой. Наиболее однородны профили угольной и нефтегазовой добычи со среднеквадратическими отклонениями 0,24 и 0,20, что означает системный, а не частный характер их отставания.

Приведенное сопоставление опирается на четыре отобранные вручную отрасли и потому имеет силу иллюстрации, а не результата. Для формального выделения типов применен метод нечетких средних, относящийся к алгоритмам искусственного интеллекта, обучаемым без учителя. Уровень готовности из данных предварительно удален центрированием строк матрицы D^n, в результате которого получена центрированная оценка p_{ij} по формуле (13)

$$p_{ij} = d_{ij}^n - \frac{1}{n}\sum_{q=1}^{n} d_{iq}^n, \qquad (13)$$

где p_{ij} – центрированная оценка i-й отрасли по j-му критерию; d^n_{ij} – нормированная по направлению предпочтения оценка; n – число критериев.

После такого центрирования кластеризация работает исключительно с формой профиля и не воспроизводит упорядочение по интегральному показателю. Разбиение получается минимизацией функционала J_β, заданного формулой (14),

$$J_\beta = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{c} \mu_{ik}^{\beta} \| p_i - v_k \|^2, \ \beta = 2, \quad (14)$$

где J_β – минимизируемый функционал разбиения; μ_{ik} – степень принадлежности i-й отрасли k-му типу при условии $\sum_k \mu_{ik} = 1$; p_i – центрированный профиль i-й отрасли; v_k – центроид k-го типа; β – параметр нечеткости разбиения; m – число отраслей; c – число типов. Итерационное решение задачи (14) дано формулой (15)

$$\mu_{ik} = \left[\sum_{q=1}^{c} \left(\| p_i - v_k \| / \| p_i - v_q \| \right)^{2/(\beta-1)} \right]^{-1}, \ v_k = \frac{\sum_i \mu_{ik}^{\beta} p_i}{\sum_i \mu_{ik}^{\beta}} \qquad (15)$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма в пространстве критериев. Формулы (15) применяются попеременно до сходимости по степеням принадлежности.

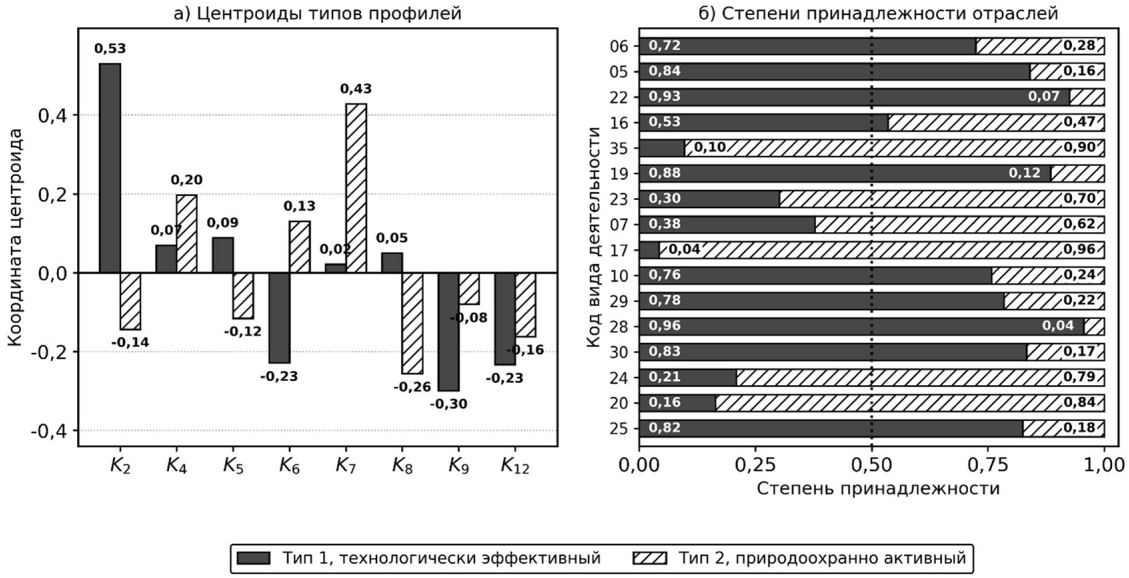


Рис. 4. Результаты нечеткой кластеризации отраслей по форме профиля технологической готовности
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования
Координаты центроидов и степени принадлежности безразмерны

Вычислительная процедура реализована в следующем порядке. 1. Центрирование строк нормированной матрицы по формуле (13). 2. Инициализация матрицы принадлежностей случайными строками, нормированными на единицу, из генератора с заданным начальным состоянием. 3. Попеременный пересчет центроидов и принадлежностей по формулам (15) с ограничением расстояний снизу величиной 10^{-12} для исключения деления на нуль. 4. Проверка критерия остановки по максимальному изменению принадлежности между итерациями. 5. Вычисление коэффициента разбиения, энтропии разбиения и индекса *Ce* и Бени для числа типов от двух до пяти. Схема соответствует исходному алгоритму нечетких с-средних [13], вычислительная сложность одной итерации составляет $O(mcn)$, при $m = 16$, $c = 2$ и $n = 8$, полный прогон занимает доли секунды.

Число типов выбрано по показателям качества разбиения. Коэффициент разбиения при двух типах составил 0,711 против 0,556 при трех, энтропия разбиения 0,453 против 0,765, индекс *Ce* и Бени 0,264 против 0,526, то есть все три показателя согласованно указывают на два типа. Разбиение получено при параметре нечеткости, равном двум, критерием остановки служило изменение максимальной степени принадлежности менее одной стомиллиардной доли единицы, начальное приближение задавалось генератором псевдослучайных чисел PCG64 библиотеки NumPy с начальным состоянием 20250808, единым для всех стохастических процедур комплекса. Разбиение сошлось за 37 итераций, а 30 запусков со случайным начальным приближением и вариация параметра нечеткости β от 1,5 до 3,0 дали совпадение разметки на 100%. Устойчивость разбиения дополнительно проверена бутстрэпом, а именно тысячей повторных выборок отраслей с возвращением при том же начальном состоянии генератора. Разметка всех попавших в выборку отраслей совпала с базовой в 64,5% повторных выборок, доля совпадений по отдельным отраслям составила от 0,90 до 1,00 для пятнадцати отраслей и 0,59 для обработки древесины, что согласуется с ее пограничным положением. Центроиды типов и степени принадлежности показаны на рисунке 4, числовые характеристики приведены в таблице 5.

Левая панель рисунка 4 показывает, какими критериями типы различаются между собой, правая дает степень принадлежности каждой отрасли при упорядочении по интегральному показателю. Состав типов и их числовые характеристики сведены в таблице 5.

Технологически эффективным назван тип, куда вошли производства с низкой электроемкостью, высоким обновлением фондов и заметной инновационной активностью при слабых климатических инвестициях и затратах. Резерв декарбонизации здесь состоит в переносе накопленного

технологического опыта на задачи сокращения выбросов. Ко второму типу, названному природоохранно активным, отошли энергоемкие производства с развитой газоочистной инфраструктурой и высокими климатическими затратами при низкой доле инновационной продукции. У них декарбонизация упирается не в отсутствие природоохранной практики, а в исчерпание ее возможностей без смены основной технологии, что для черной металлургии показано в отраслевой работе [32], а для производств Арктической зоны в работе [33]. Пограничной оказалась одна отрасль, обработка древесины со степенью принадлежности 0,535, у остальных пятнадцати она превышает 0,6.

Таблица 5

Характеристики выделенных типов профиля технологической готовности

Тип	Состав, коды видов деятельности	Сильные критерии	Слабые критерии	Средний CC_i
1. Технологически эффективный	05, 06, 10, 16, 19, 22, 25, 28, 29, 30	K_2, K_5, K_4	K_9, K_{12}, K_6	0,3585
2. Природоохранно активный	07, 17, 20, 23, 24, 35	K_7, K_4, K_6	K_8, K_{12}, K_2	0,3891

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования. Сильными и слабыми названы три критерия с наибольшим и наименьшим отклонением координаты центроида от нуля.

Таблица 6

Результаты верификации метода

Проверка	Показатель	Значение
Сопоставление с четким упорядочением по сходству с идеалом	ρ Спирмена	0,891
Сопоставление с компромиссным ранжированием	ρ Спирмена	0,585
Экспертная схема весов	ρ Спирмена	0,835
Равные веса	ρ Спирмена	0,912
Замена треугольных чисел трапециевидными	ρ Спирмена	1,000
Вариация каждого веса на 20%	максимальный сдвиг ранга	3 позиции
Стохастическая вариация весов, 2000 прогонов	средний ρ и минимальный ρ	0,978 и 0,897
Расширение носителя замещающих значений на 50%	максимальный сдвиг ранга	0 позиций
Конкордация пяти схем ранжирования	W Кендалла	0,831
Обращение порядка, классическая схема нормирования	число случаев из 16	4
Обращение порядка, схема с фиксированной базой нормирования	число случаев из 16	0
Обращение порядка при пересчете весов, классическая и фиксированная база нормирования	число случаев из 16	8 и 7
Вариация коэффициентов базы от 1,05 и 0,95 до 1,35 и 0,75	максимальный сдвиг ранга	0 позиций
Бутстрэп нечеткого разбиения, 1000 повторных выборок	доля полных совпадений разметки	0,645
Серия из 1000 случайных наборов данных 16 × 8, классическая схема	доля наборов с обращением порядка	1,000 (в среднем 5,7 случаев из 16)
Серия из 1000 случайных наборов данных 16 × 8, схема с фиксированной базой	доля наборов с обращением порядка	0,000
Упорядочение по модам при фиксированной базе против упорядочения по вершинам	ρ Спирмена	0,938
Внешняя валидация по изменению удельных выбросов загрязняющих веществ, 2024 к 2020	ρ Спирмена	−0,507 ($p = 0,054$)

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

Типизация дает результат, не выводимый из уровня готовности. Ранговая корреляция степени принадлежности первому типу с интегральным показателем составила минус 0,11 при уровне значимости 0,68, что не позволяет отвергнуть гипотезу об отсутствии монотонной связи, а средние значения показателя по типам в таблице 5 различаются на 0,03 при размахе выборки 0,24. Из ранжирования тип профиля, следовательно, не восстанавливается; при этом отсутствие обнаруженной связи при 16 наблюдениях не равнозначно доказанной независимости и означает лишь, что типизация дает сведения, не содержащиеся в упорядочении. Это придает выявленной некомпенсируемости статус результата и составляет вклад методов искусственного интеллекта в решение поставленной многокритериальной задачи. Отрасли 24 и 25 на рисунке 4б при разнице показателя в 0,04 отнесены к разным типам со степенями принадлежности 0,79 и 0,82.

Проведены 18 независимых проверок, результаты которых сведены в таблице 6. Распределение ранговой корреляции при стохастической вариации весов и итог испытания на обращение порядка показаны на рисунке 5.

Испытанию на обращение порядка отвечают три отдельные строки таблицы 6, а распределение ранговой корреляции при стохастической вариации весов и итог этого испытания показаны на рисунке 5.

Замена вида функций принадлежности упорядочение не изменила вовсе, что говорит об устойчивости оценки к произволу в выборе формы нечеткого числа. Стохастическая вариация весов на рисунке 5а сохраняет ранговую корреляцию не ниже 0,897 в худшем из двух тысяч прогонов при среднем 0,978.

Стохастическое испытание дает не только точечные оценки, но и распределения. Стандартное отклонение интегрального показателя по двум тысячам прогонов не превышает 0,014 при размахе выборки 0,24, а пятипроцентный и девяностопятипроцентный квантили не перекрываются у отраслей, различающихся более чем на пять позиций. Вероятность сохранить базовый ранг составляет от 0,36 до 1,00 и закономерно ниже в середине упорядочения, где значения показателя сближены. Устойчивой при этом остается принадлежность к классу: для трех верхних и пяти нижних отраслей класс не меняется ни в одном прогоне. Полные характеристики распределений показателя и рангов по каждой отрасли приведены в таблице 7.

Результаты применения метода α-срезов сведены в таблицу 8. Из 120 упорядоченных пар отраслей 21 пара разделима на всем носителе, 66 пар при $\alpha \leq 0{,}5$ и 104 пары при $\alpha \leq 0{,}9$; для 10 пар, в том числе для пяти соседних по рангу, порядок не подтверждается модами, что согласуется с низкой вероятностью сохранения ранга в середине упорядочения по таблице 7. Существенно, что все 30 пар, образованных отраслями классов A и C, разделимы при $\alpha \leq 0{,}34$, а 16 из них на всем носителе; отнесение к крайним классам, таким образом, устойчиво к неопределенности исходных данных, тогда как порядок соседних отраслей внутри класса имеет иллюстративный характер. Упорядочение по модам согласуется с упорядочением по вершинным расстояниям при $\rho = 0{,}938$, расхождение локализовано у отраслей с несимметричным носителем (коды 20 и 05), у которых вершинная аппроксимация смещает оценку в сторону широкой границы носителя.

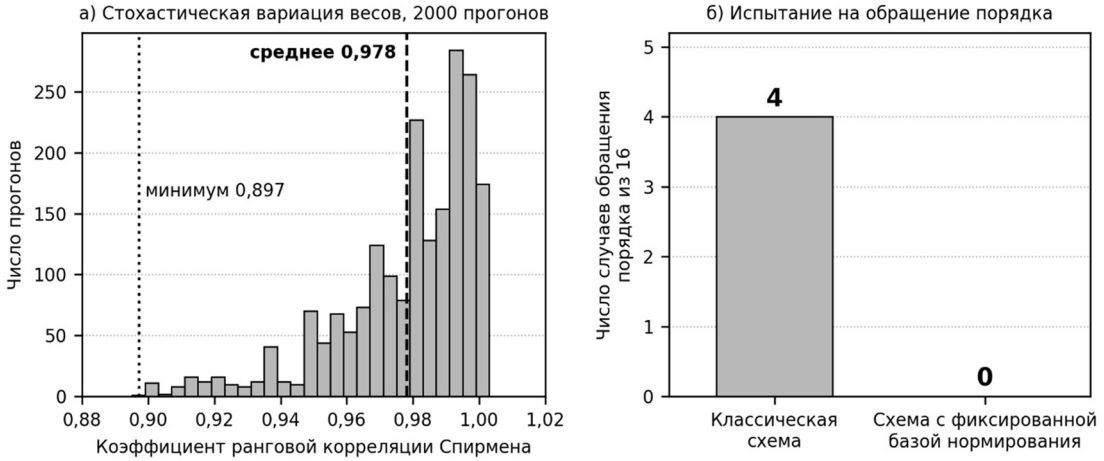


Рис. 5. Результаты проверки устойчивости ранжирования
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования
Коэффициент ранговой корреляции безразмерен

Таблица 7

Распределения интегрального показателя и рангов при стохастической вариации весов, 2000 прогонов

Код	Ранг	CC_i базовый	Среднее CC_i	СКО CC_i	Квантиль 5%	Квантиль 95%	Диапазон рангов	Вероятность базового ранга	Вероятность сдвига не более чем на одну позицию	Вероятность базового класса
25	1	0,4849	0,4846	0,0126	0,4645	0,5052	1–3	0,90	0,97	1,00
20	2	0,4574	0,4577	0,0133	0,4356	0,4792	1–5	0,86	0,99	1,00
24	3	0,4423	0,4426	0,0122	0,4225	0,4626	1–7	0,81	0,92	1,00
30	4	0,4209	0,4208	0,0121	0,4016	0,4410	2–8	0,60	0,85	0,92
28	5	0,4130	0,4128	0,0115	0,3941	0,4318	3–9	0,53	0,85	0,76
29	6	0,4041	0,4041	0,0106	0,3869	0,4218	4–9	0,40	0,74	0,49
10	7	0,4010	0,4009	0,0128	0,3795	0,4214	3–9	0,36	0,74	0,59
17	8	0,3968	0,3972	0,0115	0,3780	0,4162	4–9	0,43	0,72	0,72
07	9	0,3885	0,3884	0,0120	0,3691	0,4089	4–9	0,61	0,82	0,90
23	10	0,3470	0,3473	0,0122	0,3272	0,3670	10–11	0,82	1,00	0,82
19	11	0,3356	0,3355	0,0080	0,3224	0,3484	10–12	0,81	1,00	0,49
35	12	0,3028	0,3030	0,0123	0,2833	0,3238	11–15	0,78	0,87	1,00
16	13	0,2976	0,2977	0,0103	0,2803	0,3144	12–15	0,75	0,94	1,00
22	14	0,2920	0,2919	0,0077	0,2792	0,3044	12–15	0,49	0,81	1,00
05	15	0,2883	0,2882	0,0075	0,2757	0,3003	12–15	0,64	0,90	1,00
06	16	0,2480	0,2478	0,0062	0,2379	0,2582	16–16	1,00	1,00	1,00

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования. Все величины безразмерны. Веса в каждом прогоне умножены на независимые случайные множители из равномерного распределения на отрезке от 0,8 до 1,2 и перенормированы; начальное состояние генератора 20250808. Класс определен по терцильным порогам базового упорядочения.

Таблица 8

Интервалы интегрального показателя и уровни разделимости по методу α-срезов

Код	Ранг	CC_i по формуле (7)	Нижняя граница $CC_i^L(0)$	CC_i по модам	Верхняя граница $CC_i^U(0)$	Уровень разделимости α^* с отраслью следующего ранга	Число пар, разделимых на всем носителе, из 15
25	1	0,4849	0,259	0,462	0,483	0,661	1
20	2	0,4574	0,300	0,335	0,462	1,000	4
24	3	0,4423	0,290	0,359	0,416	1,000	4
30	4	0,4209	0,283	0,362	0,365	0,987	4
28	5	0,4130	0,266	0,360	0,367	0,938	2
29	6	0,4041	0,238	0,351	0,382	0,902	1
10	7	0,4010	0,278	0,337	0,348	0,814	2
17	8	0,3968	0,241	0,312	0,380	1,000	1
07	9	0,3885	0,245	0,324	0,362	0,566	1
23	10	0,3470	0,248	0,279	0,302	0,967	1
19	11	0,3356	0,199	0,277	0,321	0,675	0
35	12	0,3028	0,218	0,237	0,263	0,754	5
16	13	0,2976	0,200	0,216	0,283	1,000	3
22	14	0,2920	0,180	0,228	0,281	0,770	3
05	15	0,2883	0,141	0,186	0,321	1,000	0
06	16	0,2480	0,144	0,198	0,238	–	10

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования. Все величины безразмерны. Интервалы вычислены по формуле (11) при фиксированной базе нормирования; уровень разделимости найден бисекцией по формуле (12) с точностью 10^{-6}; значение 1,000 означает, что порядок пары не подтверждается модами.

Пониженное согласие с компромиссным ранжированием, составившее 0,585, объяснимо различием решающих правил двух методов и представляет собой методическую зависимость результата от выбора процедуры, а не дефект расчета. Компромиссная процедура штрафует альтернативу по наихудшему частному показателю, тогда как использованное агрегирование учитывает совокупное расстояние до идеала. Металлургическое производство с 3-го места базового упорядочения опускается на 14-е в компромиссном именно из-за наихудшей электроемкости, что видно из его профиля на рисунке 3. Расхождение двух методов служит дополнительным признаком отраслей с некомпенсируемым профилем готовности к декарбонизации.

Испытание на обращение порядка выявило ограничение классической схемы, поскольку последовательное исключение каждой из 16 отраслей в четырех случаях меняло взаимный порядок оставшихся. Модификация с фиксированной базой нормирования по формуле (8) не дала ни одного случая обращения при полном совпадении упорядочения с базовым, что отражено на рисунке 5б, и это дает основание рекомендовать ее как основную при работе с отраслями промышленности России, состав которых в статистических публикациях меняется от выпуска к выпуску.

Отсутствие обращения порядка достигается при неизменных весах. Если веса пересчитывать после удаления каждой отрасли, взаимный порядок оставшихся меняется в восьми из 16 испытаний при классической схеме и в семи при схеме с фиксированной базой нормирования, поскольку объективная процедура взвешивания сама зависит от состава совокупности. Устойчивость упорядочения, таким образом, обеспечивается совместным выполнением двух условий, а именно фиксацией базы нормирования и фиксацией весов.

Исключение любого одного критерия сохраняет ранговую корреляцию с базовым упорядочением в диапазоне от 0,744 при исключении электроемкости до 0,997 при исключении рентабельности, что соответствует весам таблицы 2 и подтверждает согласованность схемы взвешивания и итогового результата.

Таблица 9

Внешняя валидация: динамика выбросов загрязняющих атмосферу веществ по отраслям

Код	Ранг по CC_i	Выбросы загрязняющих веществ в 2020 г., тыс. т	Выбросы загрязняющих веществ в 2024 г., тыс. т	Индекс физического объема производства 2024 к 2020, %	Изменение выбросов на единицу физического объема 2024 к 2020, %
25	1	37,8	56,9	210,5	-28,5
20	2	432,9	381,2	115,6	-23,8
24	3	1499,6	1393,2	102,4	-9,2
30	4	34,5	48,5	187,3	-24,9
28	5	19,3	18,9	128,6	-23,8
29	6	22,0	25,3	87,7	31,2
10	7	259,4	178,1	117,4	-41,5
17	8	75,8	80,4	117,5	-9,7
07	9	2385,7	1887,0	98,9	-20,0
23	10	425,9	505,9	123,5	-3,8
19	11	666,4	590,3	104,1	-14,9
35	12	2890,9	3154,5	110,2	-1,0
16	13	128,2	145,8	104,1	9,3
22	14	21,3	27,4	124,0	3,7
05	15	1379,1	1207,1	110,6	-20,9
06	16	2343,1	2722,1	не публикуется	не рассчитано

Примечание: составлено авторами по данным табл. 10.6 и 1.15 сборника, указанного в сноске 1. Выбросы от стационарных источников по данным Росприроднадзора. Индекс физического объема получен цепным перемножением годовых индексов 2021–2024 годов; для добычи нефти и природного газа индексы за 2023–2024 годы не публикуются.

Влияние замещающих значений критерия K_8 проверено расширением носителя соответствующих нечетких чисел, поскольку менее надежной оценке отвечает более широкий интервал. Расширение на 25% и на 50% упорядочение не изменило, расширение на 100% сместило одну отрасль на одну позицию при $\rho = 0{,}997$, то есть положение добывающих отраслей внизу задано остальными семью критериями. Такую проверку делает возможной именно нечеткая, а не точечная форма данных, дающая числовую оценку последствий неполноты статистики без исключения отраслей из анализа, и в этом состоит практическая отдача методов искусственного интеллекта. При одновременном исключении всех трех отраслей с замещающими значениями классическая схема изменила порядок оставшихся 13 с максимальным сдвигом в две позиции, схема с фиксированной базой нормирования сохранила его полностью.

Внешняя валидация. Для проверки связи оценки готовности с фактической динамикой выбросов использованы натурные данные Росприроднадзора о выбросах загрязняющих атмосферу веществ от стационарных источников по видам деятельности за 2020–2024 годы и индексы физического объема производства. Данные о выбросах парниковых газов по видам деятельности ОКВЭД2 национальный кадастр не публикует, поэтому выбросы загрязняющих веществ приняты как ближайший доступный натурный индикатор результата природоохранной модернизации. Результаты приведены в таблице 9. Изменение абсолютного объема выбросов с оценкой готовности не связано ($\rho = 0{,}02$, $p = 0{,}93$, $n = 16$), что ожидаемо при разнонаправленной динамике выпуска. Изменение выбросов на единицу физического объема производства связано с готовностью отрицательно ($\rho = -0{,}51$, $p = 0{,}054$, $n = 15$): отрасли с более высоким интегральным показателем сильнее снизили удельные выбросы, наибольшее снижение показали производство пищевых продуктов, готовых металлических изделий и прочих транспортных средств, рост удельных выбросов отмечен у автотранспортных средств, обработки древесины и резиновых изделий. Связь находится на границе пятипроцентного уровня значимости и подтверждает направление, а не силу зависимости; для окна 2020–2022 годов с шестнадцатью отраслями она слабее ($\rho = -0{,}39$, $p = 0{,}13$). Прежняя проверка по ряду углеродоемкости кадастра для пяти отраслей сохранена в разделе ограничений.

Программная реализация и воспроизводимость. Метод реализован в виде программного комплекса fmcdm_readiness на языке Python версии 3.12 с библиотеками NumPy 2.x, SciPy 1.x и openpyxl 3.x. Комплекс состоит из десяти модулей, отвечающих блокам схемы на рисунке 1, а именно загрузка исходной матрицы и нечетких чисел из книги данных; вычисление весов по формуле (4); нечеткое агрегирование по формулам (5)–(7) с переключением классической и фиксированной базы нормирования по формуле (8); испытание на обращение порядка; стохастическая вариация весов с формированием распределений показателя и рангов; нечеткие с-средние по формулам (13)–(15) с показателями качества разбиения; бутстрэп разбиения; точное интервальное распространение неопределенности по α-срезам с бисекцией уровня разделимости по формулам (9)–(12); серия вычислительных экспериментов на случайных наборах данных; внешняя валидация по натурным данным о выбросах. Все стохастические процедуры используют генератор PCG64 с начальным состоянием 20250808, задаваемым единственным параметром запуска, что делает каждый численный результат статьи воспроизводимым побитно.

Точность реализации проверена сопоставлением с независимым расчетом в книге электронных таблиц, где формулы (4)–(7) и (13) записаны в ячейках; значения весов, расстояний, интегрального показателя, степеней принадлежности и показателей качества разбиения совпали с машинной точностью при расхождении не более 10^{-12}. Численная устойчивость обеспечена ограничением расстояний снизу в формуле (15) и перенормированием весов после каждого возмущения. Сходимость последовательности итераций (15) к локальному минимуму или седловой точке функционала (14) установлена в работе [34]; в данном расчете она достигнута за 37 итераций при пороге 10^{-11}, а совпадение разметки при 30 случайных начальных приближениях свидетельствует об отсутствии конкурирующих локальных минимумов на рассмотренных данных. Вычислительная сложность определения весов составляет $O(mn + n^2)$, агрегирования $O(mn)$, одной итерации нечетких с-средних $O(mcn)$; полный прогон комплекса, включающий 2000 стохастических прогонов и 1000 бутстрэп-выборок, занимает около двух секунд на одном ядре процессора, серия из тысячи случайных наборов данных около шести секунд, метод α-срезов для всех 120 пар менее одной секунды.

Репликационный пакет включает программный код, книгу исходных рядов и расчетов, файл результатов в формате JSON и данные рисунков; он передан в редакцию вместе с рукописью и предоставляется корреспондирующим автором по запросу. Исходная дефаззифицированная матрица, по которой вычислены веса таблицы 2 и профили таблицы 4, приведена в таблице 10.

Таблица 10

Исходная дефаззифицированная матрица критериев

Код	Вид экономической деятельности	K_2, кВт·ч / тыс. руб.	K_4, %	K_5, %	K_6, руб. / тыс. руб.	K_7, %	K_8, %	K_9, руб. / тыс. руб.	K_{12}, %
05	Добыча угля	4,95	50,0	12,9	0,498	22,3	3,47	0,0754	19,1
06	Добыча нефти и природного газа	4,78	56,9	8,5	0,636	2,4	3,47	1,6893	25,4
07	Добыча металлических руд	11,95	43,1	16,0	1,114	57,5	3,47	0,7176	77,3
10	Производство пищевых продуктов	1,56	49,4	10,1	0,068	75,1	4,23	0,0420	9,0
16	Обработка древесины	4,68	50,2	7,8	0,231	73,6	1,60	0,3975	14,9
17	Производство бумаги и бумажных изделий	12,77	47,4	9,9	1,697	83,1	5,37	2,7072	19,1
19	Производство кокса и нефтепродуктов	2,26	49,4	10,9	0,751	29,2	4,03	0,6188	11,4
20	Производство химических веществ	8,77	39,2	12,3	2,625	90,8	5,70	1,0309	31,4
22	Производство резиновых и пластмассовых изделий	2,41	57,2	9,0	0,099	30,6	5,83	0,0041	11,8
23	Производство прочей неметаллической минеральной продукции	6,14	53,7	7,0	1,254	94,3	3,47	0,3994	15,3
24	Производство металлургическое	13,74	51,2	9,6	2,221	81,3	6,50	6,2974	20,2
25	Производство готовых металлических изделий	1,36	43,5	16,9	0,168	34,0	17,20	0,0039	11,1
28	Производство машин и оборудования	1,49	50,2	13,1	0,117	34,0	11,80	0,0029	11,5
29	Производство автотранспортных средств	1,86	59,6	8,3	0,237	43,8	19,30	0,0224	5,8
30	Производство прочих транспортных средств	2,02	47,6	12,0	0,398	23,0	22,07	0,0117	6,8
35	Обеспечение электрической энергией, газом и паром	12,69	46,3	7,2	0,573	83,7	1,33	1,7194	9,6

Примечание: составлено авторами по источникам, указанным в сносках 1 и 2. Дефаззифицированное значение равно среднему вершин треугольного нечеткого числа (l, m, u); именно по этой матрице после нормирования по направлению предпочтения вычислены веса таблицы 2 и профили таблицы 4. Полные ряды 2020–2025 годов и параметры нечетких чисел содержит книга расчетов репликационного пакета.

Ограничения. Полученные результаты ограничены шестью обстоятельствами. Выборка охватывает 16 видов экономической деятельности, по которым все восемь критериев публикуются одновременно, вследствие чего распространение выводов на промышленность России в целом требует отдельного обоснования. Внешняя проверка упорядочения по независимому ряду углеродоемкости выполнена только для пяти отраслей, охваченных переходным ключом кадастра, и результата не дала: ранговая корреляция составила минус 0,10 при уровне значимости 0,87, что при таком объеме наблюдений не позволяет ни подтвердить, ни опровергнуть внешнюю валидность упорядочения. Расширение ключа на остальные отрасли составляет предмет отдельной работы. Носители нечетких чисел построены по наблюдаемому размаху рядов и объединяют межгодовую вариацию, погрешность измерения и последствия методологических разрывов, тогда как раздельная оценка этих составляющих по открытым данным недостижима, поэтому ширина носителя не может истолковываться как оценка погрешности измерения. Знаменателем удельных показателей служит объем отгруженной продукции в текущих ценах без дефлирования, что при сопоставлении лет вносит смещение, частично компенсируемое шириной носителя. Критерии K_6, K_7 и K_9 характеризуют масштаб природоохранной деятельности, а не достигнутое сокращение выбросов, и их валидность как индикаторов готовности требует подтверждения по мере накопления

отраслевых данных о фактической динамике выбросов. Валидация по натурным данным выполнена по выбросам загрязняющих веществ, а не парниковых газов, поскольку национальный кадастр публикует выбросы по категориям источников, а не по видам экономической деятельности ОКВЭД2; построение переходного ключа и валидация по парниковым газам составляют предмет отдельной работы. Утверждения 1–3 доказаны для четкой реализации схемы с фиксированной базой, для схемы с вершинными расстояниями они подтверждены численно.

Заключение

Разработан метод оценки технологической готовности отраслей промышленности России к декарбонизации на основе методов искусственного интеллекта и нечеткого многокритериального анализа, отличающийся тем, что параметры нечеткой формализации исходных данных калибруются по двум независимым внешним основаниям, а именно по публикуемым оценкам погрешности национальной системы инвентаризации выбросов и по фактическому размаху межгодовой вариации статистических показателей. Ширина носителя нечетких чисел задается при этом эмпирически по наблюдаемым данным без экспертного назначения параметров, а ее составляющие разной природы явно перечислены и отнесены к ограничениям метода.

Предложена модификация процедуры многокритериального нормирования с фиксированной базой нормирования, реализованная в составе воспроизводимого программного комплекса, устраняющая обращение порядка при изменении состава сравниваемых альтернатив. Инвариантность модифицированной схемы к составу множества, липшицева устойчивость показателя к возмущению весов и точность интервального распространения неопределенности по α-срезам доказаны аналитически; в проведенном испытании классическая схема дала четыре случая обращения из 16, а на серии из 1000 случайных наборов данных обращение возникало в каждом наборе, тогда как модифицированная схема при неизменных весах не дала ни одного случая ни в одном наборе. На этой основе предложен численный метод α-срезов, показавший, что отнесение отраслей к крайним классам готовности разделимо при уровне принадлежности не выше 0,34, а порядок соседних отраслей внутри класса модами не подтверждается.

Нечеткой кластеризацией с обучением без учителя, относящейся к методам искусственного интеллекта, выделены два типа профиля технологической готовности к декарбонизации: технологически эффективный и природоохранно активный, устойчивость которых подтверждена бутстрэпом при тысяче повторных выборок. Степень принадлежности типу коррелирует с интегральным показателем на уровне минус 0,11, что при 16 наблюдениях статистически неотличимо от нуля и означает лишь отсутствие обнаруженной монотонной связи между типом профиля и уровнем готовности. Из ранжирования тип профиля, следовательно, не восстанавливается и требует самостоятельной процедуры выявления. Отсутствие обнаруженной связи не равнозначно доказанной независимости и относится к рассмотренной выборке.

Метод апробирован на 16 видах экономической деятельности промышленности России по данным государственной статистики за 2020–2025 годы и дает сопоставимую оценку их продвижения к углеродной нейтральности. Получено ранжирование, выделены три класса готовности, показана устойчивость результата к вариации весов, виду функций принадлежности и сокращению критериальной системы. Близким значениям интегрального показателя отвечают несовпадающие конфигурации частных оценок, которые скалярные показатели не различают, и выявление таких конфигураций составляет самостоятельный практический результат метода. Внешняя валидация по натурным данным Росприроднадзора показала отрицательную связь готовности с изменением удельных выбросов загрязняющих веществ за 2020–2024 годы ($\rho = -0{,}51$, $p = 0{,}054$), то есть отрасли с более высокой оценкой сильнее снизили выбросы на единицу физического объема производства.

Список литературы

1. Rissman J., Bataille C., Masanet E., Aden N., Morrow W.R., Zhou N. et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070 // Applied Energy. 2020. Vol. 266. Art. 114848. URL: 10.1016/j.apenergy.2020.114848 (дата обращения: 08.08.2026).

2. Порфирьев, Б. Н. Декарбонизация versus адаптация экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития // Проблемы прогнозирования. 2022. № 4(193). С. 45-54. DOI: 10.47711/0868-6351-193-45-54. EDN: JHFMGO.

3. Порфирьев Б. Н. Парадигма низкоуглеродного развития и стратегия снижения рисков климатических изменений для экономики // Проблемы прогнозирования. 2019. № 2(173). С. 3-13. EDN: IHSBHK.

4. Башмаков И. А. Анализ оценок перспектив декарбонизации российской экономики аналитическими центрами // Современная мировая экономика. 2025. Т. 3 № 3(11). С. 26-56. DOI: 10.17323/2949-5776-2025-3-3-26-56. EDN: SGTSJW.

5. Mankins J. C. Technology readiness assessments: A retrospective // Acta Astronautica. 2009. Vol. 65. № 9–10. P. 1216–1223. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058.

6. Петров А. Н., Комаров А. В. Оценка уровня технологической готовности конкурсных заявок с использованием методологии TPRL // Экономика науки. 2020.

Т. 6. № 1– 2. С. 88–99. DOI: 10.22394/2410-132X-2020-6-1-2-88-99. EDN: ARTNEL.

7. Greco S., Ishizaka A., Tasiou M., Torrisi G. On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness // Social Indicators Research. 2019. Vol. 141. № 1. P. 61–94. DOI: 10.1007/s11205-017-1832-9.

8. Ünlü H., Demirörs O., Garousi V. Readiness and maturity models for Industry 4.0: A systematic literature review // Journal of Software: Evolution and Process. 2024. Vol. 36. № 7. Art. e2641. DOI: 10.1002/smr.2641.

9. Hizam-Hanafiah M., Soomro M.A., Abdullah N. L. Industry 4.0 readiness models: A systematic literature review of model dimensions // Information. 2020. Vol. 11. № 7. Art. 364. DOI: 10.3390/info11070364.

10. Kahraman C., Cevik Onar S., Oztaysi B. Fuzzy multicriteria decision-making: A literature review // International Journal of Computational Intelligence Systems. 2015. Vol. 8. № 4. P. 637–666. DOI: 10.1080/18756891.2015.1046325.

11. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

12. Sahoo S. K., Goswami S. S. A comprehensive review of multiple criteria decision-making (MCDM) methods: Advancements, applications, and future directions // Decision Making Advances. 2023. Vol. 1. № 1. P. 25–48. DOI: 10.31181/dma1120237.

13. Bezdek J. C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm // Computers & Geosciences. 1984. Vol. 10. № 2–3. P. 191–203. DOI: 10.1016/0098-3004(84)90020-7.

14. Судаков В. А., Сивакова Т. В. Многокритериальная оценка объектов интереса на основе моделей мягких вычислений // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 8. С. 81–87. DOI: 10.17513/snt.40116. EDN: XCCTBO.

15. Вострых А. В. Метод и алгоритмы многокритериальной оценки графических пользовательских интерфейсов программных продуктов МЧС России // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 4(40). С. 57–64. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2022-4-57-64. EDN: GCHUOC.

16. Kaya İ., Çolak M., Terzi F. A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making // Energy Strategy Reviews. 2019. Vol. 24. P. 207–228. DOI: 10.1016/j.esr.2019.03.003.

17. Pour P. D., Ahmed A. A., Nazzal M. A., Darras B. M. An Industry 4.0 technology selection framework for manufacturing systems and firms using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods // Systems. 2023. Vol. 11. № 4. Art. 192. DOI: 10.3390/systems11040192.

18. Çalık A. A novel Pythagorean fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodology for green supplier selection in the Industry 4.0 era // Soft Computing. 2021. Vol. 25. № 3. P. 2253–2265. DOI: 10.1007/s00500-020-05294-9.

19. Büyüközkan G., Karabulut Y., Göçer F. Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Turkey // Applied Soft Computing. 2024. Vol. 158. Art. 111465. DOI: 10.1016/j.asoc.2024.111465.

20. Rani P., Mishra A. R., Pardasani K. R., Mardani A., Liao H., Streimikiene D. A novel VIKOR approach based on entropy and divergence measures of Pythagorean fuzzy sets to evaluate renewable energy technologies in India // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 238. Art. 117936. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117936.

21. Seker S., Aydin N. Assessment of hydrogen production methods via integrated MCDM approach under uncertainty // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. № 5. P. 3171–3184. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.232.

22. He Q., Ren X., Li W., Dong L., Hu X. Sustainability prioritization of CCUS systems with consideration of criteria interaction: A fuzzy multi-criteria decision-making framework based on 2-additive fuzzy measure and Choquet integral method // Environment, Development and Sustainability. 2026. Vol. 28. № 4. P. 8119–8143. DOI: 10.1007/s10668-024-05275-0.

23. Çolak M., Kaya İ. Multi-criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 28. Art. 101211. DOI: 10.1016/j.est.2020.101211.

24. Kumar A., Luthra S., Mangla S. K., Garza-Reyes J. A., Kazancoglu Y. Analysing the adoption barriers of low-carbon operations: A step forward for achieving net-zero emissions // Resources Policy. 2023. Vol. 80. Art. 103256. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103256.

25. Kokkinos K., Karayannis V. Supportiveness of low-carbon energy technology policy using fuzzy multicriteria decision-making methodologies // Mathematics. 2020. Vol. 8. № 7. Art. 1178. DOI: 10.3390/math8071178.

26. Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method // Computers & Operations Research. 1995. Vol. 22. № 7. P. 763–770. DOI: 10.1016/0305-0548(94)00059-H.

27. Liu Y., Eckert C.M., Earl C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements // Expert Systems with Applications. 2020. Vol. 161. Art. 113738. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113738.

28. Stević Ž., Pamučar D., Puška A., Chatterjee P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS) // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 140. Art. 106231. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106231.

29. Chen C. T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment // Fuzzy Sets and Systems. 2000. Vol. 114. № 1. P. 1–9. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00377-1.

30. Opricovic S., Tzeng G. H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS // European Journal of Operational Research. 2004. Vol. 156. № 2. P. 445–455. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.

31. Холодионова А. С., Кулик А. А. Основные аспекты декарбонизации нефтегазовой отрасли России // Экспозиция Нефть Газ. 2022. № 7(92). С. 102-106. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-7-102-106. EDN: KYSPKT.

32. Черникова О. П., Афанасьева О. В., Афанасьев Е. Г. Направления декарбонизации Российской черной металлургии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2025. Т. 68. № 1. С. 90-97. DOI: 10.17073/0368-0797-2025-1-90-97. EDN: NKRTBA.

33. Скуфьина Т. П., Самарина В. П., Самарин А. В. Процессы декарбонизации производства и перспективы Арктики как углеродно нейтральной территории // Уголь. 2022. № 6(1155). С. 54–58. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-54-58. EDN: RXYRGK.

34. Bezdek J. C., Hathaway R. J., Sabin M. J., Tucker W. T. Convergence theory for fuzzy c-means: Counterexamples and repairs // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1987. Vol. 17. № 5. P. 873–877. DOI: 10.1109/TSMC.1987.6499296.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансового университета при Правительстве Российской Федерации.

Financing: The article was prepared based on the results of research carried out using budgetary funds under a state assignment from the Financial University under the Government of the Russian Federation.