ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№3(39)/2025

**Information and mathematical technologies in science and management**

**ISSN 2413 – 0133**
**Scientific journal**

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

**Научный журнал**
**№ 3 (39)**

© Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

**2025**

ISSN 2413 – 0133 Индекс Е79114*

**EDITORIAL BOARD** **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА**

| | |
|---|---|
| Ablameyko S.V. | Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ |
| Arshinskiy L.V. | Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС |
| Berestneva O.G. | Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ |
| Boukhanovsky A.V. | Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО |
| Bychkov I.V. | Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН |
| Woern H. | Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT) |
| Voevodin V.V. | Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ |
| Wolfengagen V.E. | Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ |
| Gornov A.Y. | Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН |
| Gribova V.V. | Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН |
| Groumpos P. | Грумпос П., Греция, University of Patras |
| Zorina T.G. | Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси |
| Kazakov A.L. | Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН |
| Kalimoldaev M.N. | Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ |
| Karpenko A.P. | Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана |
| Komendantova N.P. | Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA |
| Kureichik V.V. | Курейчик В.В., д.т.н., профессор, Таганрог, ЮФУ |
| Lis R. | Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology |
| Marchenko M.A. | Марченко М.А. д.ф.-м.н., профессор РАН, Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН |
| Massel L.V. | Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Moskvichev V.V. | Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ |
| Ovtcharova J. | Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT) |
| Popov G.T. | Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет |
| Sidorov D.N. | Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Smirnov S.V. | Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН |
| Stennikov V.A. | Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Stylios C. | Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus |
| Taratukhin V.V. | Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster |
| Khamisov O.V. | Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Hodashinsky I.A. | Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР |
| Chubarov L.B. | Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ |

**EXECUTIVE EDITORIAL** **ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Chief Editor | Massel L.V. | Главный редактор | Массель Л.В. | д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Editor | Tuktarova P.A. | Редактор | Туктарова П.А. | к.э.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Editor | Gaskova D.A. | Редактор | Гаськова Д.А. | к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Editor | Massel A.G. | Редактор | Массель А.Г. | к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Tech. Editor | Popova M.D. | Техн. редактор | Попова М.Д. | Иркутск, ИСЭМ СО РАН |
| Designer | Pesterev D.V. | Дизайнер | Пестерев Д.В. | Иркутск, ИСЭМ СО РАН |

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭМ СО РАН)

**Адрес учредителя, издателя и редакции**
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - https://www.imt-journal.ru/

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
Адрес типографии: 664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14
*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.
Дата выхода 11.09.2025 г. Тираж 50 экз.

CC BY
© Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная (12+)

## Содержание

**Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта**

**Дорогов А.Ю.** Генеративные модели на основе пирамидальных нейронных сетей быстрого обучения 5

**Ломакина Л.С., Чернобаев И.Д., Беляева Л.А.** Нейро-нечеткая система классификации состояний объектов сложной структуры 17

**Фелагерева Е.Ю., Рудоман Н.Р., Кузякина М.В.** Разработка архитектуры нейронной сети для восстановления радиосигнала с БПЛА 26

**Информационные и интеллектуальные системы и технологии**

**Бычков И.В., Клименко О.А., Рычкова Е.В., Шабальников И.В.** Тренды создания, распространения и искажения информации на примере научной корпорации 39

**Лезин А.Г., Массель Л.В.** Картирование знаний как один из инструментов построения экосистемы знаний в энергетике 46

**Массель А.Г., Мамедов Т.Г.** Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности 61

**Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике**

**Зорина Т.Г., Юркевич О.И., Кабанов П.А.** Оптимизация тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей 72

**Северина Я.Д., Шакиров В.А.** Оценка эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов 88

**Суджян А.М., Берберова М.А., Железняков Р.А., Хачатрян А.А., Лазарев А.Ю., Магомедов Р.И., Юдин В.М.** Одномерная модель теплогидравлики в канале с водой при сверхкритических параметрах 104

**Корнюшкин Д.А.** Внедрение нейросетевого регулятора в систему управления орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе 114

**Цифровая экономика и управление**

**Черкашин А.К.** Представительские функции в системах организационного управления: математическое метамоделирование 124

**Рябов И.Ю., Понькина Е.В., Строков А.С.** Ситуационное моделирование возможностей достижения стратегических целей сельским хозяйством России: анализ на уровне страны и отдельных регионов 140

**Программные системы и комплексы**

**Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г.** Использование технологии In-Memory Data Grid при исследовании живучести энергетических инфраструктур 154

**Семенов Е.С.** Алгоритмы трехмерного моделирования электронно-оптической системы гиротронов, используемые в программе ANGEL-TA-S3D 164

**Рыбанов А.А., Каблов В.Ф.** Применение алгоритмов поиска ассоциативных правил для определения технологически значимых сочетаний компонентов в рецептурах резиновых смесей 177

## Content

**Methods, technologies and applications of artificial intelligence**

**Dorogov A.Yu.** Generative models based on pyramid neural networks of fast learning 5

**Lomakina L.S., Chernobaev I.D., Beliaeva L.A.** Neuro-fuzzy classification system for states of objects of complex structure 17

**Felagereva E.Yu., Rudoman N.R., Kuzyakina M.V.** Development of neural network architecture for radio signal recovery from UAVs 26

**Information and intelligent systems and technologies**

**Bychkov I.V., Klimenko O.A., Rychkova E.V., Shabalnikov I.V.** Trends in the creation, dissemination and distortion of information using the example of a scientific corporation 39

**Lezin A.G., Massel L.V.** Knowledge mapping as one of the tools for building a knowledge ecosystem in the energy sector 46

**Massel A.G., Mamedov T.G.** Integration of mathematical and cognitive modeling in research on the development of the fuel and energy complex from the perspective of energy security 61

**Mathematical, information and intelligent technologies in energy**

**Zoryna T.G., Yurkevich O.I., Kabanov P.A.** Optimization of tariff policy in the energy sector based on predictive modeling of heat loads using neural networks 72

**Severina Ya.D., Shakirov V.A.** Evaluation of heuristic algorithms of multi-criteria optimization for sizing of hybrid renewable energy systems 88

**Sujyan A.M., Berberova M.A., Zheleznyakov R.A., Khachatryan A.A., Lazarev A.Yu., Magomedov R.I., Yudin V.M.** One-dimensional thermal-hydraulic model in a channel with water at supercritical parameters 104

**Kornyushkin D.A.** Implementation of a neural network controller in the irrigation control system of a condenser of a refrigeration unit located at a hockey stadium 114

**Digital Economy and Management**

**Cherkashin A.K.** Representative capacity in organizational management systems: mathematical metamodeling 124

**Ryabov I.Yu., Ponkina E.V., Strokov A.S.** Situational modeling of opportunities for achieving strategic goals by Russian agriculture: analysis at the national and regional levels 140

**Software systems and complexes**

**Voskoboinikov M.L., Feoktistov A.G.** Using In-Memory Data Grid technology in energy infrastructure resilience analysis 154

**Semenov E.S.** Algorithms for three-dimensional simulation of electron-optical system of the gyrotrons used in the ANGEL-TA-S3D program 164

**Rybanov A.A., Kablov V.F.** Application of association rule mining algorithms to identify technologically significant component combinations in rubber compound formulations 177

## Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.93'12:004.032.26
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.001

# Генеративные модели на основе пирамидальных нейронных сетей быстрого обучения

**Дорогов Александр Юрьевич**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии»
Россия, Санкт-Петербург, *vaksa2006@yandex.ru*

**Аннотация.** В статье предложен способ построения генеративных моделей на основе пирамидальных нейронных сетей быстрого обучения (БНС). В основу построения моделей положен вероятностный метод главных компонент (PPCA). Метод PPCA позволяет аналитически построить матрицы оптимальных декодеров, способных восстанавливать образы из случайных латентных переменных малой размерности, распределённых по нормальному вероятностному закону. Реализация PPCA-декодеров в классе БНС позволяет представить декодеры в виде последовательно-параллельных структур, обеспечивающих высокое быстродействие за счёт структурного распараллеливания операций. В работе представлены методы обучения БНС к матрицам декодеров. Обучение выполняется за конечное число шагов и не требует итерационных процедур. Приводятся примеры построения реализующих БНС для набора данных MNIST. Показаны результаты генерации образов, подобных набору MNIST. Выполнено сравнение с классическим вариационным автоэнкодером. Определена область целесообразного использования генеративных моделей PPCA.

**Ключевые слова:** генеративная модель, вариационный автоэнкодер, вероятностный метод главных компонент, быстрая нейронная сеть, пирамидальная структура

**Цитирование:** Дорогов А.Ю. Генеративные модели на основе пирамидальных нейронных сетей быстрого обучения / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 5-16. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.001.

**Введение.** Термин "генеративная модель" используется для описания моделей, которые способны из независимого шума генерировать экземпляры выходных образов подобные образам обучающей выборки. Генеративность заключается в том, что модель, обученная на некоей базе данных, может воспроизводить новые образы, которые раньше не существовали и которых не было в исходной базе данных, но они вполне реалистичны и сохраняют стилевую близость к обучающим данным.

К семейству генеративных моделей относятся вариационные автоэнкодеры (VAE) [1, 2]. Обычный автоэнкодер, состоит из двух основных частей: энкодера, преобразующего входные данные в сжатое представление (латентное или иначе скрытое пространство), и декодера, который восстанавливает данные из латентного пространства. Вариационный автоэнкодер добавляет в эту архитектуру случайный шум, предполагая, что в латентном пространстве данные распределены согласно предварительно выбранному вероятностному распределению, чаще всего нормальному с единичной матрицей ковариаций (рис. 1).

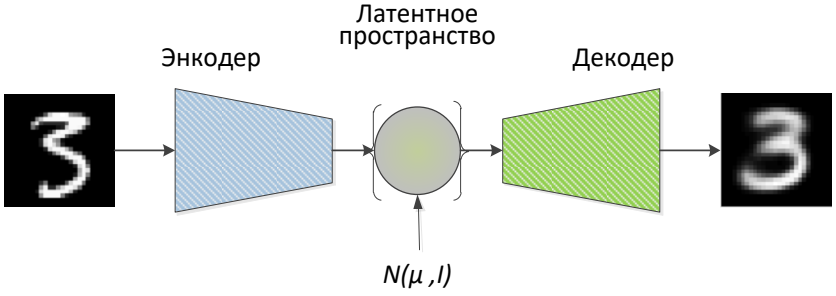



**Рис. 1.** Архитектура автоэнкодера

При обучении автоэнкодера одновременно решаются две оптимизационные задачи:

– Модель энкодера стремится связать $d$ -мерный вектор обучающей выборки $t$ с некоторым $q$ -мерным случайным вектором латентных переменных с нормальным законом вероятностного распределения:

$$x = f(t, w_E) \to N(\mu, I),$$

где $w_E$ – параметры энкодера, $f(t, w_E)$ – функция отображения целевых образов в латентное пространство, при этом обязательным требованием является обеспечить для значений переменной $x$, рассматриваемых как случайные, максимальное соответствие предварительно заданному нормальному вероятностному распределению $N(\mu, I)$ с математическим ожиданием $\mu$ и единичной ковариационной матрицей. Это требование приводит к тому, что образы обучающей выборки статистически непрерывно покрывают все латентное пространство.

– Модель декодера $t = \varphi(x; w_D)$ с параметрами $w_D$, напротив, обучается правильно восстанавливать образ $t$ по случайной латентной переменной $x$ при условии, что она соответствует заданному закону распределения $N(\mu, I)$, ожидаемому декодером.

Для реализации энкодера и декодера обычно используются многослойные нейронные сети, которые обучаются методом обратного распространения ошибок с минимизацией одновременно двух критериев: совпадения образов на входе и выходе автоэнкодера и соответствия эмпирического распределения скрытых переменных предварительно заданному вероятностному закону. После того, как обучение завершено, энкодер уже больше не требуется. Для генерации образов на вход декодера достаточно подать значение латентной переменной, выбранной случайным образом из априорно заданного распределения $N(\mu, I)$. Обученный декодер для любого латентного вектора, выбранного из этого распределения, будет возвращать реалистичное цифровое изображение.

Улучшенным вариантом VAE является условный автоэнкодер (Conditional VAE). В этой архитектуре существует дополнительный вход, на который поступает метка класса. По существу, для каждого класса формируется свой вариационный автоэнкодер, который обучается на примерах, принадлежащих только этому классу. Благодаря этому решению реалистичность генерируемых образов улучшается, но приводит к необходимости использования дополнительных ресурсов при реализации архитектуры CVAE. Для больших нейронных сетей процедура обучения VAE и CVAE занимает длительное время и требует большого объёма выборок. Процесс обучения не всегда сходится и может приводить к локальным минимумам.

Вариационные автоэнкодеры имеют линейный прототип− это вероятностный метод главных компонент (англ. Probabilistic Principal Component Analysis – PPCA) [3]. Отличительная особенность метода PPCA состоит в том, что он позволяет найти аналитическое решение для функции отображения из пространства образов в пространство латентных переменных и обратно. Полученное решение можно непосредственно использовать для построения декодера генеративной модели, необходимость в энкодере в этом случае отпадает.

В данной работе будет рассмотрено построение генеративных моделей с использованием метода PPCA на основе многослойных пирамидальных нейронных сетей быстрого обучения [4]. Благодаря самоподобной структуре, сети данного класса способны быстро обучаться к произвольным функциям. Этими функциями могут быть, например, координатные компоненты многомерного отображения векторов из латентного пространства в пространство образов. Алгоритм обучения быстрых нейронных сетей принципиально отличается от метода обратного распространения ошибки отсутствием длительной итерационной процедуры по

минимизации ошибки. Обучение всегда выполняется за конечное число шагов с гарантированной точностью.

**1. Вероятностный метод главных компонент.** Идея метода PPCA базируется на теоретических разработках конца 90-х годов прошлого века, имеющих общее название Байесовские методы машинного обучения [5, 6, 7]. Следуя работе [5], рассмотрим кратко основные положения данного решения. Согласно методу PPCA, связь между образами обучающей выборки $t$ и латентными переменными $x$ задаётся линейным отображением вида:

$$t = Wx + \mu + \varepsilon, \tag{1}$$

где $W$ – это матрица размерностью $d \times q$, $\varepsilon \sim N\left(0, \sigma^2 I\right)$ – случайный шум, соответствующий нормальному закону с нулевым средним, диагональной ковариационной матрицей и дисперсией $\sigma^2$, параметр μ позволяет модели данных иметь ненулевое среднее значение. Для латентных переменных декларируется изотропный нормальный закон распределения с единичной дисперсией:

$$p\left(x\right) = \left(2\pi\right)^{-q/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} x^T x\right\}. \tag{2}$$

Выражение (1) подразумевает распределение вероятностей по t-пространству для данного $x$ в виде:

$$p\left(t\middle|x\right) = \left(2\pi\sigma^2\right) \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}\left\|t - Wx - \mu\right\|^2\right\}. \tag{3}$$

Используя (2) и (3), получим предельное (маргинальное) распределение для образов $t$:

$$p\left(t\right) = \int p\left(t\middle|x\right) p\left(x\right) = \left(2\pi\right)^{-d/2} \left|C\right|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(t-\mu\right)^T C^{-1}\left(t-\mu\right)\right\},$$

где $C = \sigma^2 I + WW^T$, ковариационная матрица (что также можно непосредственно получить из выражения (1)). Используя правило Байеса, можно вычислить апостериорное распределение скрытых переменных $x$ при заданном наблюдаемом $t$,

$$p\left(x\middle|t\right) = \frac{p\left(t\middle|x\right) p\left(x\right)}{p\left(t\right)} = \left(2\pi\right)^{-q/2} \left|\sigma^2 M\right|^{1/2} \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{x - M^{-1}W^T\left(t-\mu\right)\right\}^T \left(\sigma^{-2} M\right)\left\{x - M^{-1}W^T\left(t-\mu\right)\right\}\right],$$

где апостериорная ковариационная матрица задаётся выражением:

$$\sigma^2 M^{-1} = \sigma^2\left(\sigma^2 I + W^T W\right)^{-1}.$$

Размерность матрицы $M$ равна $q \times q$, т.е. определяется размерностью латентного пространства, в то время как размерность ковариационной матрицы $C$ определяется размерностью пространства образов $d \times d$. Надо иметь в виду, что $q \ll d$. Для определения отображения (1) запишем логарифмическую функцию правдоподобия по обучающей выборке размером $N$:

$$L = \sum_{n=1}^{N} \ln\left\{p\left(t_n\right)\right\} = -\frac{N}{2}\left\{d\ln\left(2\pi\right) + \ln\left|C\right| + tr\left(C^{-1}S\right)\right\},$$

где матрица

$$S = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(t_n - \mu\right)\left(t_n - \mu\right)^T,$$

является выборочной ковариационной матрицей обучающей выборки $\{t_n\}$, $N$ – размер обучающей выборки. Для нахождения оптимального отображения функция правдоподобия максимизируется по переменным $\mu$ и $W$, следуя условиям экстремума:

$$\frac{dL}{d\mu}=0, \qquad \frac{dL}{dW}=0.$$

В работе [5] показано, что оптимальные значения определяются выражениями:

$$\mu=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}t_n,$$

$$W=U_q\left(\Lambda_q-\sigma^2 I\right)^{1/2}R, \tag{4}$$

где матрица $U_q$ (размером $d\times q$) содержит $q$ векторов-столбцов, которые являются собственными векторами выборочной ковариационной матрицы

$$S=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(t_n-\mu\right)\left(t_n-\mu\right)^T$$

с соответствующими собственными значениями $\lambda_1,\lambda_2,\cdots\lambda_q$, размещёнными в диагональной матрице $\Lambda_q$ в порядке убывания; $R-$произвольная $q\times q$ ортогональная матрица вращения. Также показано, что при оптимальном выборе $W$ оценка максимального правдоподобия для $\sigma^2$ в $t-$пространстве определяется как

$$\sigma^2=\frac{1}{d-q}\sum_{j=q+1}^{d}\lambda_j,$$

где $\lambda_{q+1},\lambda_{q+2},\cdots\lambda_d$ – наименьшие собственные значения матрицы $S$. Для восстановления образа по латентной переменной может быть использовано математического ожидание для модели (1):

$$t=Wx+\mu.$$

В [5] отмечается, что такая оценка возможна, но не является оптимальной. Показано, что оптимальная оценка может быть получена с использованием следующего выражения:

$$t=W\left(W^TW\right)^{-1}Mx+\mu.$$

Таким образом, функция декодера генеративной модели определяется матрицей $W$ или матричным произведением $H=W\left(W^TW\right)^{-1}M$, где $M=\sigma^2 I+W^TW.$ Напомним, что $W$ является прямоугольной матрицей размерности $d\times q$, а $M$ – квадратной матрицей размерности $d\times d$ и $q\ll d$.

**2. Пирамидальные нейронные сети быстрого обучения.** Теория данного класса сетей представлена в работах [4, 8]. Рассмотрим построение декодера на обратно-ориентированных пирамидальных нейронных сетях. Эти сети имеют глубокие связи с алгоритмом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Возьмём за основу топологическую модель «Кули-Тьюки с прореживанием по времени» [9]:

$$U^m=\left\langle u_{n-1}u_{n-2}\cdots u_{m+1}u_m v_{m-1}v_{m-2}\cdots v_1v_0\right\rangle,$$

$$V^m=\left\langle u_{n-1}u_{n-2}\cdots u_{m+1}v_m v_{m-1}v_{m-2}\cdots v_1v_0\right\rangle,$$

$$z^m=\left\langle u_{n-1}u_{n-2}\cdots u_{m+1}v_{m-1}v_{m-2}\cdots v_1v_0\right\rangle.$$

В этой модели кортежи представляют собой поразрядные представления позиционных номеров рецепторов – $U^m$, аксонов – $V^m$ и нейронных ядер – $z^m$ в пределах нейронного слоя $m$. В свою очередь, разрядные переменные $u_m$ – это позиционный номер рецептора в

пределах ядра, а $v_m$ – позиционный номер аксона в пределах ядра слоя $m$ (нумерация рецепторов, аксонов и нейронных ядер начинается с нуля). Сеть имеет послойную модульную структуру с числом слоев, равным $n$. Нейронный модуль – это нейронное ядро (в терминах БПФ нейронное ядро соответствует базовой операции, например, «бабочка»). Все ядра в пределах слоя $m$ имеют размерности $p_m$ – по входу и $g_m$ – по выходу. Нейронное ядро представляет собой матрицу весов размером $p_m \times g_m$, Функции активации и входы смещений отсутствуют. Совокупность чисел $p_0, p_1, \cdots, p_{n-1}$ и $g_0, g_1, \cdots, g_{n-1}$ определяют структурные характеристики сети. Сеть линейна и относится к категории быстрых нейронных сетей (БНС). Для построения пирамидальной сети выберем структурные характеристики сети следующим образом:

– размерности рецепторных полей сети положим равными $p_0 = p_1 = \cdots = p_{n-2} = 1$, но значение $p_{n-1} \neq 1$ может быть выбрано произвольным, в данном случае это значение выбирается равным размерности латентного пространства; в этом случае размерность сети по входу будет равна $N = p_0 p_1 \cdots p_{n-1} = p_{n-1}$;

– размерности аксоновых полей сети зададим произвольными натуральными целыми числами $g_0, g_1, \cdots, g_{n-1}$; размерность сети по выходу в этом случае будет равна $M = g_0 g_1 \cdots g_{n-1}$; это значение выбирается равным размерности $t-$ пространства.

Топологическая модель при данных структурных характеристиках будет иметь вид:

$$U^m = \langle u_{n-1} 0_{n-2} \cdots 0_{m+1} 0_m v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle,$$
$$V^m = \langle u_{n-1} 0_{n-2} \cdots 0_{m+1} v_m v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle,$$
$$z^m = \langle u_{n-1} 0_{n-2} \cdots 0_{m+1} v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle.$$

Появление нулей в представлении модели объясняется тем, что при основании разрядной переменной, равной 1, эта переменная может принимать только нулевое значение. На рис. 2 приведён пример топологической модели трёхслойной пирамидальной нейронной сети для структурных параметров $[p_0 p_1 p_2] = [113]$, $[g_0 g_1 g_2] = [227]$.

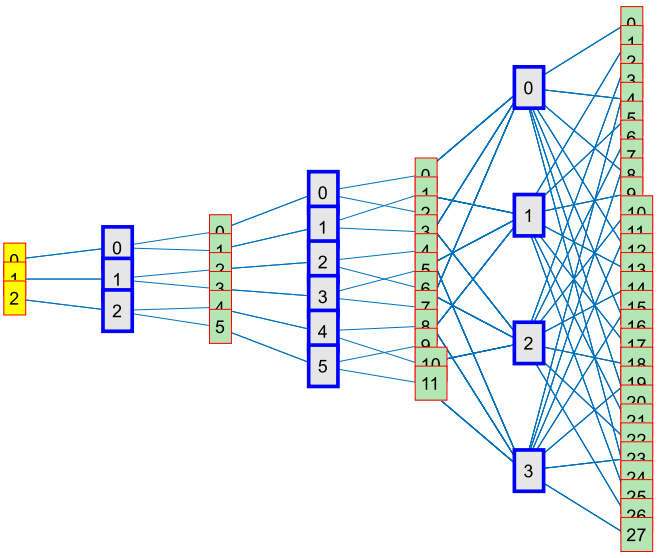


**Рис. 2.** Топология пирамидальной нейронной сети. Синим цветом выделены нейронные ядра

Сеть имеет размерность, по входу равную 3, а по выходу 28. В [8] показано, что пирамидальная сеть обратной ориентации может хранить произвольные дискретные функции, размерность которых определяется размерностью выхода сети, а их количество –

размерностью входа. Например, сеть, показанная на рис. 2 способна хранить три произвольные вектор-функции размерностью 28. Более того, на её выходе можно получить все линейные комбинации этих функций, т.е. сеть обладает квантовым эффектом.

Следуя [10], рассмотрим кратко способ обучения сети. В соответствии с обобщённой теоремой факторизации элементы матрицы БНС представляются в виде:

$$h(U,V) = w^{n-1}_{z^{n-1}}(u_{n-1}, v_{n-1})\, w^{n-2}_{z^{n-2}}(0_{n-2}, v_{n-2}) \cdots w^{0}_{z^{0}}(0_0, v_0), \tag{5}$$

где $U,V$ – позиция элемента в матрице БНС, $w^m_{z^m}(u_m, v_m)$ – элемент матрицы нейронного ядра с номером $z^m$ в слое $m$, $u_m, v_m$ – позиция элемента в матрице нейронного ядра. Пусть образы $f^k(V)$ представляют собой набор, состоящий из $p_{n-1}$ дискретных функций, заданных на интервале длинной $M$. Выполним мультипликативную декомпозицию каждой функции по переменным $v_i$, начиная со старшего разряда [8], в результате функция образа представляется в виде:

$$f^k(V) = \varphi^k_{i^{n-1}}(v_{n-1})\, \varphi^k_{i^{n-2}}(v_{n-2}) \cdots \varphi^k_{i^0}(v_0), \tag{6}$$

где $i^m = \langle v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle$ – позиционный номер множителя уровня $m$, $k$ – порядковый номер функции. Сравнивая выражения (5) и (6), непосредственно получим следующее правило обучения нейронной сети:

$$\begin{aligned}
&w^{n-1}_{z^{n-1}}(u_{n-1}, v_{n-1}) = \varphi^k_{i^{n-1}}(v_{n-1}) \quad для\ m = n-1,\\
&w^{m}_{z^{m}}(0_m, v_m) = \varphi^k_{i^m}(v_m) \quad для\ m < n-1,\\
&z^m = \langle u_{n-1} 0_{n-2} \cdots 0_{m+1} v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle,\\
&i^m = \langle v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle.
\end{aligned}$$

Предварительно, для упорядочивания хранимых функций, должно быть установлено взаимно-однозначное соответствие $k \leftrightarrow u_{n-1}$ между порядковым номером функции и разрядной переменной $u_{n-1}$. Считывание памяти выполняется установкой на входе нейронной сети унарного кода, в котором только один из разрядов равен 1, а остальные нули. Для сети, показанной на рис. 2 – это будут комбинации $[0\,0\,1]$, $[0\,1\,0]$ или $[1\,0\,0]$. При использовании кодов $[1\,1\,0]$ образы 1 и 2 складываются, а при кодах $[1\,-1\,0]$ из первого образа вычитается второй, в общем случае при значениях на входе $[\alpha\ \beta\ \gamma]$ на выходе получим образ $q = \alpha f^1 + \beta f^2 + \gamma f^3$. Заметим, что тот же результат можно получить, если умножить вектор-строку $[\alpha\ \beta\ \gamma]$ на матрицу размерностью 3×28, строки которой совпадают с вектор-функциями $f^1$, $f^2$ и $f^3$:

$$[\alpha\ \beta\ \gamma] \times \begin{bmatrix} f^1_0 & f^1_1 & \cdots & f^1_{27} \\ f^2_0 & f^2_1 & \cdots & f^2_{27} \\ f^3_0 & f^3_1 & \cdots & f^3_{27} \end{bmatrix} = \alpha f^1 + \beta f^2 + \gamma f^3.$$

Отсюда следует, что пирамидальная нейронная сеть является факторизованным представлением прямоугольной матрицы, строками которой являются хранимые образы. Это можно доказать, более строго используя понятие числа степеней свободы [11]. Хранимые образы – это произвольные функции, например, это могут быть строки матрицы декодера. Таким образом, мы показали, что нейронная сеть данного класса может быть использована для построения произвольного декодера генеративной модели, построенной по методу PPCA. Факторизованное представление матрицы состоит из параллельных вычислительных

элементов, организованных, как нейронная сеть, что позволяет обеспечить высокое быстродействие при использовании специализированных процессоров с распараллеливанием операций. В этом состоит главное преимущество нейросетевой реализации.

Пирамидальную нейронную сеть не сложно обобщить на двумерный случай, удобный для обработки изображений. Сохраним для каждой координаты изображения тип топологии рассмотренной выше одномерной модели, тогда топологическая модель пирамидальной сети памяти для двумерного случая примет вид:

$$U_*^m = \left\langle u_{n-1}^* 0_{n-2}^* \cdots 0_{m+1}^* 0_m^* v_{m-1}^* v_{m-2}^* \cdots v_1^* v_0^* \right\rangle,$$

$$V_*^m = \left\langle u_{n-1}^* 0_{n-2}^* \cdots 0_{m+1}^* v_m^* v_{m-1}^* v_{m-2}^* \cdots v_1^* v_0^* \right\rangle,$$

$$z_*^m = \left\langle u_{n-1}^* 0_{n-2}^* \cdots 0_{m+1}^* v_{m-1}^* v_{m-2}^* \cdots v_1^* v_0^* \right\rangle.$$

Символ (*) здесь заменяет символы $x$ и $y$, означающие принадлежность к координатам изображения. Элементы четырёхмерной матрицы БНС для данной модели также выражаются через элементы нейронных ядер:

$$h\left(U_y U_x, V_y V_x\right) = w^{n-1}_{z_x^{n-1}, z_y^{n-1}}\left(u_{n-1}^y, u_{n-1}^x; v_{n-1}^y, v_{n-1}^x\right) w^{n-2}_{z_x^{n-2}, z_y^{n-2}}\left(0_{n-2}^y, 0_{n-2}^x; v_{n-2}^y, v_{n-2}^x\right) \cdots w^0_{z_x^0, z_y^0}\left(0_0^y, 0_0^x; v_0^y, v_0^x\right),$$

а мультипликативная декомпозиция сохраняемых изображений имеет вид:

$$f^k\left(V_y V_x\right) = \varphi^k_{i_x^{n-1}, i_y^{n-1}}\left(v_{n-1}^y, v_{n-1}^x\right) \varphi^k_{i_x^{n-2}, i_y^{n-2}}\left(v_{n-2}^y, v_{n-2}^x\right) \cdots \varphi^k_{i_x^0, i_y^0}\left(v_0^y, v_0^x\right).$$

Сравнивая два последних выражения, получим правило обучения двумерной пирамидальной нейронной сети:

$$w^{n-1}_{z_x^{n-1}, z_y^{n-1}}\left(u_{n-1}^y, u_{n-1}^x; v_{n-1}^y, v_{n-1}^x\right) = \varphi^k_{i_x^{n-1}, i_y^{n-1}}\left(v_{n-1}^y, v_{n-1}^x\right) \quad для\ m = n-1,$$

$$w^{n-2}_{z_x^{n-2}, z_y^{n-2}}\left(0_{n-2}^y, 0_{n-2}^x; v_{n-2}^y, v_{n-2}^x\right) = \varphi^k_{i_x^{n-2}, i_y^{n-2}}\left(v_{n-2}^y, v_{n-2}^x\right) \quad для\ m < n-1,$$

$$z_*^m = \left\langle u_{n-1}^* 0_{n-2}^* \cdots 0_{m+1}^* v_{m-1}^* v_{m-2}^* \cdots v_1^* v_0^* \right\rangle,$$

$$i_*^m = \left\langle v_{m-1}^* v_{m-2}^* \cdots v_1^* v_0^* \right\rangle.$$

Предварительно, для упорядочивания хранимых функций, должно быть установлено взаимно-однозначное соответствие $k \leftrightarrow \left\langle u_{n-1}^y, u_{n-1}^x \right\rangle$ между порядковым номером функции и значениями переменных $u_{n-1}^y, u_{n-1}^x$. Считывание памяти выполняется установкой на входе нейронной сети двумерной маски размерностью $p_{n-1}^y \times p_{n-1}^x$, в которой только один из пикселов равен 1, а остальные нули. На рис 3. показана топологическая модель двумерной БНС.

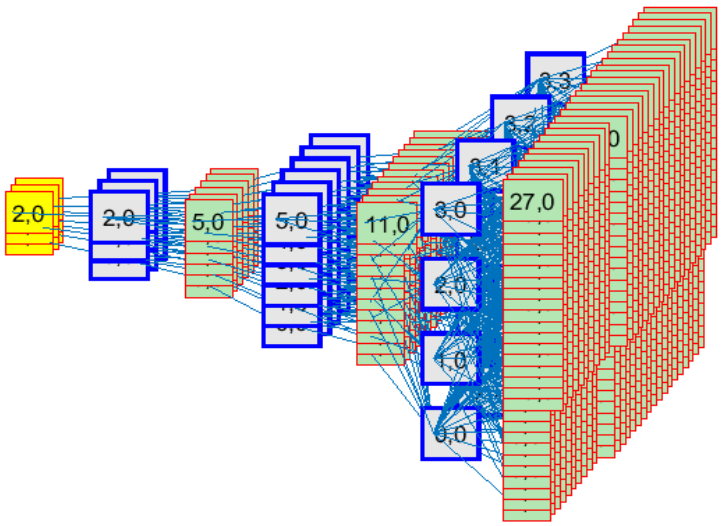



**Рис. 3.** Топологическая модель двумерной пирамидальной БНС

По входу сеть имеет размерность 3×3, а по выходу 28×28, размерность латентного пространства равна 9. Сеть трёхслойная, структурные характеристики модели определяются размерностями рецепторных и аксоновых полей нейронных ядер по слоям: $p^x = p^y = [1\,1\,3]$, $g^x = g^y = [2\,2\,7]$, символы $x$ и $y$ обозначают пространственные координаты. Сеть представляет собой факторизацию четырёхмерной матрицы размерностью [3×3, 28×28] и способна сохранять 9 произвольных изображений размерностью 28×28.

**3. Результаты экспериментов.** Эксперименты были проведены на наборе данных MNIST [12]. Набор содержит двумерные образы рукописных цифр от 0 до 9 в виде пиксельных изображений размером 28×28. Объем обучающей выборки равен 60000 образов, тестовая выборка содержит 10000 изображений. На рис. 4 показана выборка с десятью представителями для каждого класса. При проведении экспериментов все примеры выборок предварительно нормировались по энергии к единичному уровню.

**Рис. 4.** Выборка из набора рукописных цифр

Размерность латентного пространства была выбрана равной 9. Для построения декодера в равной степени можно использовать как одномерную, так и двумерную реализацию сети. Вычисление матрицы декодера $H = \|h(V,U)\|$ удобно производить для одномерного случая, следуя выражению (4). По этой матрице можно непосредственно построить одномерную сеть, используя столбцы, как функции обучающего множества для сети. Одномерная сеть будет иметь размерность 9 по входу и 784=28×28 по выходу. Для перехода к двумерному образу выходной вектор переформатируется к матрице заменой одномерного индекса координат двухразрядным числом $V = \langle V^y, V^x \rangle$, с основаниями разрядов, равными размерностям изображения по осям $x$ и $y$, в данном случае 28×28.

Для построения двумерной нейронной сети матрицу $H$ следует привести к четырёхмерной форме, это можно сделать представлением номеров строк и столбцов в двухразрядном виде $V = \langle V^y, V^x \rangle$ и $U = \langle u^y_{n-1}, u^x_{n-1} \rangle$. Обучающими образами сети будут являться двумерные плоскости четырёхмерной матрицы, определяемые разрядами $u^y_{n-1}, u^x_{n-1}$. Реализация двумерной сети показана на рис. 3.

Матрица декодера рассчитывалась по обучающей выборке, состоящей из 30000 примеров в двух вариантах, для оптимального и не оптимального восстановления. На рис. 5a) и 5b) показаны результаты реконструкции образов при подаче на вход декодера случайных векторов латентных переменных. Разница между двумя способами реконструкции визуально не замечена. Для сравнения на рис. 5 (c) показан результат реконструкции, полученной VAE – автоэнкодером, построенным на основе свёрточной нейронной сети, реализованной на платформе МАТЛАБ 2021b [13] для той же обучающей выборки. Очевидно, что генеративная модель на основе свёрточной нейронной сети даёт лучший результат, чем линейный подход

на основе метода PPCA. Тем не менее построенные линейные генеративные модели являются рабочими, а восстанавливаемые образы вполне узнаваемы, при этом время построения генеративной модели PPCA на порядок меньше, чем модели VAE. Увеличение размера обучающей выборки практически не влияет на результаты.

a) не оптимальная реконструкция PPCA

b) оптимальная реконструкция PPCA

c) реконструкция VAE сверточной нейронной сетью

**Рис. 5.** Результаты реконструкции образов одиночными генеративными моделями

Дальнейшие эксперименты показали, что метод PPCA позволяет получить вполне удовлетворительные результаты при реализации условного множественного декодера (аналог CVAE). В этом случае декодеры PPCA строятся для каждого класса раздельно, при этом используются обучающие примеры конкретного класса. На рис. 6 показаны примеры множественной реконструкции на основе метода PPCA. Каждый столбец в таблице соответствует одной генеративной модели класса, а каждая строка – одной случайной реализации вектора латентных переменных.

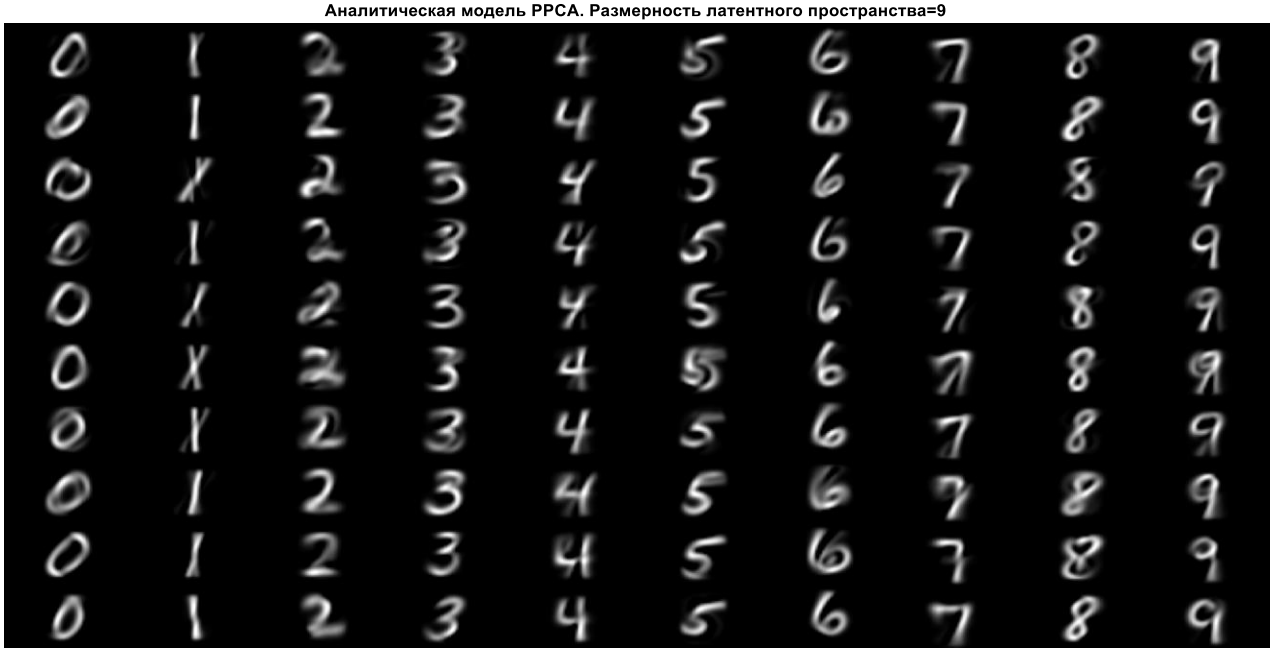



**Рис. 6.** Результаты реконструкции образов множественными генеративными моделями

Для построения матриц декодеров использовались примерно 6000 примеров для каждого класса.

**Заключение.** Генеративные модели обладают необычной способностью генерации из случайных векторов реалистических образов, по стилю соответствующих образам обучающей выборки, но не повторяющих их. Эту способность можно использовать, например, для

расширения обучающей выборки при построении нейросетевых классификаторов. Хорошие результаты можно получить при построении генеративных моделей на основе нелинейных нейросетевых VAE и CVAE автоэнкодеров, обучаемых методом обратного распространения ошибки. В данной работе рассмотрен альтернативный вариант построения линейных генеративных моделей на основе вероятностного метода главных компонент (PPCA). В отличие от классических VAE моделей, модель генеративного PPCA-декодера строится аналитически и не требует длительного итерационного обучения, при этом сохраняется приемлемое качество генерации образов. В статье показано, что построенные матрицы декодеров могут быть эффективно реализованы в классе быстрых нейронных сетей. Настройка реализующей БНС выполняется за конечное число шагов, а число вычислительных операций при этом примерно такое же, как и число операции при генерации образа. Топология БНС задаётся аналитической моделью и генерируется автоматически. Генеративная модель для изображений может быть реализована как в одномерном, так и двумерном варианте БНС.

## Список источников


1. Doersch C. Tutorial on variational autoencoders, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1606.05908.
2. Kingma D.P., Welling M. Auto-encoding variational bayes, 2022, DOI:10.48550/arXiv.1312.6114.
3. Tipping M.E., Bishop Ch.M. Probabilistic principal component analysis. Journal of the Royal statistical society series B: Statistical methodology, 1999, vol. 61, part 3, pp. 611-622, DOI:10.1111/1467-9868.00196
4. Дорогов А.Ю. Самоподобные нейронные сети быстрого обучения / А.Ю. Дорогов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. – 188 с. – URL:dorogov.su.
5. Tipping M.E., Bishop C.M. Mixtures of probabilistic principal component analyzers. Neural Computation, no. 11(2), pp. 443-482, available at: http://www.miketipping.com/papers.htm.
6. Christopher M. Bishop. Variational Principal Components. In Proceedings Ninth International Conference on Artificial Neural Networks, ICANN'99, IEE, volume 1, pages 509–514.
7. Бишоп К.М. Распознавание образов и машинное обучение.: Пер. с англ. / К.М. Бишоп. – СПб.: ООО "Диалектика", 2020. – 960 с. – ISBN 978-5-907144-55-2.
8. Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 3. Пирамидальные нейронные сети с глубокой степенью обучения / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 2(34). – С. 19-32 – DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.002.
9. Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 1. Стратифицированные модели самоподобных нейронных сетей и быстрых преобразований / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С. 5-20. – DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.001.
10. Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 2. Методы обучения быстрых нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 5-19. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001.
11. Дорогов А.Ю. Пластичность самоподобных нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 3(35). – С. 33-43. – DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.003.
12. THE MNIST DATABASE of handwritten digits. Available at: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/.
13. Документация МАТЛАБ 2021b. – URL: https://docs.exponenta.ru/deeplearning/ug/train-a-variational-autoencoder-vae-to-generate-images.html?searchHighlight=VAE


***Дорогов Александр Юрьевич.*** *Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматики и процессов управления» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) «ЛЭТИ», главный научный сотрудник ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии». Основные направления исследований автора связаны с интеллектуальным анализом данных, цифровой обработкой сигналов, проектированием быстрых преобразований и нейронных сетей быстрого обучения, разработкой аналитических платформ, моделированием радио-телекоммуникационных систем. AuthorID: 17611, SPIN: 8645-5873, ORCID: 0000-0002-7596-6761, vaksa2006@yandex.ru, г. Санкт-Петербург, ул. Попова, 5.*

UDC 004.93'12:004.032.26
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.001

# Generative models based on pyramid neural networks of fast learning

**Alexander Yu. Dorogov**

St. Petersburg state electrotechnical university
PJSC "Information telecommunication technologies" ("Inteltech"),
Russia, St. Petersburg, *vaksa2006@yandex.ru*

**Abstract.** The article proposes a method for constructing generative models based on pyramid neural networks of fast learning (FNN). The model construction is based on the probabilistic principal component method (PPCA). The PPCA method allows us to analytically construct matrices of optimal decoders that are capable to reconstructing images from random latent variables of small dimension distributed according to a normal probability law. The implementation of PPCA- decoders in the FNN class makes it possible to represent decoders in the form of series-parallel structures that provide high performance due to the structural parallelization of operations. The paper presents methods for teaching FNN to decoder matrices. Training is performed in a finite number of steps and does not require iterative procedures. Examples of constructing implementing FNN for the MNIST dataset are given. The results of generating images similar to the MNIST set are shown. A comparison with the classical variational autoencoder has been performed. The field of expedient use of generative models of PPCA is defined.

**Keywords:** generative model, variational autoencoder, probabilistic principal component method, fast neural network, pyramid structure

## References

1. Doersch C. Tutorial on variational autoencoders, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1606.05908.
2. Kingma D.P., Welling M. Auto-encoding variational bayes, 2022, DOI:10.48550/arXiv.1312.6114.
3. Tipping M.E., Bishop Ch.M. Probabilistic principal component analysis. Journal of the Royal statistical society series B: Statistical methodology, 1999, vol. 61, part 3, pp. 611-622, DOI:10.1111/1467-9868.00196
4. Dorogov A.Yu. Samopodobnyye neyronnyye seti bystrogo obucheniya [Self-similar neural networks of fast learning]. SPb.: Izd-vo SPbGETU "LETI" [St. Petersburg: Publishing house of ETU "LETI"], 2024, 188 p. available at: dorogov.su.
5. Tipping M.E., Bishop C.M. Mixtures of probabilistic principal component analyzers. Neural Computation, no. 11(2), pp. 443-482, available at: http://www.miketipping.com/papers.htm.
6. Christopher M. Bishop. Variational Principal Components. In Proceedings Ninth International Conference on Artificial Neural Networks, ICANN'99, IEE, volume 1, pages 509–514.
7. Bishop K.M. Raspoznavaniye obrazov i mashinnoye obucheniye.: Per. s angl. [Pattern recognition and machine learning: Trans. from English]. SPb.: OOO "Dialektika" [St. Petersburg: OOO Dialectika], 2020, 960 p., ISBN 978-5-907144-55-2.
8. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye neyronnye seti glubokogo obucheniya Chast' 3. Piramidal'nye neyronnye seti s glubokoy stepen'yu obucheniya [Fast transformations and self-similar deep learning neural networks Part 3. Pyramid neural networks with a deep learning degree]. Informacionnye i matematiceskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 3(35), pp. 33-43, DOI: 10.25729/ESI.2024.34.2.002.
9. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye neyronnye seti glubokogo obucheniya. Chast' 1. Stratifitsirovannye modeli samopodobnykh neyronnykh setey i bystrykh preobrazovaniy [Fast transformations and self-similar deep learning neural networks. Part 1. Stratified models of self-similar neural networks and fast transformations Informacionnye i matematiceskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp. 5-20, DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.001.
10. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye neyronnye seti glubokogo obucheniya. Chast' 2. Metody obucheniya bystrykh neyronnykh setey [Fast transformations and self-similar neural networks of deep learning. Part 2. Methods of training fast neural networks]. Informacionnye i matematiceskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 1(33), pp. 5-19, DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001.
11. Dorogov A.Yu. Plastichnost' samopodobnyh nejronnyh setej [Plasticity of self-similar neural networks]. Informacionnye i matematiceskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no 3(35), pp. 33-43. DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.003.
12. THE MNIST DATABASE of handwritten digits. Available at: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/.

13. MATLAB 2021b documentation. Available at: https://docs.exponenta.ru/deeplearning/ug/train-a-variational-autoencoder-vae-to-generate-images.html?searchHighlight=VAE.

***Dorogov Alexander Yurievich.*** *Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of automation and control Processes of St. Petersburg state electrotechnical university (SPbETU) "LETI", Chief researcher of PJSC "Information telecommunication technologies". The main directions of the author's research are related to data mining, digital signal processing, the design of fast transformations and neural networks of fast learning, the development of analytical platforms, modeling of radio and telecommunications systems. AuthorID: 17611, SPIN: 8645-5873, ORCID: 0000-0002-7596-6761, vaksa2006@yandex.ru, St. Petersburg, st. Popova, 5.*

*Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 02.08.2025.*

*The article was submitted 04/28/2025; approved after reviewing 06/02/2025; accepted for publication 08/02/2025.*

УДК 004.8
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.002

# Нейро-нечеткая система классификации состояний объектов сложной структуры

**Ломакина Любовь Сергеевна, Чернобаев Игорь Дмитриевич, Беляева Любовь Андреевна**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Россия, Нижний Новгород, *ichernobnn@gmail.com*

**Аннотация.** В работе рассматривается задача машинного обучения по классификации состояний объектов со сложной структурой. Под состоянием объекта понимается некоторая категория, характеризующая свойства объекта в момент времени, и при этом описываемая набором признаков. Сложность структуры объекта выражается в присутствии в признаковом описании характеристик, которые требуют предварительной специализированной обработки и обладают отношениями иерархии или характеризуются наличием последовательностей неструктурированных элементов. Данные для классификации могут содержать неточности, погрешности и ошибки. Инструмент нейросетевого моделирования часто применяется при решении задач классификации. Для решения задачи классификации в условиях нечеткости применяются нечеткие логические системы. Оба инструмента обладают свойствами универсального аппроксиматора, однако результаты нейросетевых моделей трудно интерпретировать, а для построения нечеткой логической системы требуется участие эксперта при описании нечетких правил. В работе рассматривается подход к объединению инструментов нечетких логических систем и инструментов нейросетевого моделирования, выраженный в построении модели нечеткой функии активации нейрона. Модель нечеткой функции описывается с применением аппарата теории нечетких множеств и функций принадлежности, объединенных правилами активации в НЛС. Информационный сигнал на входе нечеткой функции проходит несколько этапов преобразований, включающих преобразование сигнала «домен» нечетких множеств, совокупную обработку нечетких множеств в соответствии с заданными в системе правилами, алгоритмами отображения обработанного информационного сигнала обратно в домен четких чисел. Рассматриваемый подход позволяет формировать нечеткую функцию активации набором параметров, изменяемых в процессе обучения нейросетевой модели. В работе показано, что рассматриваемая модель нечеткой функции имеет ограниченную область определения. Для обеспечения выполнимости требований к информационному сигналу в модели нечеткой функции предложена улучшенная нормализация входа нечеткой функции активации. Нейро-нечеткие системы классификации проанализированы в задачах классификации технических объектов, медико-биологических объектов, текстовых объектов. Сравнительная оценка точности решений нейро-нечетких систем классификации относительно аналогичных система на основе ИНС показала повышение от 2 до 9 % в ряде экспериментов.

**Ключевые слова:** классификация состояний объектов, нечеткая логическая система, нейронная сеть, нейро-нечеткая классификация

**Цитирование:** Ломакина Л.С. Нейро-нечеткая система классификации состояний объектов сложной структуры / Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, Л.А. Беляева // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С.17-25. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.002.

**Введение.** Машинное обучение – раздел искусственного интеллекта, в котором исследуются и разрабатываются модели и алгоритмы для автоматизированной и, прежде всего, интеллектуальной обработки данных, выявления скрытых закономерностей, и принятия решения в соответствии с поставленной задачей. В машинном обучении выделяют такие фундаментальные типы задач, как регрессия, кластеризация, классификация. Регрессия решает задачу прогнозирования значения целевой функции на основе уже известных значений. При решении задачи кластеризации из исходного множества объектов выделяются новые подмножества, при этом такие подмножества формируются на основании близости характеристик признакового описания объектов одного подмножества. В задаче классификации определяется принадлежность объекта к заданной категории в результате обработки его признакового описания. Приведенные базовые типы задач машинного обучения

являются основой, на которой формулируют такие задачи, как: распознавание образов, идентификация, генерация данных, отслеживание объектов в реальном времени, обработка потоковых данных и другие. Так, существует перечень задач, в которых анализируется состояние объектов сложной структуры. В подобных задачах состояние объекта рассматривается как категория, характеризующая его работоспособность, режим работы или степень износа. При этом, рассматриваемые объекты, как правило, являются системами – техническими, медико-биологическими, программными, и обладают сложной структурой. Сложность структуры объекта выражается через его признаковые описания: наличие последовательностей, отношения иерархии, присутствие полуструктурированных элементов. К таким объектам относят текстовые данные, компьютерные изображения, потоковые данные, данные технических систем и др., при этом такие объекты требуют предварительной обработки. Также, в машинном обучении выделяют категорию задач, решающих вопросы обработки данных с учетом погрешностей, неточностей ошибок. В этой связи в задачах классификации и кластеризации границы между категориями «размываются» и вместо однозначного ответа на вопрос о принадлежности объекта к категории рассматривается уже вопрос о степени принадлежности. На практике источниками таких данных могут быть измерительные приборы, у которых подходит к концу срок сертификации – значения измерений таких приборов могут быть с погрешностями. Другим источником может быть человеческий фактор или неполнота сведений. В качестве примеров можно выделить задачи технической и медицинской диагностики.

**Проблемы применения ИНС.** Инструмент нейросетевого моделирования часто применяется для решения задач машинного обучения благодаря универсальности искусственных нейронных сетей (ИНС) и способности обобщать новые данные, отсутствующие в обучающем наборе данных. ИНС обладают свойствами универсального аппроксиматора [1] и обеспечивают высокую точность решений в прикладных задачах, а структура любой нейросетевой модели позволяет ускорить процесс обучения и принятия решений за счет организации распределенной обработки данных. Однако, решения ИНС сложно интерпретировать [2]. Без понимания процесса принятия решения нейросетевой моделью по-прежнему остается невозможным их применение в прикладных областях, где критически важна точность и надежность используемых моделей. Ввиду того, что для работы нейросетевых моделей необходимо их предварительное обучение на обучающей выборке, точность решений и обобщающая способность напрямую зависят от качества обучающей выборки, следовательно, неточные и неполные данные и погрешности в данных снижают точность решения задачи методом нейросетевого моделирования.

**Нечеткие множества второго типа.** Для работы с подобными данными применяют теорию нечетких множеств (НМ), разработанную Л. Заде [3] и предлагающую методы описания и обработки неопределенности в данных с использованием специальных функций, определяющих меру принадлежности объекта к множествам с «размытыми» границами [4].

На рисунке 1 «размытость» классов «Горячо» и «Холодно» выражена в постепенном переходе между двумя нечеткими множествами «Горячо» и «Холодно».

Сегодня интерес представляют нечеткие множества второго типа (Т2-НМ) [5], которые расширяют НМ первого типа через замещение фиксированной функции принадлежности на нечеткую таким образом, что степень принадлежности каждого элемента Т2-НМ представляет собой НМ первого типа в диапазоне [0,1]. Характеристические функции Т2-НМ имеют трехмерную структуру, а ключевой особенностью этих множеств является «след неопределенности», формируемый двумя функциями принадлежности сверху и снизу, и представленный на рисунке 2. Т2-НМ можно рассматривать как совокупность Т1-НМ [6].

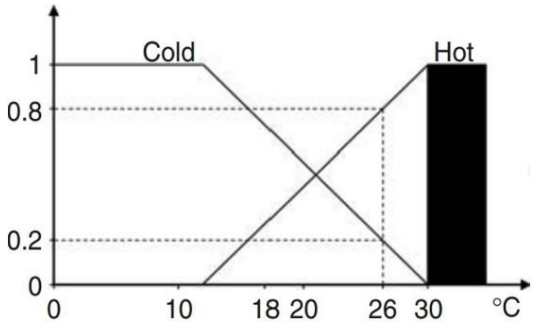



**Рис. 1.** Функции принадлежности нечетких множеств: «Горячо» и «Холодно»

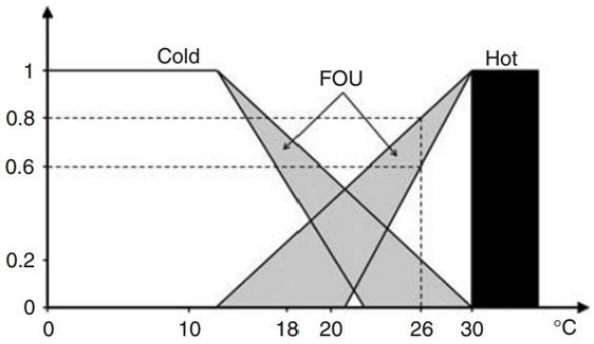



**Рис. 2.** След неопределенности нечетких множеств 2-го типа: «Горячо» и «Холодно»

**Применение НМ и НЛС.** НМ применяются в составе нечеткой логической системы (НЛС). Известно, что НЛС способна аппроксимировать любую непрерывную функцию в заданной области [7]. Принцип работы НЛС построен на совокупной обработке НМ в соответствии с заданными правилами. Решения НЛС – интерпретируемые, но построение подобных систем требует применения экспертных знаний прикладной области при составлении базы правил.

В структуре НЛС (рис. 3) присутствуют следующие этапы преобразования ввода функции:

1. Сигнал, передаваемый на вход системы на этапе фаззификации, преобразуется в Т2-НМ и передается на обработку в базу нечетких правил. База правил НЛС имеет структуру:

$R_{ix}$: ЕСЛИ ВВОД $x$ ПРИНАДЛЕЖИТ $A_{ix}$, ТО СЛЕДСТВИЕ $f$ ПРИНАДЛЕЖИТ $B_{ix}$, где – $ix$ – индекс нечеткого правила, $x$ – ввод НЛС, $A_{ix}$ – нечеткие множества, $B_{ix}$ – вывод НЛС

2. В базе определяются правила, соответствующие вводу. Следствия активированных правил образуют вывод НЛС – аггрегированное нечеткое множество.

3. Полученное НМ преобразуется в «четкий» вывод на этапе дефаззификации, который включает алгоритм сокращения типа для перевода Т2-НМ в Т1-НМ и алгоритм отображения Т1-НМ в вывод НЛС.

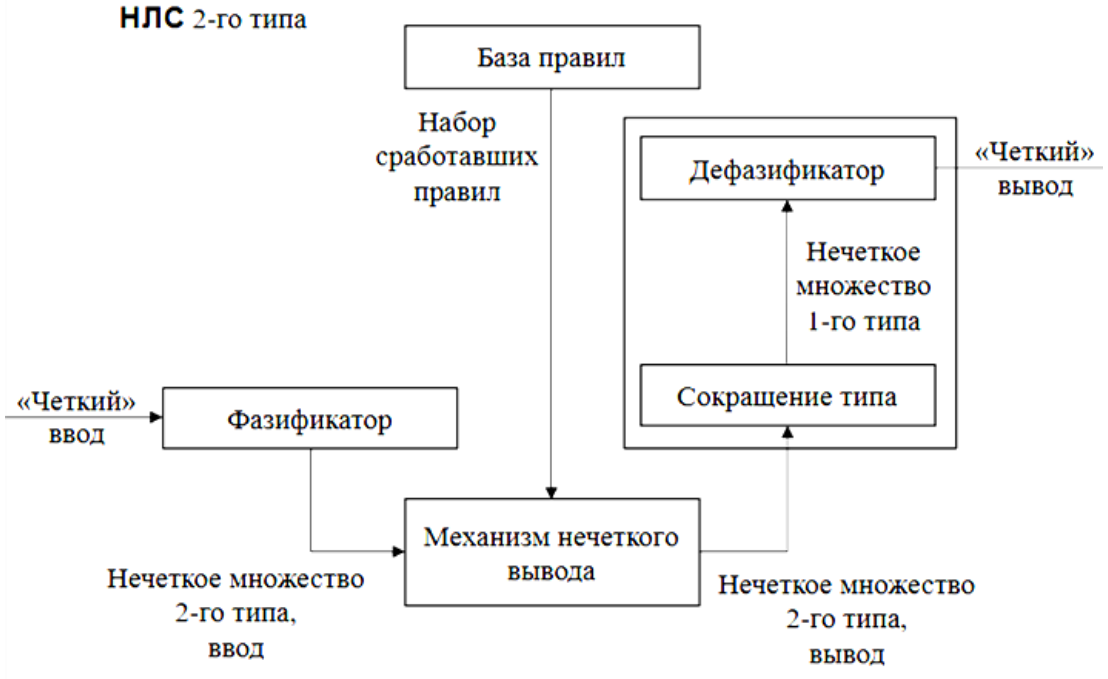



**Рис. 3.** Структура НЛС второго типа

В работе рассматривается НЛС, включающая Т2-НМ и базу нечетких правил, представленных на рисунках 4 и 5:

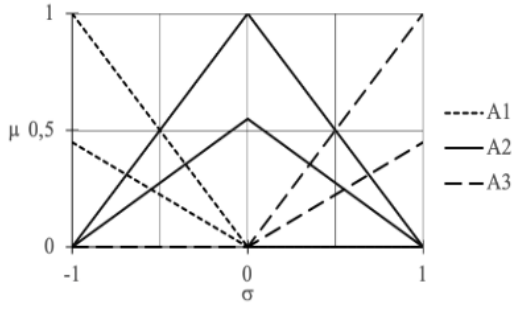



**Рис. 4.** Графическое представление Т2-НМ рассматриваемой базы правил

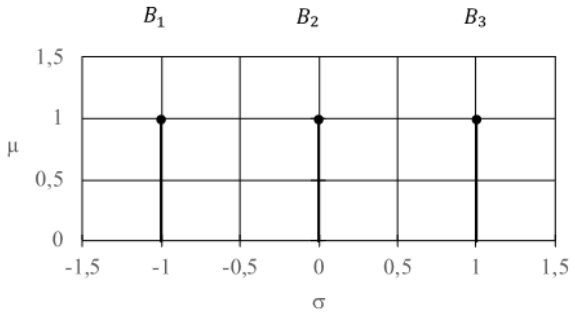



**Рис. 5.** Графическое представление следствий рассматриваемой базы правил

Известно, что симметричные НМ обеспечивают устойчивость НЛС [8], в связи с этим в рассматриваемой НЛС применяются симметричные треугольные функции принадлежности (ФП) – верхние $\bar{\mu}_{\widetilde{A}_i}$ и нижние $\underline{\mu}_{\widetilde{A}_i}$:

$$\bar{\mu}_{\widetilde{A}_i} = \begin{cases} \frac{\sigma - c_{i+1}}{c_i - c_{i+1}}, \sigma \in [c_i, c_{i+1}) \\ \frac{c_{i-1} - \sigma}{c_{i-1} - c_i}, \sigma \in [c_{i-1}, c_i) \end{cases} \quad (1)$$

$$\underline{\mu}_{\widetilde{A}_i} = h_i * \bar{\mu}_{\widetilde{A}_i} \quad (2)$$

где $c_1 = -1$, $c_2 = 0$, $c_3 = 1$, $h_1 = h_3 = 1 - a$, $h_2 = a$, $a \in (0,1)$. Из выражения нижней функции принадлежности следует, что параметры $h_i$ рассматриваемой НЛС определяют форму следа неопределенности. Как показано на рисунке 4, ФП заданы в диапазоне $\sigma$ $[-1,1]$. Формирование нижних ФП выполняется путем изменения параметра $h$, выраженным через параметр $a$. Значения $a \in \{0,1\}$, приводят к вырождению Т2-НМ в Т1-НМ. Данный метод прототипирования НЛС, представлен в [9], отличается простотой и наглядностью структуры системы нечеткой логики.

**Модель нечеткой функции активации.** В работе для построения системы классификации состояний объектов сложной структуры с учетом нечеткости в данных рассматривается объединение [10] НЛС и ИНС. Модель нечеткой функции активации (НФА) нейрона описывается через НЛС с применением Т2-НМ и ФП, объединенных правилами активации. Такой подход позволяет использовать различные типы НМ и алгоритмы дефаззификации [11]. В результате выполнения этапа сокращения типа НМ и дефаззификации, модель НФА можно формализовать в виде:

$$F(x) = \begin{cases} Pxk(x), \ x \in (0;1] \\ Nxk(-x), \ x \in [-1;0] \end{cases} \quad (3)$$

где $k(x) = 0.5(\frac{1}{a+x-ax} + \frac{1-a}{1-ax})$, параметры $P, N, a$ обновляются в соответствии с правилом обучения ИНС.

Параметры НФА предоставляют возможность гибкой настройки функции нелинейного отображения входных данных и позволяют получать функции, близкие к базовым функциям активации ИНС, таким, как $ReLU(x) = max(0,x)$, $sigmoid(x) = \frac{1}{e^{-x}+1}$ и др.

Полученная функция представлена на рисунке 6, и может применяться при построении ИНС в качестве НФА, при этом вместо весовых коэффициентов модели нейрона применяются только параметры НФА.

На рисунке 6 показано, что величина и направление изгиба кривой в положительной и отрицательной областях зависят от знака и значения параметра $a$. При значениях параметра $a$,

близких к 0.5, рассматриваемая функция вырождается в кусочно-заданную линейную функцию.

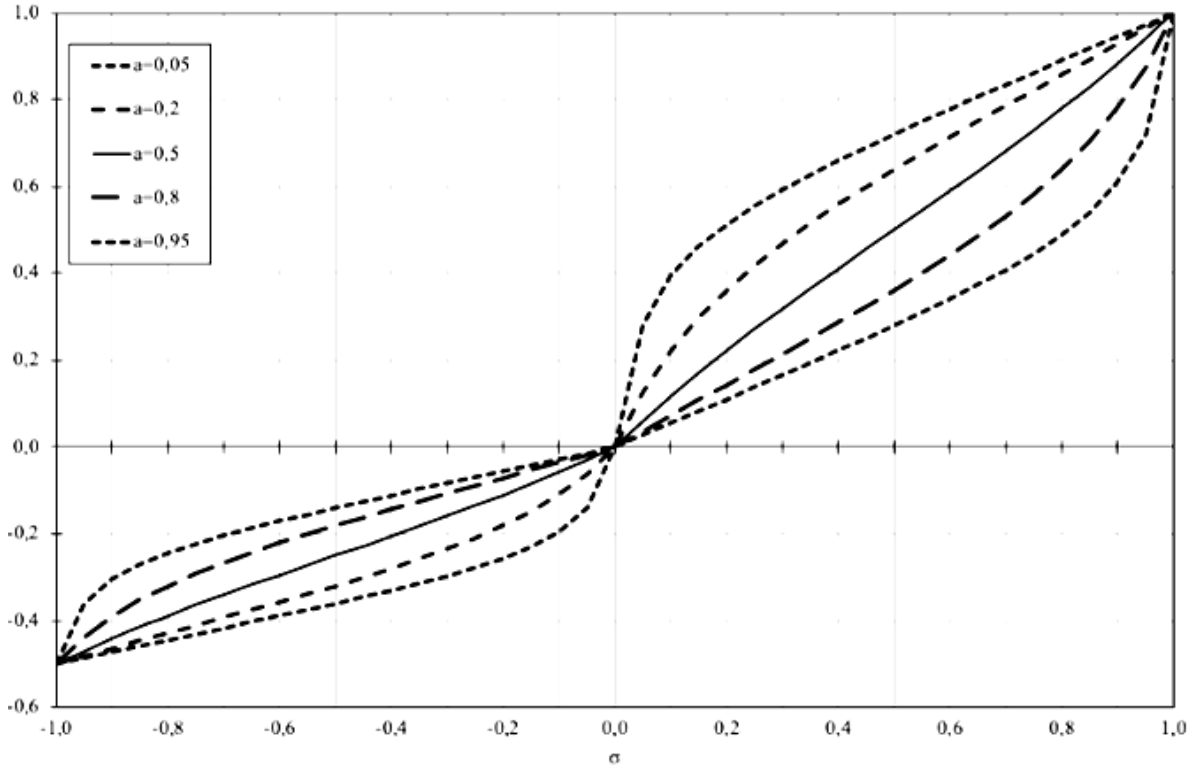



**Рис. 6.** График нечеткой функции активации с параметрами N = 1.0, P = 1.0 и различными вариантами параметра α

В процессе обучения ИНС с НФА значения параметра $a \in (0; 1)$ могут выйти за границы допустимого диапазона, обусловленного выражением (2). При значениях $a$ = 0 или a = 1 T2-НМ вырождаются в T1-НМ, это приводит к сокращению типа НЛС, и НФА становится недифференцируемой [10]. В результате теряется одно из ключевых преимуществ модели, а именно, сокращается количество T1-НМ, входящих в состав T2-НМ, улучшенная обработка неопределенности в данных.

Для предотвращения этой проблемы предлагается расширение НФА дополнительным этапом нормализации [11], который ограничит значения параметра α в пределах (0,1) и обеспечит стабильность обучения и сохранение преимуществ нечетких множеств второго типа в архитектуре нейронной сети. В работе рассматривается нормализация с применением функции гиперболического тангенса: $tanh(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}$ , однако допустимо любое преобразование ввода, при условии, что будут соблюдаться ограничения области определения НФА. Структура НФА с добавленным шагом нормализации входа приведена на рисунке 7:

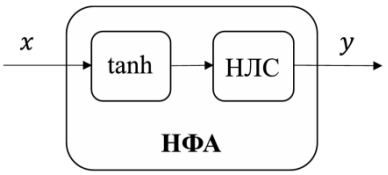



**Рис. 7.** НФА с нормализацией входа

**Нейро-нечеткая система классификации.** Системы классификации, построенные на объединении ИНС и НФА, являются альтернативой системам классификации на базе обыкновенных нейросетевых моделей. При построении нейро-нечетких систем классификации в структуре ИНС применяются слои нейронов с НФА [12]. Например, для построения многослойной нейро-нечеткой сети (МННС) прямого распространения на базе

многослойной ИНС прямого распространения (МЛС) требуется применить слой нейронов с НФА. На рисунке 8 приведена структура сверточной нейро-нечеткой сети (СННС), на рисунке 9 изображена структура рекуррентной нейро-нечеткой сети (РННС) с НФА внутри блока «НHРС», иллюстрирующего слой рекуррентных нейронов.

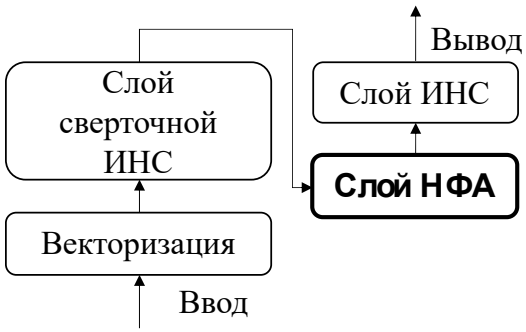



**Рис. 8.** Структура сверточной нейро-нечеткой сети

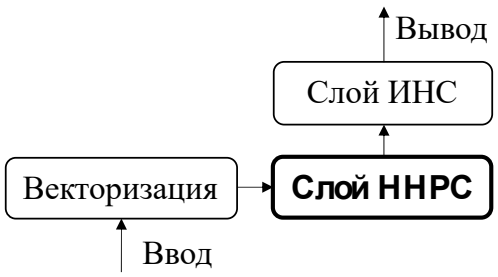



**Рис. 9.** Структура рекуррентной нейро-нечеткой сети

В слоях с НФА в процессе обучения оптимизируются параметры НФА, следовательно, при обучении нейро-нечеткой сети изменяется нелинейное отображение, определяемое параметрами НФА. Основное отличие от обыкновенных ИНС в том, что у нейрона с НФА отсутствуют весовые коэффициенты [13], вместо них применяются параметры НФА.

**Нейро-нечеткая классификация в прикладных задачах.** Оценка нейро-нечетких систем классификации проведена в экспериментах с объектами сложной структуры и разной физической природы: медико-биологическими данными, текстовыми данными, компьютерными изображениями. В эксперименте с медико-биологическими объектами решалась задача классификации семейств белков набора данных «Protein Families annotations and multiple sequence alignments using Hidden Markov Models» (PFAM) [14]. Результаты приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Точность классификации медико-биологических объектов

| Точность | | |
|---|---|---|
| Классификатор | Обучение | Проверка |
| СНС | 68.45 | 69.53 |
| **СННС** | **77.19** | **75.41** |
| РНС | 78.56 | 76.15 |
| **РННС** | **86.41** | **84.10** |

Оценивание качества работы с текстовыми данными проведено в контексте задачи классификации пользовательских рецензий на фильмы онлайн-базы «Internet Movie Database» (IMDB) [15]. Результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Точность классификации текстовых объектов

| Точность | | |
|---|---|---|
| Классификатор | Обучение | Проверка |
| СНС | 74.56 | 70.29 |
| **СННС** | **83.57** | **76.48** |
| РНС | 78.32 | 74.53 |
| **РННС** | **83.31** | **79.40** |

При работе с компьютерными изображениями использовались данные набора Fashion-MNIST [16]. Результаты приведены в таблице 3.

**Таблица 3.** Точность классификации компьютерных изображений

| Точность | | |
|---|---|---|
| Классификатор | Обучение | Проверка |
| СНС | 81.66 | 79.98 |
| **СННС** | **90.27** | **88.68** |
| МЛС | 84.03 | 82.40 |
| **МННС** | **85.77** | **83.96** |

В проведенных экспериментах построенные нейро-нечеткие системы классификации, в сравнении с аналогичными системами на основе ИНС, показывают лучшие показатели точности.

**Заключение.** В работе рассмотрена задача классификации состояний объектов сложной структуры инструментом нейросетевого моделирования, и обработка нечеткости в данных инструментом нечетких множеств. Отмечены проблемы применения ИНС и НЛС в задачах классификации.

В работе предложен новый подход к объединению инструментов нечетких множеств и нейросетевого моделирования через расширение функций активации нечеткими логическими системами. На примере НЛС с Т2-НМ рассмотрена модель нечеткой функции активации. Параметры *P, N, a* определяют свойства нелинейного отображения НФА, при этом ограничения области значений параметров обусловлены применяемыми функциями принадлежности и методом формирования следа неопределенности. При выходе значений параметров за допустимые пределы используемые Т2-НМ вырождаются в Т1-НМ, а нечеткая функция перестает быть дифференцируемой.

Нечеткая функция может применяться в математической модели искусственного нейрона в качестве нечеткой функции активации. Весовые коэффициенты в модели нейрона с НФА заменены параметрами НФА. Для обеспечения корректной работы нейро-нечеткой сети предлагается дополнительный этап нормализации ввода НФА в диапазон допустимых значений.

Рассмотрены особенности построения и нейро-нечетких систем классификации и их применение для работы с объектами сложной структуры разной природы: медико-биологическими, текстовыми объектами и объектами компьютерных изображений.

Экспериментальная оценка точности, полученная в прикладных задачах классификации, приведенных выше, при применении нейро-нечетких систем классификации: на тестовом наборе данных для медико-биологических объектов – улучшение 5.9-8%, для текстовых объектов – 4-6%, в задаче классификации изображений – улучшение 1.6-9%.

Рассмотренный подход расширяет область применения нейросетевого моделирования и допускает применение к задачам в условиях неполных, неточных, нечетких данных.

## Список источников

1. Lu Y, Lu J. A universal approximation theorem of deep neural networks for expressing probability distributions. Advances in neural information processing systems, 2020, DOI:10.48550/arXiv.2004.08867.
2. Zhang Y, Tiňo P, Leonardis A., et al. A survey on neural network interpretability. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. 2021, vol. 5, iss. 5, pp. 726-742, DOI:10.1109/TETCI.2021.3100641.
3. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and control, 1965, vol. 8 (3), pp. 338-353, DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
4. Заде Л.А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе / Л.А. Заде // Классификация и кластер. – М.: Мир, 1980. – с. 208-247.
5. Liang Q., Mendel J.M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. IEEE Transactions on fuzzy systems, 2000, vol. 8, no. 5, pp. 535-550, DOI:10.1109/91.873577.
6. Mendel J., Hagras H., Tan W.W. et al. Introduction to type-2 fuzzy logic control: theory and applications. John Wiley & Sons,2014, 357 p., DOI:10.1002/9781118886540.

7. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators. IEEE transactions on computers, 1994, vol. 43, iss. 11, pp. 1329-1333, DOI:10.1109/12.324566.
8. Kumbasar T. Robust stability analysis and systematic design of single input interval Type-2 fuzzy logic controllers, IEEE Transactions on fuzzy systems, 2015, vol. 24, iss. 3, pp. 675-694, DOI:10.1109/TFUZZ.2015.2471805.
9. Kumbasar T. A simple design method for interval type-2 fuzzy PID controllers. Soft Computing, 2014, vol. 18(7), pp. 1293-1304, DOI:10.1007/s00500-013-1144-1.
10. Ломакина Л.С. Нейро-нечеткие классификаторы / Л.С. Ломакина, С.А. Манцеров, И.Д. Чернобаев // Теория и практика: Монография. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2022. – 137 с.
11. Naaz S, Alam A, Biswas R. Effect of different defuzzification methods in a fuzzy based load balancing application. International journal of computer science issues (IJCSI), 2011, vol. 8(5).
12. Ломакина Л.С. Нейро-нечеткие классификаторы / Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2021. – № 9(4). – DOI:10.26102/2310-6018/2021.35.4.027.
13. Ломакина Л.С. Algorithmic support of neuro-fuzzy classification of objects of complex structure / Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, И.Н. Киселев // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2021» («ИС & ИТ-2021», «IS&IT'21»). – Дивноморское, 2021. – № 6 – С. 475-481.
14. Sonnhammer E.L., Eddy S.R., Durbin R. Pfam: a comprehensive database of protein domain families based on seed alignments. Proteins. – New York, NY: Wiley-Lissn 1997, no. 28(3), pp. 405-420, DOI:10.1002/(sici)1097-0134(199707)28:3<405::aid-prot10>3.0.co;2-l.
15. Maas A.L., Daly R.E., Pham P.T., et al. Learning word vectors for sentiment analysis. In Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: human language technologies, Portland, Oregon, USA, 2011, pp. 142-150,
16. Xhaferra E, Cina E, Toti L. Classification of standard FASHION MNIST dataset using deep learning based CNN algorithms. 2022 international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT), 2022, pp. 494-498, DOI: 10.1109/ISMSIT56059.2022.9932737.

***Ломакина Любовь Сергеевна.*** *Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Elibrary AuthorID: 8366, ORCID: 0000-0002-5598-6079 llomakina@list.ru*

***Чернобаев Игорь Дмитриевич.*** *Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Elibrary AuthorID: 1305749 SPIN: 6772-2940 ORCID: 0000-0001-6809-6473, ichernobnn@gmail.com*

***Беляева Любовь Андреевна.*** *Магистрант кафедры «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р. Е. Алексеева. b3liaeva.lub@yandex.ru*

---

UDC 004.8
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.002

# Neuro-fuzzy classification system for states of objects of complex structure

**Liubov S. Lomakina, Igor D. Chernobaev, Liubov A. Beliaeva**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev,
Russia, Nizhny Novgorod, *ichernobnn@gmail.com*

**Abstract.** The paper considers the machine learning task of classifying the states of objects with a complex structure. The state of an object is understood as a certain category that characterizes the properties of an object at a given time, and at the same time is described by a set of features. The complexity of the object structure is expressed by the features that require preliminary processing and have hierarchical or sequential relationships, or unstructured elements. The data to process may contain inaccuracies, and errors. The neural networks as a tool are often applied to the classification tasks. Fuzzy logic systems are applicable to the classification tasks within the context of data fuzziness. Both tools have the properties of a universal approximator, however the neural network results are hard to interpret, at the same time the application of a fuzzy logical system requires the preliminary construction of a fuzzy rules. The paper considers an approach to combine fuzzy logic system and neural network with the fuzzy neuron activation function. The model of the fuzzy function is described by the fuzzy sets, membership functions and fuzzy activation rules. The input of a fuzzy function goes through the transformations stages, including fuzzification, fuzzy inference using the fuzzy logic system's rules and defuzzification. The approach makes it possible to form a fuzzy activation function with a set of changeable parameters during the neural network model training. An improved normalization of the input of the fuzzy activation function is proposed in order to ensure the feasibility of the information signal requirements in the fuzzy function. Neuro-fuzzy

classification systems are analyzed in the tasks classification of objects of various nature: technical objects, biomedical objects textual objects. A comparative assessment of the accuracy of solutions of neuro-fuzzy classification systems relative to similar ANN-based systems showed an increase from 2 to 9% in a number of experiments.

**Keywords:** classification of objects states, fuzzy logic system, neural networks, neuro-fuzzy classification

## References

1. Lu Y, Lu J. A universal approximation theorem of deep neural networks for expressing probability distributions. Advances in neural information processing systems, 2020, DOI:10.48550/arXiv.2004.08867.
2. Zhang Y, Tiňo P, Leonardis A., et al. A survey on neural network interpretability. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. 2021, vol. 5, iss. 5, pp. 726-742, DOI:10.1109/TETCI.2021.3100641.
3. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and control, 1965, vol. 8 (3), pp. 338-353, DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Zade L.A. Razmytyye mnozhestva i ikh primeneniye v raspoznavanii obrazov i klaster-analize [Fuzzy extensions and their application in pattern recognition and cluster analysis]. Klassifikatsiya i klister, M.: Mir [Classification and cluster, M.: Mir], 1980, pp. 208-247.
5. Liang Q., Mendel J.M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. IEEE Transactions on fuzzy systems, 2000, vol. 8, no. 5, pp. 535-550, DOI:10.1109/91.873577.
6. Mendel J., Hagras H., Tan W.W. et al. Introduction to type-2 fuzzy logic control: theory and applications. John Wiley & Sons,2014, 357 p., DOI:10.1002/9781118886540.
7. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators. IEEE transactions on computers, 1994, vol. 43, iss. 11, pp. 1329-1333, DOI:10.1109/12.324566.
8. Kumbasar T. Robust stability analysis and systematic design of single input interval Type-2 fuzzy logic controllers, IEEE Transactions on fuzzy systems, 2015, vol. 24, iss. 3, pp. 675-694, DOI:10.1109/TFUZZ.2015.2471805.
9. Kumbasar T. A simple design method for interval type-2 fuzzy PID controllers. Soft Computing, 2014, vol. 18(7), pp. 1293-1304, DOI:10.1007/s00500-013-1144-1.
10. Lomakina L.S., Mantserov S.A., Chernobaev I.D. Neiro-nechetkie classificatory [Neuro-fuzzy classifiers]. Teoriya i praktika: Monografia, Voronezh, Nauchnaya Kniga [Theory and practice: Monograph. Voronezh: Publishing house “Scientific book”], 2022, 137 p.
11. Naaz S, Alam A, Biswas R. Effect of different defuzzification methods in a fuzzy based load balancing application. International journal of computer science issues (IJCSI), 2011, vol. 8(5).
12. Lomakina L.S., Chernobaev I.D. Neyro-nechetkiye klassifikatory [Neuro-fuzzy classifiers]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling, optimization and information technology], 2021, no. 9(4), DOI:10.26102/2310-6018/2021.35.4.027.
13. Lomakina L.S., Chernobaev I.D., Kiselev Y.N. Algorithmic support of neuro-fuzzy classification of objects of complex structure. Trudy Mezhdunarodnogo nauchnotekhnicheskogo kongressa “Intellektual'nyye sistemy i informatsionnyye tekhnologii – 2021” (“IS & IT-2021”, “IS&IT’21”) [Proceedings of the international scientific and technical congress “Intelligent systems and information technology – 2021” (“IS&IT’21”)], 2021, no. 6, pp. 475-481.
14. Sonnhammer E.L., Eddy S.R., Durbin R. Pfam: a comprehensive database of protein domain families based on seed alignments. Proteins. – New York, NY: Wiley-Lissn 1997, no. 28(3), pp. 405-420, DOI:10.1002/(sici)1097-0134(199707)28:3<405::aid-prot10>3.0.co;2-l.
15. Maas A.L., Daly R.E., Pham P.T., et al. Learning word vectors for sentiment analysis. In Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: human language technologies, Portland, Oregon, USA, 2011, pp. 142-150,
16. Xhaferra E, Cina E, Toti L. Classification of standard FASHION MNIST dataset using deep learning based CNN algorithms. 2022 international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT), 2022, pp. 494-498, DOI: 10.1109/ISMSIT56059.2022.9932737.

***Lomakina Liubov Sergeevna.*** *Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Computing Systems and Technologies at the NNSTU n.a. R. E. Alekseev. Elibrary AuthorID: 8366, ORCID: 0000-0002-5598-6079, llomakina@list.ru.*

***Chernobaev Igor Dmitrievich.*** *Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Computing Systems and Technologies at the NNSTU n.a. R. E. Alekseev. Elibrary AuthorID: 1305749, SPIN: 6772-2940 ORCID: 0000-0001-6809-6473, ichernobnn@gmail.com.*

***Beliaeva Liubov Andreevna.*** *Master's degree in the Department of Computing Systems and Technologies at the NNSTU n.a. R. E. Alekseev. b3liaeva.lub@yandex.ru.*

*Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 22.05.2025; принята к публикации 02.08.2025.*

*The article was submitted 04/16/2025; approved after reviewing 05/22/2025; accepted for publication 08/02/2025.*

УДК 004.032.26
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.003

# Разработка архитектуры нейронной сети для восстановления радиосигнала с БПЛА

**Фелагерева Евгения Юрьевна[1], Рудоман Нэлли Радиковна[1], Кузякина Марина Викторовна[1,2]**

[1]Кубанский государственный университет,
Россия, Краснодар, *efelagereva@gmail.com*
[2]Кубанский государственный технологический университет,
Россия, Краснодар

**Аннотация.** В представленном исследовании рассматривается проблема применения классических методов восстановления радиосигнала. В качестве решения предлагается использование нейронных сетей, а именно автокодировщиков. Разработана архитектура вариационного автоэнкодера для решения задачи восстановления радиосигнала с беспилотного летательного аппарата. Для обучения и проверки модели был использован большой датасет, содержащий радиосигналы различных видов модуляций и уровней шума, DeepSig Dataset: RadioML 2018.01A. Целью исследования является разработка архитектуры, показывающей наиболее лучшие метрики восстановления радиосигналов, чем классические методы. В качестве метрик качества используются PSNR, MSE и MAE, а оптимизатор Adam. Также к датасету был применен фильтр Калмана, показавший результат на два порядка хуже по всем метрикам качества. Полученные данные показывают, что не всегда классические алгоритмы восстановления искаженных радиосигналов могут показывать достойное качество работы.

**Ключевые слова:** вариационный автоэнкодер, радиосигнал, БПЛА, фильтр Калмана

**Цитирование:** Фелагерева Е.Ю. Разработка архитектуры нейронной сети для восстановления радиосигнала с БПЛА / Е.Ю. Фелагерева, Н.Р. Рудоман, М.В. Кузякина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 26-38. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.003.

**Введение.** Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются в самых различных сферах, включая связь, мониторинг окружающей среды, разведку и навигацию. Важными аспектами их функционирования являются передача и обработка радиосигналов, обеспечивающих стабильную работу систем управления и передачи данных. Однако радиосигналы, передаваемые с БПЛА, подвержены различным искажениям, таким, как шумы, помехи и потери при распространении, что затрудняет их точное восстановление на приемной стороне.

В традиционной радиотехнике для восстановления и очистки сигналов применяются классические методы обработки, включая преобразование Фурье, вейвлет-преобразование и фильтрацию. Несмотря на их эффективность в определенных сценариях, данные методы имеют ограничения при работе с сильно зашумленными и нелинейно искаженными сигналами. В связи с этим возникает потребность в разработке более адаптивных и мощных подходов, способных восстанавливать радиосигналы с высокой точностью.

Одним из перспективных направлений является применение методов глубокого обучения, в частности вариационных автоэнкодеров (VAE), которые способны обучаться на данных и находить оптимальные способы восстановления сигналов. Нейросетевые методы превосходят классические алгоритмы за счет способности анализировать сложные нелинейные зависимости, выявлять скрытые закономерности в данных и адаптироваться к разнообразным искажениям. Вариационные автоэнкодеры, в отличие от обычных автоэнкодеров, обладают вероятностной природой и позволяют моделировать неопределенность сигнала, что особенно важно при наличии шумов. Они обеспечивают более устойчивую и точную реконструкцию, так как их латентное пространство организуется таким образом, чтобы эффективно представлять значимые особенности входных данных.

Использование VAE позволяет не только восстанавливать исходный сигнал с высокой точностью, но и улучшать его устойчивость к шумам и потерям информации.

В статье исследуется возможность применения нейросетевых методов для восстановления радиосигналов с БПЛА. В рамках работы построена модель вариационного автоэнкодера (VAE), предназначенная для восстановления зашумленных сигналов, и проведено сравнение ее эффективности с традиционными методами, в частности с фильтром Калмана. Анализируется, насколько VAE способен улучшить точность реконструкции по сравнению с фильтром Калмана, учитывая различные уровни шума и искажений. Для этого проводятся эксперименты на открытом датасете радиосигналов, оценивается качество восстановления по метрикам, таким, как пиковое отношение сигнал-шум (PSNR), среднеквадратичная ошибка (MSE) и средняя абсолютная ошибка (MAE). В результате работы выявляются преимущества и ограничения предложенного подхода, а также определяются сценарии, в которых использование VAE оказывается более эффективным для восстановления радиосигналов в реальных условиях эксплуатации БПЛА.

**1. Проблема классических методов восстановления радиосигнала.** На практике сигналы чаще всего представлены в цифровом виде, то есть в виде последовательности отсчётов. Дискретное преобразование Фурье [1] предназначено для работы с такими оцифрованными сигналами. DFT позволяет выполнить переход от временного представления к частотному для дискретного сигнала x[n] с N отсчётами. В итоге получаем X[k] – индекс частного компонента, определяемого формулой:

$$\mathrm{X[k]} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2i\pi kn}{N}}. \quad (1)$$

DFT дает спектр сигнала в дискретной форме, позволяя анализировать цифровые сигналы и их частотное содержание [2]. Это преобразование используется во многих приложениях обработки сигналов, таких, как фильтрация, сжатие и анализ спектра. Однако из-за высокой вычислительной сложности прямое применение DFT для больших объёмов данных может быть ресурсоёмким [3].

Вейвлет-преобразование [4] – это метод анализа сигналов, который позволяет разложить сигнал на временные и частотные компоненты. В отличие от преобразования Фурье, которое представляет сигнал в виде суммы гармонических функций с фиксированными частотами, вейвлет-преобразование использует вейвлеты – ограниченные во времени функции, которые могут изменяться как по масштабу, так и по сдвигу [5]. Вейвлет-преобразование особенно полезно для анализа нестационарных сигналов, чьи частотные компоненты меняются во времени. Это делает его незаменимым для задач, где важны локальные изменения сигнала, например, при сжатии и восстановлении сигналов, обнаружении событий и анализе временных рядов.

В реальных приложениях, где сигналы обычно представлены в виде дискретных отсчетов [6], используется дискретное вейвлет-преобразование (DWT). Оно упрощает вычисления за счёт дискретизации масштабов и сдвигов. DWT для сигнала x[n] можно выразить через сумму разложений с использованием дискретных масштабов $a = 2^j$ и сдвигов $b = k * 2^j$:

$$W_{j,k} = \sum_n x[n]\psi_{j,k}[n], \quad (2)$$

где $\psi_{j,k}[n] = \frac{1}{\sqrt{2^j}}\psi(\frac{n-k2^j}{2^j})$.

Фильтр Калмана [7] используется для оптимальной оценки параметров сигнала в условиях шума. Основное уравнение обновления состояния записывается в виде:

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k(z_k - Hx_{k|k-1}), \quad (3)$$

где $K_k$ – матрица Калмана (матрица весовых коэффициентов); $z_k$– наблюдаемое значение на шаге k; H – матрица наблюдений.

Фильтр Калмана помогает улучшить прогноз состояния, минимизируя влияние шума [8].

В условиях эксплуатации БПЛА классические методы восстановления радиосигналов сталкиваются с рядом ограничений. Согласно исследованию, опубликованному в журнале «Sensors» [9], традиционные методы, такие, как радарные и акустические системы, испытывают трудности при обнаружении и классификации БПЛА из-за их малых размеров и низкой отражающей способности. Кроме того, оптические системы подвержены влиянию погодных условий и могут путать дроны с другими объектами, например, птицами.

**2. Смежные работы.** В области обработки радиосигналов с БПЛА уже активно применяются методы глубокого обучения, особенно нейронные сети, для повышения точности и эффективности обработки сигналов. Рассмотрим некоторые из них.

В работе «Deep Learning Approach to UAV Detection and Classification by Using Compressively Sensed RF Signal» [10] авторы предложили метод обнаружения и классификации БПЛА, основанный на сжатии радиочастотных сигналов и использовании глубоких нейронных сетей. Сначала радиосигналы БПЛА сжимаются с помощью техники compressive sensing, что снижает объем данных и облегчает их обработку. Затем сжатые сигналы анализируются с использованием глубоких нейронных сетей для точного определения наличия БПЛА и их классификации по типам. Экспериментальные результаты показали, что предложенный метод обеспечивает высокую точность обнаружения и классификации БПЛА даже при наличии шумов и помех.

Первоначально нейронные сети применялись преимущественно для задач классификации радиосигналов [11]. Однако, с учетом успехов их использования в обработке аудиоданных [12], начали активно развиваться аналогичные методы в области анализа радиосигналов [13].

В статье «RF-Diffusion: Radio Signal Generation via Time-Frequency Diffusion Models» [14] рассматривается применение генеративных моделей, включая вариационные автоэнкодеры (VAE), для синтеза и дополнения радиочастотных (RF) данных. VAE обучаются распределению входных сигналов и генерируют новые образцы, что полезно для моделирования и прогнозирования радиосигналов. Однако классические VAE ограничены в обработке RF-сигналов, так как могут терять важные временные и фазовые характеристики. В качестве альтернативы авторы предлагают диффузионные модели, которые лучше учитывают сложную структуру сигналов. Тем не менее, условные VAE (CVAE) остаются конкурентоспособными в задачах дополнения и предсказания пропущенных фрагментов сигнала. В экспериментальной части RF-Diffusion сравнивается с VAE, CVAE и DCGAN, демонстрируя превосходство диффузионных моделей в синтезе Wi-Fi и FMCW сигналов. Однако CVAE показывают хорошие результаты в контролируемом генеративном моделировании, когда важно учитывать параметры канала или тип сигнала.

**3. Вариационный автоэнкодер для решения задачи восстановления радиосигнала.** Вариационный автоэнкодер (VAE) – это тип нейронной сети, который комбинирует вероятностное моделирование и методы глубокого обучения для кодирования данных в латентное пространство и генерации новых данных [15]. VAE отличается от классического автоэнкодера тем, что он обучается моделировать вероятностное распределение в скрытом пространстве, а не отображать входные данные в фиксированные детерминированные представления. Основными компонентами вариационного автоэнкодера является вероятностная модель, вариационное приближение и функция потерь ELBO.

**3.1. Вероятностная модель.** В отличие от обычных автоэнкодеров, которые детерминировано кодируют входные данные в латентное пространство, вариационный

автоэнкодер (VAE) обучается восстанавливать вероятностное распределение входных данных. Он основывается на вероятностной модели:

$$p(x, z|\Theta) = p(z)p(x|z, \Theta), \quad (4)$$

где $z$ – латентное представление данных; $p(z)$ – априорное распределение, обычно N(0, 1); $p(x|z, \Theta)$ – распределение, моделирующее распределение данных $x$, заданных $z$.

Для бинарных данных используется модель на основе распределения Бернулли, где вероятность появления каждого пикселя (или другого бинарного признака) представляется в виде произведения независимых распределений:

$$p(x, z|\Theta) = \prod_{i=1}^{D} p_i(z, \theta)^{x_i} (1 - p_i(z, \theta))^{1-x_i}, \quad (5)$$

где $D$ – размерность входных данных.

**3.2. Вариационное приближение.** Вычисление апостериорного распределения $p(x|z)$ напрямую является сложной задачей, поскольку требует интегрирования по всем возможным значениям $z$. Поэтому в VAE используется вариационное приближение $q(z|x, \phi)$, которое аппроксимирует истинное апостериорное распределение.

Обычно $q(z|x, \phi)$ задаётся нормальным распределением с параметрами, зависящими от входных данных:

$$q(z|x, \phi) = N(z|\mu(x, \phi), diag(\delta^2(x, \phi))), \quad (6)$$

где $\mu(x, \phi)$ – среднее распределения; $\delta^2(x, \phi)$ – дисперсия.

**3.3. Функция потерь.** Чтобы обучить VAE, используется нижняя вариационная граница (ELBO), которая включает два слагаемых:

– ошибка реконструкции (Reconstruction Loss), которая измеряет, насколько хорошо декодер восстанавливает данные: $E_{q(z|x,\phi)}[logp(x|z, \theta)]$;

– мера различия (KL-дивергенция) между апостериорным $q(z|x, \phi)$ и априорным $p(z)$ величинами: $D_{KL}(q(z|x, \phi)||p(z))$.

Итоговая функция потерь:

$$L(x, \phi, \Theta) = E_{q(z|x,\phi)}[logp(x|z, \theta)] - D_{KL}(q(z|x, \phi)||p(z)) \quad (7)$$

**3.4. Реализация VAE.** Распределение $q(z|x, \Theta)$ называется энкодером, так как оно кодирует входные данные $x$ в латентное представление $z$. Распределение $p(x|z, \phi)$ называется декодером, поскольку оно декодирует латентное представление обратно в данные $x$.

Для параметризации этих распределений используются две нейронные сети:

– энкодер принимает на вход $x$ и возвращает вектор размерности 2×d, который задает среднее $\mu(x, \phi)$ и стандартное отклонение $\delta(x, \phi)$ для распределения $q(z|x, \Theta)$;

– декодер принимает на вход латентное представление $z$ и возвращает логиты для распределения $p(x|z, \phi)$.

На рисунке 1 приведена структура VAE, которая, как видно, похожа на структуру обычного автоэнкодера, но с добавлением стохастической переменной ε.

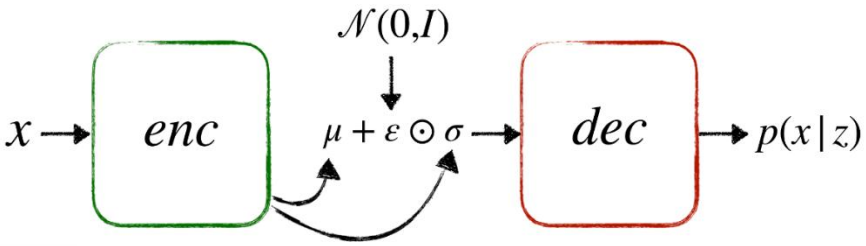



**Рис. 1.** Структура VAE

**4. Описание набора данных.** Обучение модели происходило на открытом датасете DeepSig Dataset: RadioML 2018.01A, который широко используется в исследованиях по обработке радиосигналов. Данный набор данных содержит синтетически сгенерированные

радиосигналы с 24 типами модуляций, охватывающими как аналоговые, так и цифровые схемы модуляции. Данные были созданы с целью разработки и тестирования алгоритмов классификации, распознавания и анализа сигналов, что делает их подходящими для задач, связанных с реконструкцией и обработкой радиосигналов.

Файлы датасета хранятся в формате HDF5, который оптимизирован для работы с большими объемами данных и позволяет эффективно загружать и обрабатывать сигналы. В датасете содержится более 2,5 миллионов примеров, каждый из которых представлен 1024 комплексными отсчетами (I/Q компоненты). Это делает набор данных удобным для задач машинного обучения, связанных с анализом временных рядов и спектральных характеристик сигналов.

Каждый пример сопровождается метаинформацией, включающей:

- тип модуляции (например, BPSK, QPSK, AM, FM и др.);
- отношение сигнал/шум (SNR) в диапазоне от -20 до +30 дБ;
- дополнительные параметры, характеризующие условия генерации сигнала.

Изначально датасет создавался для решения задачи классификации радиосигналов в рамках хакатона по машинному обучению. Однако, учитывая, что он содержит разнообразные типы модуляций и различные уровни шума, его можно эффективно использовать и для решения других задач, включая реконструкцию сигналов, что является целью этого исследования.

В рамках подготовки данных для обучения модели были выполнены следующие шаги:

- фильтрация по типу модуляции: из 24-х представленных видов были отобраны наиболее распространенные модуляции, используемые при передаче сигналов с БПЛА**,** а именно: BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 8PSK (8-Phase Shift Keying), 16QAM (16-Level Quadrature Amplitude Modulation), 64QAM (64-Level Quadrature Amplitude Modulation). Можно было добавить больше типов модуляции, чтобы улучшить обобщающую способность модели, однако при больших размерах выборки происходило переполнение памяти модели;
- фильтрация по уровню SNR: сигналы с крайне низким SNR (ниже -10 дБ) были исключены, так как они содержат значительное количество шума и могут затруднить обучение модели;
- разделение данных на обучающую и тестовую выборки: после фильтрации в распоряжении осталось около 500 тысяч примеров, которые были разбиты следующим образом: 80% (400 тыс.) примеров – для обучения модели, 20% (100 тыс.) примеров – для тестирования.

**5. Архитектура и обучение VAE.** Архитектура вариационного автоэнкодера, созданного для решения поставленной задачи, приведена на рисунке 2. Представленная архитектура является сверточным вариационным автоэнкодером (VAE) с однонаправленными свертками (Conv1D), предназначенным для обработки одномерных сигналов размерностью 1024×2. Модель включает три ключевых компонента: энкодер, блок репараметризации и декодер. Энкодер состоит из двух последовательных сверточных слоев с фильтрами размерности 64 и 128, функциями активации ReLU и операциями нормализации и субдискретизации (MaxPooling1D). После этого применяется слой выравнивания (Flatten), преобразующий выход в векторное представление, которое затем разделяется на два набора параметров латентного пространства: $z_{mean}$ и $z_{log_var}$.

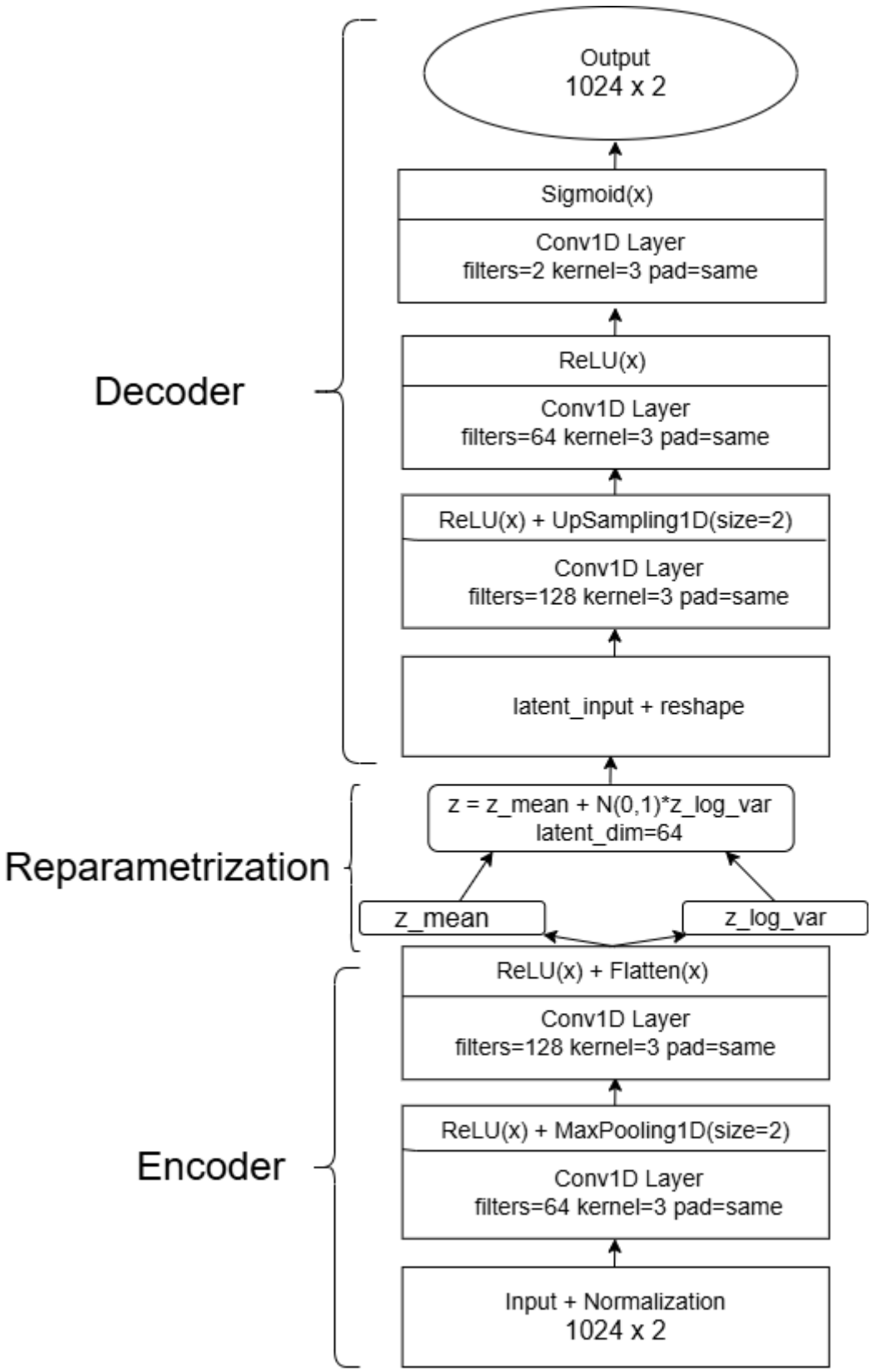



**Рис. 2.** Архитектура VAE

Для обеспечения стохастичности используется метод репараметризации: латентное представление z формируется как сумма $z_{mean}$ и случайной величины, масштабированной на $z_{log_var}$, имеющей размерность 64. Декодер выполняет восстановление сигнала с помощью последовательности операций: увеличение размерности через UpSampling1D, свертка с

увеличением числа фильтров (128 и 64) и финальная свертка с двумя фильтрами. Выходной слой использует сигмоидную активацию для получения реконструированного сигнала.

Полученная архитектура вариационного автокодировщика представлена более сжато на рисунке 3.

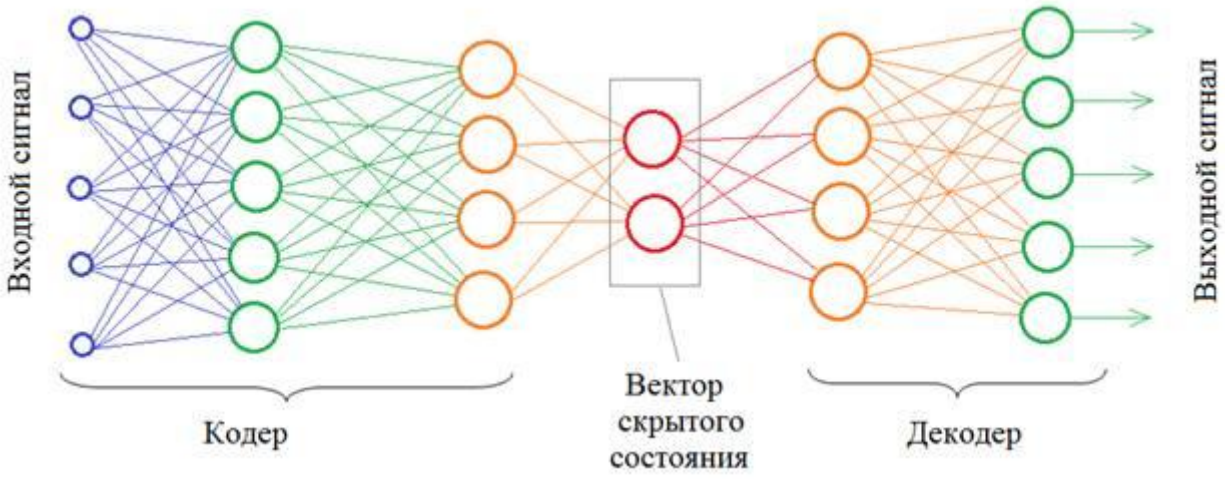



**Рис. 3.** Общее представление архитектуры VAE

Было замечено, что при увеличении количества сверточных слоев, то есть при более глубокой архитектуре, модель сразу начинает переобучаться. Это значит, что вариационный автоэнкодер достаточно быстро выучивает все закономерности в данных и при дальнейшем усложнении архитектуры начинает подстраиваться под локальные шумы тренировочной выборки, а увеличение количества фильтров в сверточных слоях, наоборот, положительно сказалось на качестве модели. Это можно объяснить тем, что каждый фильтр в сверточном слое отвечает за выделение определенных признаков из входных данных. Увеличение количества фильтров позволяет модели извлекать больше разнообразных признаков, что делает ее более гибкой и способной лучше аппроксимировать сложные распределения данных.

В данной задаче именно нормализация входных данных помогла достичь хорошего качества. Также в лучшую сторону повлияло увеличение размерности латентного представления до 64. В ходе обучения не возникло переобучения, что говорит о хорошей обобщающей способности модели.

Обучение модели происходило на платформе Kaggle, где и располагается датасет DeepSig Dataset: RadioML 2018.01A. Модель обучалась 50 эпох на видеокарте GPU T4 x2, которую бесплатно предоставляет Kaggle.

Метриками качества были выбраны MSE (mean squared error), MAE (mean absolute error) и PSNR (peak signal-to-noise ratio). MSE входит в функцию потерь VAE и отвечает за измерение расхождения между восстановленным и исходным сигналами, поэтому его целесообразно использовать, как метрику для оценки качества модели. Использование MSE позволяет выделить крупные ошибки восстановления, потенциально влияющие на безопасность и успешность выполнения миссий.

MAE дает представление о средней точности восстановления и более устойчив к шумам, что важно при обработке больших объемов данных, например, телеметрии, ее проще интерпретировать как «средняя абсолютная ошибка». PSNR (пиковое отношение сигнал/шум) показывает, насколько сигнал не искажен шумами, чтобы передаваемые данные, например, команды управления БПЛА, были четкими и интерпретируемыми.

**6. Анализ и сравнение результатов работы модели с фильтром Калмана.** В таблице 1 представлены значения метрик, полученные на разных эпохах обучения на тренировочной и валидационной (тестовой) выборках. Стоит отметить, что уже на первой эпохе значения

метрик на обеих выборках достаточно хорошие и в случае MSE значительный спад наблюдается на первых 10 эпохах, а дальше изменение происходит достаточно медленно.

**Таблица 1.** Значения метрик модели на тренировочной и тестовой выборке

| Номер эпохи обучения | MSE train | MAE train | PSNR train | MSE val | MAE val | PSNR val |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,0062 | 0,0639 | 22,0991 | 0,0058 | 0,0615 | 22,3997 |
| 5 | 0,0049 | 0,0545 | 23,1420 | 0,0048 | 0,0539 | 23,4103 |
| 10 | 0,0045 | 0,0520 | 23,4506 | 0,0045 | 0,0519 | 23,4519 |
| 15 | 0,0044 | 0,0512 | 23,5440 | 0,0044 | 0,0509 | 23,5814 |
| 20 | 0,0043 | 0,0506 | 23,6356 | 0,0043 | 0,0506 | 23,6398 |
| 25 | 0,0043 | 0,0500 | 23,6975 | 0,0043 | 0,0499 | 23,7081 |
| 30 | 0,0042 | 0,0497 | 23,7400 | 0,0042 | 0,0497 | 23,7457 |
| 35 | 0,0042 | 0,0496 | 23,7604 | 0,0042 | 0,0494 | 23,7770 |
| 40 | 0,0042 | 0,0493 | 23,7901 | 0,0042 | 0,0492 | 23,8151 |
| 45 | 0,0042 | 0,0492 | 23,8146 | 0,0042 | 0,0491 | 23,8195 |
| 50 | 0,0041 | 0,0491 | 23,8159 | 0,0041 | 0,0491 | 23,8200 |

График изменения ошибки (Loss) на каждой эпохе (Epochs) представлен на рисунке 4.

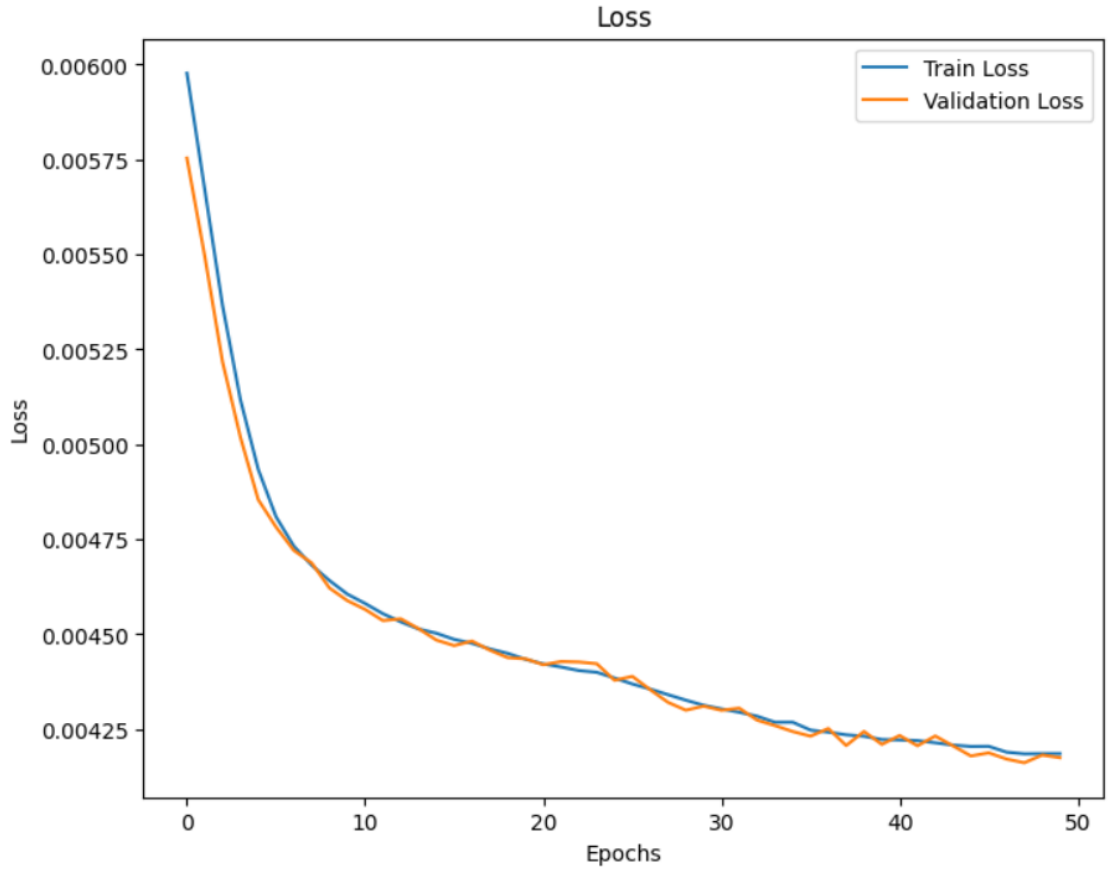



**Рис. 4.** График изменения ошибки модели на обучении и валидации

В таблице 1 по значениям метрик MAE и PSNR наглядно видна хорошая обобщающая способность модели. Значения метрик стабильно изменяются в лучшую сторону: в случае MAE это почти линейный спад, а PSNR стабильно растет. В конце обучения MSE и MAE на тренировочной и валидационной выборках стали равны, но это нижняя граница нормы, чтобы говорить о хорошей обобщающей способности модели. PSNR на валидационной выборке немного лучше, чем на тренировочной, что подтверждает качество построенной модели.

На рисунке 5 продемонстрирован рост метрики PSNR (Value) на каждой эпохе обучения (Epochs).

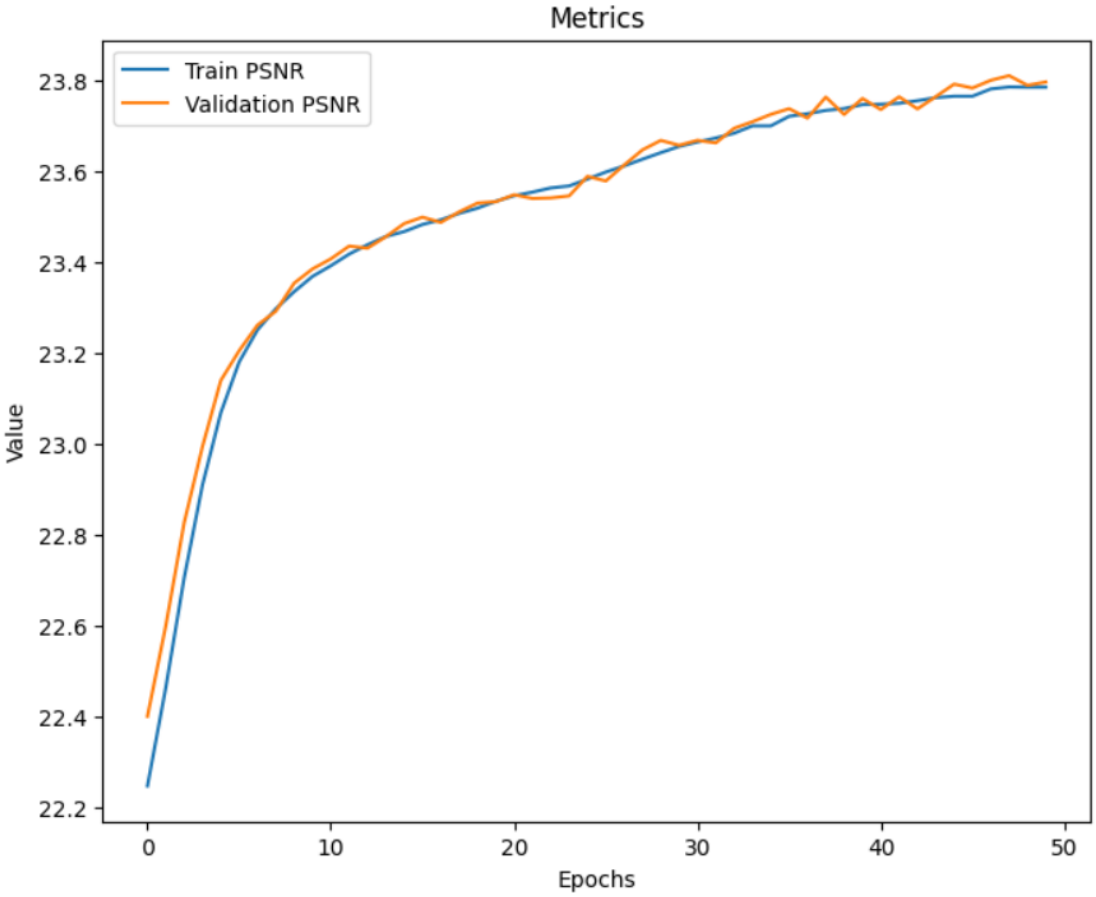



**Рис. 5.** График изменения PSNR на обучении и валидации

Если посмотреть на значения метрик, полученные на 50 эпохе в таблице 1, то MSE указывает на то, что в среднем квадрат ошибки (разности) между значениями оригинального и восстановленного сигналов равен 0,0041. Это небольшое значение, если считать, что сигнал нормализован в диапазоне [0,1], то MSE = 0,0041 соответствует средней разнице ±0,064 между восстановленным и оригинальным сигналом. В случае MAE = 0,0491 это означает, что восстановленный сигнал отличается от оригинального в среднем на 4,91%, что является хорошим показателем для зашумленного сигнала. В контексте управления БПЛА это допустимый уровень ошибки, если сигнал остается читаемым и восстановление сохраняет ключевые параметры (амплитуду, фазу, модуляцию). В заключение, PSNR = 23,82 на валидации (на тренировочной выборке при округлении получим такое же значение) свидетельствует о минимальном присутствии шума в восстановленном сигнале. Также стоит отметить, что в зашумленных данных PSNR=25 считается почти идеальным восстановлением сигнала. Значения метрик качества нужно оценивать вместе и MSE = 0,0041, MAE = 0.0491 и PSNR = 23.82 согласуются друг с другом: отклонения небольшие, и сигнал в целом хорошо восстановлен.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что обученная модель хорошо справляется со своей задачей, но для полного анализа нужно сравнить ее показатели с классическим методом восстановления.

Для примера был взят и реализован фильтр Калмана. Для обработки сигналов использовался одномерный фильтр Калмана, поскольку рассматриваемые радиосигналы представляют собой последовательности 1024 отсчетов (I/Q-компонент). Входные данные

перед фильтрацией были представлены в виде одномерных временных рядов, соответствующих амплитудным значениям.

Фильтрация осуществлялась по следующей схеме:

- инициализация параметров: начальное значение сигнала принимается равным первому измеренному отсчету, начальная оценка ошибки устанавливается на уровне 1.0. Определяются параметры фильтра: ковариация процесса (process variance) – 1e-5, ковариация измерений (measurement variance) – 0.1;
- прогнозирование следующего состояния: оценка сигнала на текущем шаге принимается за предсказание следующего значения, ошибка прогноза обновляется с учетом ковариации процесса;
- обновление оценки: рассчитывается калмановский коэффициент, который определяет, насколько следует доверять новым измерениям по сравнению с предыдущими оценками; итоговая оценка сигнала корректируется на основе разницы между реальным измерением и прогнозируемым значением, ошибка обновляется с учетом влияния нового измерения;
- алгоритм применяется последовательно ко всем 1024 отсчетам каждого примера из датасета.

В итоге MSE = 0,4904 является достаточно большой ошибкой даже для изначально зашумленного сигнала, как и MAE = 0,5582. PSNR = 10,7813 говорит о том, что уровень шума соизмерим с самим сигналом и отличить сигнал от шума достаточно трудно.

В итоге можно сделать вывод, что с данной задачей восстановления сигнала хорошо справляется построенная архитектура VAE, что выражается и в значениях метрик качества и в том, что классический фильтр Калмана не справился с восстановлением зашумленных сигналов.

**Заключение.** В данной статье были рассмотрены классические методы восстановления радиосигнала и выявлено, что они не всегда могут являться оптимальным способом решения поставленной задачи в силу многих ограничений. Реализован вариационный автоэнкодер для восстановления зашумленного радиосигнала на датасете DeepSig Dataset: RadioML 2018.01A: архитектура классического VAE, состоящая из двух сверточных слоев и субдискретизации (MaxPooling1D), с применением нормализации к входным данным, что помогло улучшить качество модели.

В результате обучения алгоритма, описанного выше, были получены графики изменения ошибки и роста метрик на тренировочной и валидационной (тестовой) выборках. Также составлена таблица значений метрик качества (MSE, MAE, PSNR) на разных эпохах обучения для контроля обобщающей способности модели. Проведен анализ полученных метрик и их сравнение с метриками, полученными в результате применения фильтра Калмана к данному датасету. Доказано, что для решения данной задачи эффективнее использовать нейронные сети (в частности, построенную архитектуру), чем классические методы восстановления радиосигнала.

Для восстановления радиосигнала с БПЛА применение нейронных сетей, таких, как VAE, зачастую оказывается более эффективным, чем использование классических методов. Это связано с тем, что нейронные сети способны обучаться сложным зависимостям и адаптироваться к различным типам шумов и искажений, характерным для реальных условий передачи сигналов. В отличие от классических подходов, которые опираются на аналитические модели и требуют точного знания параметров сигнала, нейронные сети могут восстанавливать сигналы, опираясь на данные и минимизируя метрики потерь, такие, как ошибка восстановления или уровень битовых ошибок (BER). Благодаря этому нейронные сети

обеспечивают более высокое качество реконструкции радиосигнала в условиях высокой зашумленности или нестабильного канала связи, что особенно важно для задач, связанных с БПЛА.

Необходимо отметить, что выбор метода восстановления радиосигнала может зависеть от типа конкретной задачи или самих данных, поэтому не исключено, что иногда классические методы восстановления радиосигнала могут оказаться эффективнее нейронных сетей.

**Список источников**


1. Кухарчук Н.В. Редактирование звукового спектра с использованием дискретного преобразования Фурье / Н.В. Кухарчук // Конференция «Информационные технологии и автоматизация управления» (Омск, 26–27 мая 2023 г.): тез. докл. – Омск, 2023. – С. 132-135.
2. Пахомов А.А. Преобразование Фурье и вейвлеты в предобработке данных / А.А. Пахомов, И.А. Седых // Летняя школа молодых ученых: сб. науч. тр. – Липецк, 2024. – С. 67-68.
3. Кошелева Д.Д. Преобразование Фурье и быстрое преобразование Фурье / Д.Д. Кошелева, А.В. Дронина // Инновации. Наука. Образование, 2021. – №38. – С. 626-632.
4. Манонина И.В. Применение вейвлет-анализа для обработки сигналов систем передачи информации / И.В. Манонина, В.В. Шестаков // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, 2024. – Т.16 – №5. – DOI:10.36724/2409-5419-2024-16-3-30-38.
5. Калмыков И.А. Ортогональная обработка сигналов с использованием математических моделей целочисленных вейвлет-преобразований, реализованных в модулярных кодах классов вычетов / И.А. Калмыков, Н.К. Чистоусов, Н.И. Калмыкова и др.// Инженерный вестник Дона, 2023. – №3. – С. 182-202.
6. Андреев Д.А. Обработка цифровой информации на основе вейвлет-преобразования / Д.А. Андреев, В.А. Лондиков, О.Ю. Тимошевская // Конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Сочи, 01-10 октября 2021 г.): тез. докл. – Сочи, 2021. – С. 66-70.
7. Козырев Г.И. Восстановление входных сигналов динамических измерительных систем с помощью цифровой обратной фильтрации / Г.И. Козырев, Е.О. Юдицких // Измерительная техника, 2023. – №5. – DOI:10.32446/0368-1025it.2023-5-10-16.
8. Комарова К.В. Анализ восстановления квадратурных сигналов по двум пилот-сигналам / К..В. Комарова // Конференция «XLIX Огаревские чтения» (Саранск, 07-13 декабря 2020 г.): тез. докл. – Саранск, 2020. – С. 227-281.
9. Yang Sh., Luo Y., Miao W., et al. RF signal-based UAV detection and mode classification. Sensors, 2021, v.23, no. 12, pp. 21, DOI:10.3390/e23121678.
10. Mo Y., Huang J., Qian G. Deep learning approach to UAV detection and classification by using compressively sensed RF signal. Sensors, 2022, no. 8: 3072, DOI:10.3390/s22083072.
11. Ушакова А.М. Классификация модулированных радиосигналов с использованием нейронных сетей / А.М. Ушакова // Конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA» (Москва, 29-31 марта 2023 г.): тез. докл. – Москва, 2023. – С. 358-362.
12. Саввин С.В. Алгоритмические способы построения сверхразрешения видеоданных в условиях аппликативных помех с использованием глубоких нейронных сетей / С.В. Саввин // Вестн. Воронежского гос. ун-та, Сер. Системный анализ и информационные технологии, 2021. – № 4. – С. 107-120.
13. Евстратько В.В. Цифровой радиоприемник на основе нейронной сети / В.В. Евстратько, А.И. Коноваленко, А.В. Мишуров, и др. // Журнал радиоэлектроники, 2024. – №1. – DOI:10.30898/1684-1719.2024.1.5.
14. Chi G., Yang Z., Wu Ch. et al. RF-diffusion: Radio signal generation via time-frequency diffusion. ACM MobiCom '24: Proceedings of the 30th annual international conference on mobile computing and networking, 2024, pp. 77-92, DOI:10.1145/3636534.3649348.
15. Гергет О.М. Разработка моделей искусственных нейронных сетей для вариационного автоэнкодера / О.М. Гергет, В.В. Лаптев // Конференция «Молодежь и современные информационные технологии» (Томск, 22-26 марта 2021 г.): тез. докл. – Томск, 2021. – С. 51-52.


***Фелагерева Евгения Юрьевна.*** *Бакалавр в области радиофизики. Основные направления исследования автора: машинное обучение, нейронные сети, радиофизика. ORCID: 0009-0001-2406-1225, efelagereva@gmail.com. 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.*

***Рудоман Нэлли Радиковна.*** *Старший преподаватель кафедры оптоэлектроники ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». Основные направления исследования автора: физика твердого тела, компьютерное моделирование физических явлений, машинное обучение, искусственный интеллект, квантовые компьютеры, квантовая криптография. AuthorID: 39466, SPIN: 5844-2932, ORCID: 0009-0003-4308-235X. rudnel@ftf.kubsu.ru. 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.*

***Кузякина Марина Викторовна.*** *Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры геоинформатики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». Основные направления исследований автора: анализ данных, машинное обучение, искусственный интеллект, геоинформатика, физика атмосферы, геостатистика. AuthorID: 522457, SPIN: 4945-6665, ORCID: 0000-0003-0492-3630, MarinaVkuzyakina@gmail.com. 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.*

UDC 004.032.26
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.003

# Development of neural network architecture for radio signal recovery from UAVs

**Eugenia Yu. Felagereva[1], Nelly R. Rudoman[1], Marina V. Kuzyakina[1,2]**

[1]Kuban state university,
Russia, Krasnodar, *efelagereva@gmail.com*
[2]Kuban state university of technology
Russia, Krasnodar

**Abstract.** This study examines the problem of applying classical radio signal recovery methods. The use of neural networks, namely autoencoders, is proposed as a solution. The architecture of a variational autoencoder has been developed to solve the problem of radio signal recovery from an unmanned aerial vehicle. To train and test the model, a large dataset containing radio signals of various types of modulations and noise levels was used, DeepSig Dataset: RadioML 2018.01A. The aim of the study is to develop an architecture that shows the best metrics for radio signal recovery than classical methods. The quality metrics used are PSNR, MSE, and MAE, and the Adam optimizer. The Kalman filter was also applied to the dataset, which showed two orders of magnitude worse results in all quality metrics. The data obtained show that classical algorithms for restoring distorted radio signals may not always show decent quality of work.

**Keywords:** variational autoencoder, radio signal, UAV, Kalman filter

## References

1. Kukharchuk N.V. Redaktirovanie zvukovogo spektra s ispol'zovaniem diskretnogo preobrazovaniya Fur'e [Editing of the sound spectrum using the discrete Fourier transform]. Konferentsiya “Informatsionnye tekhnologii i avtomatizatsiya upravleniya” (Omsk, 26–27 maya 2023 g.) [Conference “Information Technologies and Automation of Control” (Omsk, May 26–27, 2023)], 2023, pp. 132-135.
2. Pakhomov A.A., Sedykh I.A. Preobrazovanie Fur'e i veivlety v predobrabotke dannykh [Fourier transform and wavelets in data preprocessing]. Letnyaya shkola molodykh uchenykh [Summer School of Young Scientists], 2024, pp. 67-68.
3. Kosheleva D.D., Dronina A.V. Preobrazovanie Fur'e i bystroe preobrazovanie Fur'e [Fourier transform and fast Fourier transform]. Innovatsii. Nauka. Obrazovanie [Innovations. Science. Education], 2021, no. 38, pp. 626-632.
4. Manonina I.V., Shestakov V.V. Primenenie veivlet-analiza dlya obrabotki signalov sistem peredachi informatsii [Application of wavelet analysis for processing signals in information transmission systems]. Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli [High-Tech technologies in space Earth studies], 2024, vol. 16, no. 5, DOI:10.36724/2409-5419-2024-16-3-30-38.
5. Kalmykov I.A., Chistousov N.K., Kalmykova N.I. et al. Ortogonal'naya obrabotka signalov s ispol'zovaniem matematicheskikh modeley tselochislennykh veyvlet-preobrazovaniy, realizovannykh v modulyarnykh kodakh klassov vychetov [Orthogonal signal processing using mathematical models of integer wavelet transforms implemented in modular residue class codes]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don], 2023, no. 3, pp. 182-202.
6. Andreev D.A., Londikov V.A., Timoshevskaya O.Yu. Obrabotka tsifrovoi informatsii na osnove veivlet-preobrazovaniya [Processing of digital information based on wavelet transform]. Konferentsiya “Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii” (Sochi, 01–10 oktyabrya 2021 g.) [Conference "Innovative, Information and Communication Technologies" (Sochi, October 1–10, 2021)], 2021, pp. 66-70.

7. Kozyrev G.I., Yuditskikh E.O. Vosstanovlenie vkhodnykh signalov dinamicheskikh izmeritel'nykh sistem s pomoshch'yu tsifrovoi obratnoi fil'tratsii [Restoration of input signals of dynamic measurement systems using digital inverse filtering]. Izmeritel'naya tekhnika [Measurement techniques], 2023, no. 5, DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-5-10-16.
8. Komarova K.V. Analiz vosstanovleniya kvadraturnykh signalov po dvum pilot-signalam [Analysis of quadrature signal reconstruction based on two pilot signals]. Konferentsiya “XLIX Ogarevskie chteniya” (Saransk, 07–13 dekabrya 2020 g.) [Conference “XLIX Ogarev Readings” (Saransk, December 7–13, 2020)], 2020, pp. 227-281.
9. Yang Sh., Luo Y., Miao W., et al. RF signal-based UAV detection and mode classification. Sensors, 2021, v.23, no. 12, pp. 21, DOI:10.3390/e23121678.
10. Mo Y., Huang J., Qian G. Deep learning approach to UAV detection and classification by using compressively sensed RF signal. Sensors, 2022, no. 8: 3072, DOI:10.3390/s22083072.
11. Ushakova A.M. Klassifikatsiya modulirovannykh radiosignalov s ispol'zovaniem neironnykh setei [Classification of modulated radio signals using neural networks]. Konferentsiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie DSPA» (Moskva, 29–31 marta 2023 g.) [Conference “Digital Signal Processing and its Applications DSPA” (Moscow, March 29–31, 2023)], 2023, pp. 358-362.
12. Savvin S.V. Algoritmicheskie sposoby postroeniya sverkhrazresheniya videodannykh v usloviyakh aplikativnykh pomekh s ispol'zovaniem glubokikh neironnykh setei [Algorithmic methods for constructing video data super-resolution under applicative interference using deep neural networks]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii [Bulletin of Voronezh State University, Series: System Analysis and Information Technologies], 2021, no. 4, pp. 107-120.
13. Evstrat'ko V.V. Tsifrovoy radiopriemnik na osnove neyronnoy seti [Digital radio receiver based on a neural network]. Zhurnal radioelektroniki [Journal of Radio Electronics], 2024, no. 1, DOI:10.30898/1684-1719.2024.1.5.
14. Chi G. et al. RF-diffusion: Radio signal generation via time-frequency diffusion, Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2024, pp. 77-92.
15. Gerget O.M., Laptev V.V. Razrabotka modeley iskusstvennykh neyronnykh setey dlya variatsionnogo avtoenkodera [Development of artificial neural network models for a variational autoencoder]. Konferentsiya “Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii” (Tomsk, 22–26 marta 2021 g.) [Conference “Youth and Modern Information Technologies” (Tomsk, March 22–26, 2021)], 2021, pp. 51-52.

***Felagereva Evgeniya Yurievna.*** *Bachelor's degree in Radiophysics. The author's main research areas are machine learning, neural networks, and radiophysics. ORCID: 0009-0001-2406-1225, efelagereva@gmail.com. 350040, Krasnodar, st. Stavropol, 149.*

***Rudoman Nelly Radikovna.*** *Senior Lecturer at the Department of Optoelectronics, Kuban State University. The author's main research areas are solid state physics, computer modeling of physical phenomena, machine learning, artificial intelligence, quantum computers, and quantum cryptography. AuthorID: 39466, SPIN: 5844-2932, ORCID: 0009-0003-4308-235X, rudnel@ftf.kubsu.ru. 350040, Krasnodar, st. Stavropol, 149.*

***Kuzyakina Marina Viktorovna.*** *Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Geoinformatics, Kuban State University. The author's main research areas are data analysis, machine learning, artificial intelligence, geoinformatics, atmospheric physics, and geostatistics. AuthorID: 522457, SPIN: 4945-6665, ORCID: 0000-0003-0492-3630, MarinaVkuzyakina@gmail.com. 350040, Krasnodar, st. Stavropol, 149.*

*Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 02.08.2025.*

*The article was submitted 04/01/2025; approved after reviewing 05/27/2025; accepted for publication 08/02/2025.*

## Информационные и интеллектуальные системы и технологии

УДК 004.91:004.738.5
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.004

# Тренды создания, распространения и искажения информации на примере научной корпорации

**Бычков Игорь Вячеславович[1], Клименко Ольга Анатольевна[2], Рычкова Елена Владимировна[2], Шабальников Игорь Владимирович[2]**

[1]Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Россия, Иркутск

[2]Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Россия, Новосибирск, *o.klimenko@sb-ras.ru*

**Аннотация.** В статье проводится анализ научных тематик новостей и сравнение путей распространения информации за 2016-2025 годы. В качестве базы используются более 17 тысяч новостей и документов, которые снабжались метаданными и систематизировались на корпоративном сайте Сибирского отделения Российской академии наук – Портале СО РАН. Анализируется возможное влияние искусственного интеллекта (ИИ) на искажение получаемой с его помощью информации, что требует контроля экспертов при наполнении сайтов.

**Ключевые слова:** корпоративные информационные системы, социальные сети, нейронная сеть, экспертный контроль

**Цитирование:** Бычков И.В. Тренды создания, распространения и искажения информации на примере научной корпорации / И.В. Бычков, О.А. Клименко, Е.В. Рычкова, И.В. Шабальников // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 39-45. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.004.

**Введение.** Портал Сибирского отделения РАН [1] был создан в 1996 году и сохранил в неизменном виде всю архивную информацию о научно-организационной деятельности за длительный период. В 2008-2018 гг. проводился анализ связности веб-пространства СО РАН [2–5], состоявшего из сайтов институтов, НГУ, портала СО РАН и ссылок между ними. Было показано, что внутри веб-пространства есть группы сайтов с числом ссылок большим, чем в среднем. Такие группы образовали сайты институтов физико-математической и химико-биологической направленности. Сайты геологических и гуманитарных институтов составляли отдельные сообщества. В 2013 году в рамках реформы Российской академии наук произошло объединение Российской академии медицинских наук (РАМН) и Российской академии сельскохозяйственных наук (РАСХН) с РАН. Исследование сайтов аграрных и медицинских институтов, которые вошли в Сибирское отделение РАН, показало малую связность между ними и дореформенным академическим веб-пространством. В 2016 году была создана версия корпоративного сайта с метаданными, которые включили всю тематику (математика, физика, химия и т.д.). Это упростило анализ информации по предметным областям.

**1. Широта и стабильность научных исследований и в целом научной корпорации.** За период 2016-2025 гг. был проведен анализ метаданных более 17 тысяч новостей и документов. Анализ не выявил скачкообразных изменений тематик, показал стабильность направлений исследований [6].

На рис. 1. приведено количество новостей на портале СО РАН по направлениям науки за два достаточно удаленных года (2016 и 2024 гг.) и за два года пандемии COVID-19 (2020 и 2021 гг.). Было замечено увеличение числа новостей по медицинской тематике, пики которых совпадали с пиками пандемии. Большое количество новостей по физическим наукам и наукам о Земле, в частности, обусловлено большим числом институтов и активно

работающим пресс-службам, регулярно предоставляющим новости для размещения на портале СО РАН.

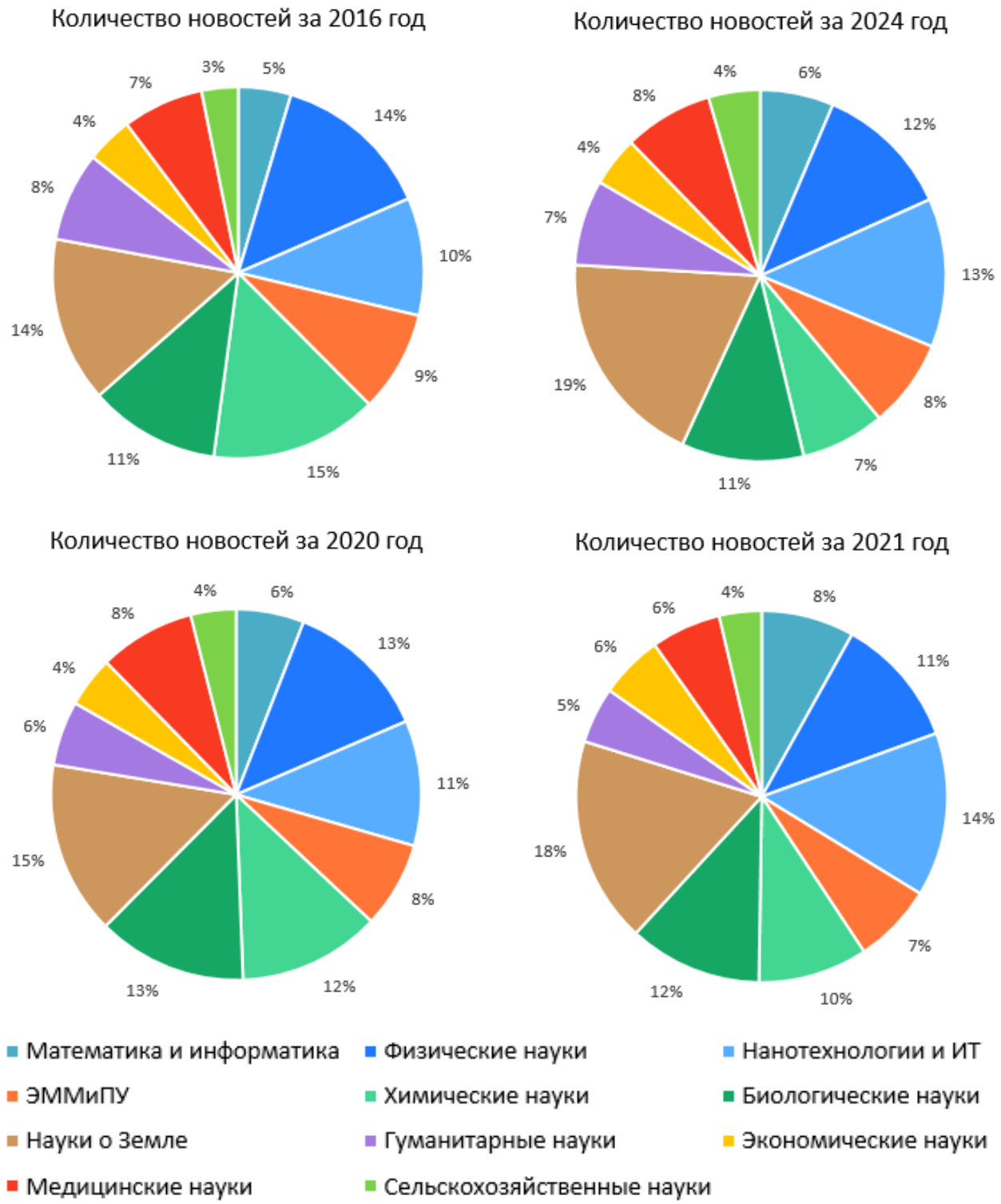



**Рис. 1.** Количество новостей по направлениям науки на портале СО РАН (в процентах от общего количества новостей за год).

Сокращение: ЭММиПУ – Энергетика, машиностроение, механика и процессы управления

**2. Расширение веб-пространства и укрепление связей между научными направлениями.** Расширение веб-пространства СО РАН произошло за счет развития связей с медицинскими и аграрными научными организациями. Взаимодействие медицинской тематики с другими науками шло через совместные проекты с биологами, химиками и физиками. Продвижение цифровизации медицинских исследований нашло отражение в

росте новостей на стыке медицины и информационных технологий, медицины и математики (рис. 2). Сельскохозяйственные организации более всего интегрированы с биологическими научными центрами и институтами. Был замечен рост публикаций о применении информационных технологий и методов искусственного интеллекта в сельском хозяйстве (рис. 3). В целом можно сделать вывод, что слияние РАН, РАМН и РАСХН в единую Академию усилило тематику на стыке наук.

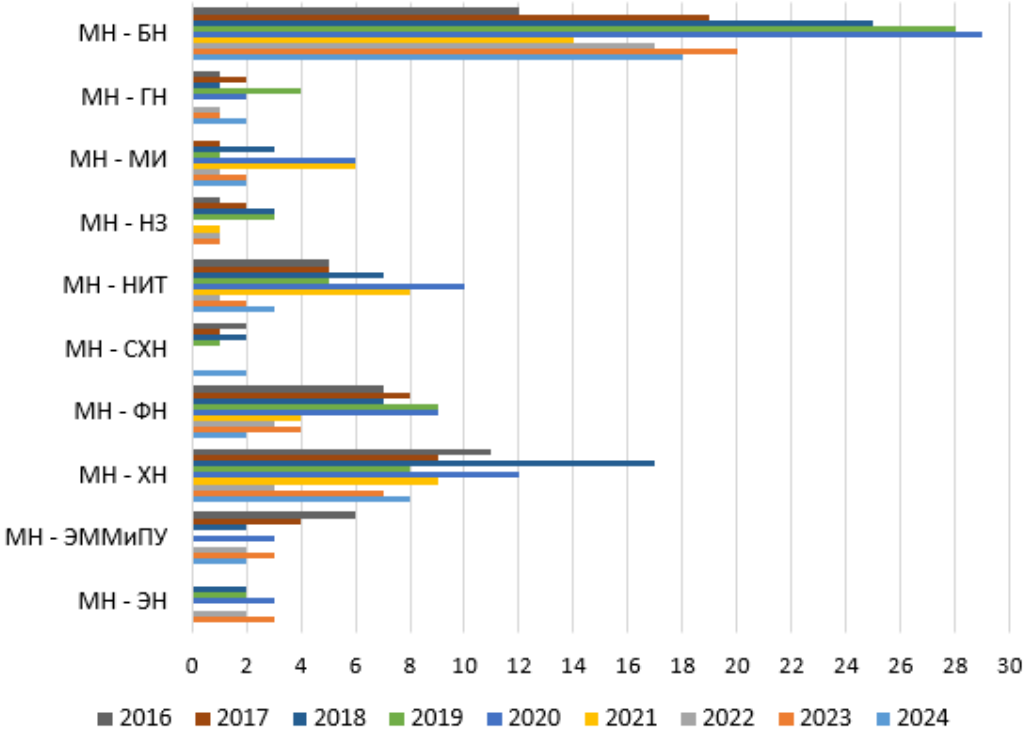



**Рис. 2.** Количество новостей на стыке медицинских наук с другими направлениям науки

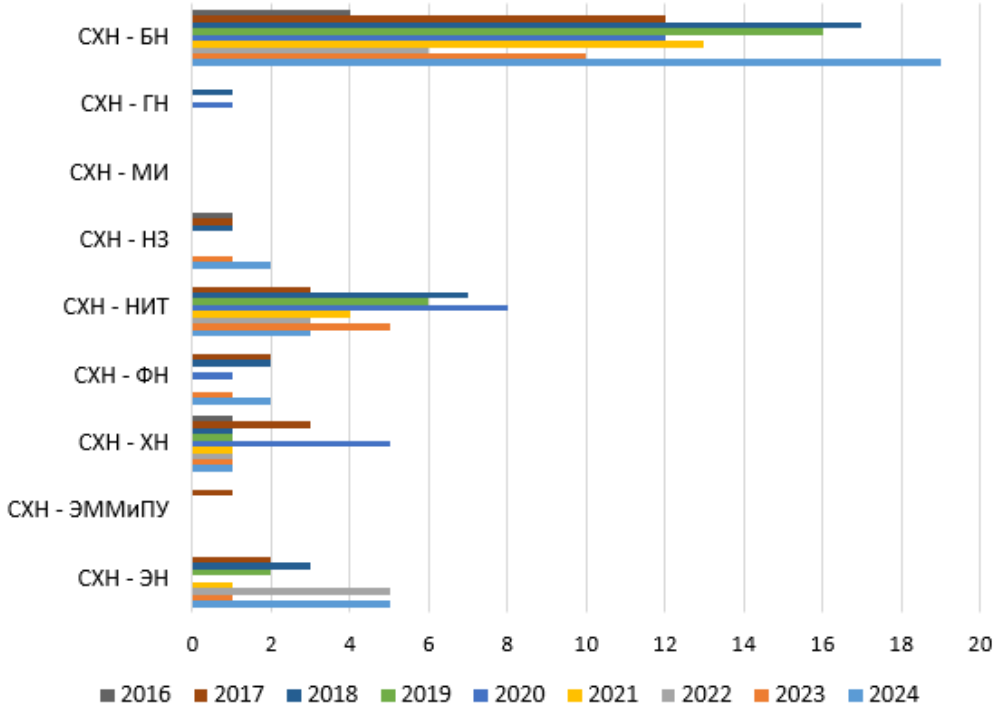



**Рис. 3.** Количество новостей на стыке сельскохозяйственных наук с другими направлениям науки

Условные обозначения: БН – биологические науки; ГН – гуманитарные науки; МИ – математика и информатика; МН – медицинские науки; НИТ – нанотехнологии и

информационные технологии; НЗ – науки о Земле; СХН – сельскохозяйственные науки; ФН – физические науки; ХН – химические науки; ЭММиПУ – энергетика, машиностроение, механика и процессы управления; ЭН – экономические науки

**3. Качественное изменение путей распространения информации.** В 2022-2024 гг. произошло изменение путей распространения официальной информации. Если ранее первыми новости появлялись на сайтах Кремля, Правительства РФ, министерств и ведомств, то сейчас официальные телеграм-каналы федеральных и региональных органов власти публикуют информацию быстрее (рис. 4). Это касается текстовой информации, видео, фотографий, прямых трансляций. Далее информация распространяется СМИ, социальными сетями. Трактовка информации, а также выбор определенных эпизодов, акцентирование этих моментов может вести к искажению смысла или утере важной информации. В марте 2022 года для быстрого распространения информации о Сибирском отделении РАН был создан телеграм-канал «Советник СО РАН» [7].

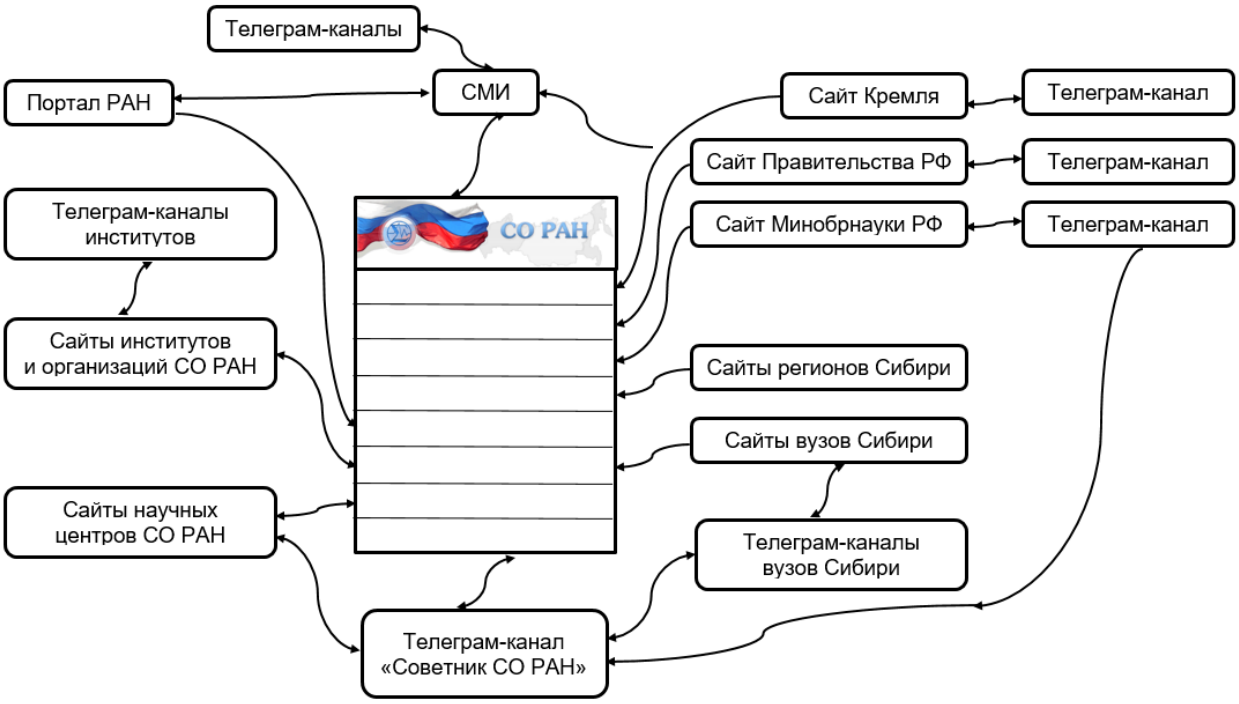



**Рис. 4.** Пути распространения информации

На корпоративном сайте СО РАН в разделе документов, а также в новостной ленте даются ссылки на официальные источники, приводятся цитаты из официальных телеграм-каналов и сайтов федеральных и региональных органов власти.

В Сибирском отделении РАН работают 11 Научных советов различной направленности. Один из них, Научный совет СО РАН по проблемам озера Байкал, ведет активное взаимодействие с федеральными и региональными органами власти, научными учреждениями и другими структурами РАН, и ее региональными отделениями, ведомствами, субъектами Российской Федерации, научными профессиональными сообществами [8]. Ввиду важности проблем в сфере сохранения озера Байкал и обеспечения доступа к документам по этим проблемам на портале СО РАН был создан раздел Научного совета СО РАН по проблемам озера Байкал [9]. В этом разделе размещены новости, касающиеся деятельности Научного совета, протоколы заседаний совета, отчеты о деятельности, а также письма Научного совета, направляемые в различные органы власти для решения экологических и экономических проблем, связанных с озером Байкал (более 50 писем с 2020 года по н.в.). В

разделе приводится научно-обоснованная информация о состоянии Байкальской природной территории.

**4. Влияние методов искусственного интеллекта на создание и распространение научной информации.** К моменту взрывного развития методов искусственного интеллекта (ИИ) в каждой конкретной предметной области сложились свои проверенные подходы к исследованиям. Внедрение ИИ поставило перед учеными ряд вопросов: ИИ лучше, чем традиционные методы исследования или оба подхода дополняют друг друга? ИИ мешает традиционным методам научных исследований или является альтернативой? Насколько можно доверять результатам, полученным с помощью ИИ? Авторам статьи представляется, что универсального ответа для всех областей знаний нет. Есть достаточно много примеров успешного применения методов ИИ. Например, социологическая обработка вопросов, поступивших на Прямую линию с В.В. Путиным. В 2024 году для анализа более 2 млн вопросов использовалась нейросеть Сбербанка. Искусственный интеллект определил топ актуальных тем по стране – это жилье, коммунальные услуги, вопросы внутренней и внешней политики, медицина. Граждан младше 18 лет более всего волновали вопросы образования и науки.

Несомненно, что ИИ полезен, как инструмент работы с большими данными, выполнения рутинных и однообразных действий. Отрицательным воздействием ИИ является утеря школьниками и студентами способности самостоятельно решать задачи, проводить научный поиск. Использование ИИ возможно для увеличения скорости написания текста, но при экспертном контроле (т.е. контроля человеком).

Авторы статьи считают, что участие экспертов в контроле научной составляющей информации, размещаемой на сайтах организаций СО РАН, является весьма важным.

Например, в ежегодных отчетах председателя СО РАН о деятельности Отделения приводятся выдающиеся результаты научных исследований институтов, центров, вузов (за каждый год) [10]. Экспертный отбор результатов происходит на ученом совете института или вуза, затем на заседании Объединенных ученых советов по направлениям науки и в финале, академиком – председателем Сибирского отделения РАН. Такая информация имеет большую ценность, показывает действительный уровень развития науки.

**Заключение.** Роль надежных источников научно-обоснованной информации возрастает с ростом сгенерированной искусственным интеллектом псевдонаучной информации. Искажение информации может быть злонамеренным, а может происходить из-за несовершенства методов ИИ. Использование ИИ возможно для систематизации больших объемов достоверной информации, для поиска закономерностей и внутренних связей, как вспомогательный инструмент. Корпоративный сайт Сибирского отделения РАН должен остаться местом, где публикуется и хранится, поверенная экспертами, научно-обоснованная информация.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

## Список источников

1. Портал СО РАН // Официальный сайт Сибирского отделения РАН. – URL: https://www.sbras.ru/ru (дата обращения 28.03.2025).
2. Шокин Ю.И. Рейтинг сайтов научных организаций СО РАН / Ю.И. Шокин, О.А. Клименко, Е.В. Рычкова, и др. // Вычислительные технологии, 2008. – Т. 13. – № 3. – С. 128-135.
3. Шокин Ю.И. Исследование научного веб-пространства Сибирского отделения Российской академии наук / Ю.И. Шокин, А.Ю. Веснин, А.А. Добрынин, и др. // Вычислительные технологии, 2012. – Т. 17. – № 6. – С. 85-98.

4. Шокин Ю.И. Анализ веб-пространства академических сообществ методами вебометрики и теории графов / Ю.И. Шокин, А.Ю. Веснин, А.А. Добрынин, и др. // Информационные технологии, 2014. – № 12. – С.31-40.
5. Dehmer M., Dobrynin A.A., Konstantinova E.V. Analysis of webspaces of the Siberian Branch of the Russian academy of sciences and the Fraunhofer-Gesellschaft. Information technology in industry, 2018, vol. 6, iss. 1, pp. 1-6.
6. Бычков И.В. Вопросы ресурсов корпоративной информационной системы СО РАН: история и современное состояние / И.В. Бычков, О.А. Клименко, Е.В. Рычкова, и др. // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 2(30). – С. 129-137. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.013.
7. Телеграм-канал «Советник СО РАН». – URL: https://t.me/CouncilorSBRAS (дата обращения 28.03.2025).
8. Бычков И.В. О развитии статуса Сибирского отделения РАН в целях координации и научного сопровождения проектов по охране озера Байкал / И.В. Бычков, И.И. Орлова // География и природные ресурсы, 2022. Т. 43. – № S5. – С. 7-12. – DOI:10.15372/GIPR20220501.
9. Раздел Научного совета СО РАН по проблемам озера Байкал на портале СО РАН. – URL: https://www.sbras.ru/ru/sci_council_baikal (дата обращения: 28.03.2025).
10. Раздел «Отчеты о деятельности СО РАН» на портале СО РАН. – URL: https://www.sbras.ru/ru/cmn/reports (дата обращения 28.03.2025).

***Бычков Игорь Вячеславович.*** *Академик РАН, профессор, доктор технических наук, директор Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. AuthorID: 62875, SPIN: 5816-7451, ORCID: 0000-0002-1765-0769, bychkov@icc.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, а/я 1233.*

***Клименко Ольга Анатольевна.*** *Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий. AuthorID: 15086, SPIN: 4784-0360, ORCID: 0009-0005-6939-9704, o.klimenko@sb-ras.ru, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 6.*

***Рычкова Елена Владимировна.*** *Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий. AuthorID: 68501, SPIN: 1933-9426, ORCID: 0000-0001-9692-8441, helen@ict.nsc.ru, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 6.*

***Шабальников Игорь Владимирович.*** *Заведующий сектором информационных систем, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий. AuthorID: 599979, SPIN: 4629-0120, ORCID: 0000-0001-9821-854X, shabalnikov@ict.sbras.ru, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 6.*

---

UDC 004.91:004.738.5
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.004

# Trends in the creation, dissemination and distortion of information using the example of a scientific corporation

**Igor V. Bychkov[1], Olga A. Klimenko[2], Elena V. Rychkova[2], Igor V. Shabalnikov[2]**

[1]V.M. Matrosov institute of system dynamics and control theory SB RAS,
Russia, Irkutsk
[2]Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Russia, Novosibirsk, *o.klimenko@sb-ras.ru*

**Abstract.** The article analyzes scientific topics of news and compares information dissemination routes for 2016-2025. The database includes more than 17 thousand news items and documents that were supplied with metadata and systematized on the corporate website of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – the SB RAS Portal. The possible impact of artificial intelligence (AI) on the distortion of information obtained with its help is analyzed, which requires expert control when filling websites.

**Keywords:** corporate information systems, social networks, neural network, control by experts

**Acknowledgements:** The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Federal Research Center for Information and Computational Technologies.

## References

1. Portal SO RAN. Ofitsialnyy sayt Sibirskogo otdeleniya RAN [Portal of the SB RAS. Official website of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Available at: https://www.sbras.ru/ru (accessed 03/28/2025).
2. Shokin Y.I., Klimenko O.A., Rychkova E.V., Shabalnikov I.V. Reiting saitov nauchnykh organizatsyi SO RAN [Rating of scientific organizations' websites of the SB RAS]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computational Technologies], 2008, vol. 13, no. 3, pp. 128-135.
3. Shokin Y.I., Vesnin A.Yu., Dobrynin A.A., Klimenko O.A., Rychkova E.V., Petrov I.S. Issledovanie nauchnogo veb-prostranstva Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk [Research of the scientific web space of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computational Technologies], 2012, vol. 17, no. 6, pp. 85-98.
4. Shokin Yu.I., Vesnin A.Yu., Dobrynin A.A., et al. Analiz veb-prostranstva akademicheskikh soobshchestv metodami vebletrii i teorii grafov [Analysis of the Academic Communities Web Space by Webometrics and Graph Theory Methods]. Informatsionnyye tekhnologii [Information Technologies], 2014, no. 12, pp. 31-40.
5. Dehmer M., Dobrynin A.A., Konstantinova E.V. Analysis of webspaces of the Siberian Branch of the Russian academy of sciences and the Fraunhofer-Gesellschaft. Information technology in industry, 2018, vol. 6, iss. 1, pp. 1-6.
6. Bychkov I.V., Klimenko O.A., Rychkova E.V., et al. Voprosy resursov korporativnoy informatsionnoy sistemy SO RAN: istoriya i sovremennoye sostoyaniye [Resource issues of the corporate information system of the SB RAS: history and current state]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 2(30), pp. 129-137, DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.013.
7. Telegram-kanal “Sovetnik SO RAN” [Telegram-channel “Councilor of the SB RAS”]. Available at: https://t.me/CouncilorSBRAS (accessed: 03/28/2025).
8. Bychkov I.V., Orlova I.I. O razvitii statusa Sibirskogo otdeleniia RAN v tseliakh koordinatsii i nauchnogo soprovozhdeniia proektov po okhrane ozera Baikal [On the development of the status of the Siberian Branch of RAS for coordination and scientific support of projects on the protection of Lake Baikal]. Geography and Natural Resources, 2022, vol. 43, no. S5, pp. 7-12, DOI: 10.15372/GIPR20220501.
9. Razdel “Nauchnyi sovet SO RAN po problemam ozera Baikal” [Section “Scientific Council of the Institutes of the SB RAS on the Problems of Lake Baikal”]. Portal of the SB RAS, 2025, available at: https://www.sbras.ru/ru/sci_council_baikal (accessed:03/28/2025).
10. Razdel “Otchety o deiatelnosti SO RAN” [Section “Reports on the activities of the SB RAS”]. Portal of the SB RAS, 2025, available at: https://www.sbras.ru/ru/cmn/reports (accessed: 03/28/2025).

***Bychkov Igor Vyacheslavovich.*** *Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Director of the V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, AuthorID: 62875, SPIN: 5816-7451, ORCID: 0000-0002-1765-0769, bychkov@icc.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova str., 134.*

***Klimenko Olga Anatolievna.*** *Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, AuthorID: 15086, SPIN: 4784-0360, o.klimenko@sb-ras.ru, Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva ave., 6.*

***Rychkova Elena Vladimirovna.*** *Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Junior Researcher of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, AuthorID: 68501, SPIN: 1933-9426, ORCID: 0000-0001-9692-8441, helen@ict.nsc.ru, Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva ave., 6.*

***Shabalnikov Igor Vladimirovich.*** *Head of Information Systems Sector of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, AuthorID: 599979, ORCID: 0000-0001-9821-854X, shabalnikov@ict.sbras.ru, Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva ave., 6.*

*Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 24.08.2025.*

*The article was submitted 04/21/2025; approved after reviewing 06/24/2025; accepted for publication 08/24/2025.*

УДК 004.8:620.9
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.005

# Картирование знаний как один из инструментов построения экосистемы знаний в энергетике

**Лезин Александр Геннадьевич, Массель Людмила Васильевна**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *lag071999@mail.ru*

**Аннотация.** В настоящее время мировое сообщество проявляет значительный интерес к области, называемой «Knowledge management» (управление знаниями). В России исследования по этой теме также осуществляются, но не так активно, как за рубежом. Передовые исследования основываются на построении экосистемы знаний. Большое значение в этих исследованиях имеют вопросы разработки методов и инструментов управления знаниями в экосистеме знаний. Одним из фрагментов экосистемы знаний могут стать не только знания, но и сведения о специалистах, владеющих этими знаниями, а также их компетенциях, определить которые помогает картирование знаний. В статье предложен один из инструментов построения экосистемы знаний для наукоемких организаций энергетического сектора на основе картирования знаний. Новизна исследования заключается в адаптации комплексного метода картирования знаний, включающей интеграцию онтологического моделирования и оценку компетенций сотрудников. Практическая значимость работы подтверждается апробацией метода в отделе систем искусственного интеллекта ИСЭМ СО РАН, где выявлены ключевые эксперты, зоны развития и оптимизированы процессы управления знаниями.

**Ключевые слова:** картирование знаний, экосистема знаний, управление знаниями, оценка знаний, наукоемкая организация

**Цитирование:** Лезин А.Г. Картирование знаний как один из инструментов построения экосистемы знаний в энергетике / А.Г. Лезин, Л.В. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 46-60. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.005.

**Введение.** Сегодня знания стали ключевым ресурсом для любой компании: организации инвестируют существенные средства в их получение, накопление, обработку и актуализацию. В условиях динамично изменяющейся среды бизнеса эффективное управление знаниями превращается в критически важное конкурентное преимущество. Этот процесс не только способствует развитию предприятия, но и помогает сотрудникам работать с большими массивами информации, что обусловлено рядом факторов: 1) современные информационные технологии предоставили организациям доступ к колоссальным массивам данных (как внутренним, так и внешним), из-за чего поиск релевантной информации для принятия управленческих решений стал сложной задачей; 2) в условиях высокой динамики внешней среды знания стремительно устаревают, что вынуждает компании оперативно находить и внедрять актуальные сведения; 3) многие организации приходят к пониманию, что просчеты и недостаточная осведомленность в ключевых вопросах способны привести к критическим последствиям [1]. Нередко провалы обусловлены отсутствием продуманной системы интеграции знаний или неоправданной переоценкой потенциала ИТ-решений. Следует принимать во внимание низкий уровень компетенций в сфере управления знаниями, характерный для российских компаний.

Для оптимизации указанных показателей применяют разнообразные инструменты и методики управления знаниями. Среди них особого внимания заслуживает метод картирования знаний, который можно считать ключевым. Таким образом, основной целью исследования является разработка подхода к построению экосистемы знаний для энергетических организаций, основанного на обосновании выбора и адаптации выбранных методов картирования знаний. Новизна работы заключается в: 1) комплексном подходе к картированию знаний, интегрирующем целевой и онтологический подходы; 2) интеграции оценки неявных знаний и компетенций сотрудников; 3) создании веб-инструмента для

визуализации карт знаний; 4) анализе результатов не только по знаниям, но и по компетенциям.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности использования интеллектуальных ресурсов и преодоления низкого уровня профессиональной грамотности в управлении знаниями в российской энергетике.

В первой части работы рассмотрена проблема управления знаниями, выявлены и определены виды знаний в научных организациях, исходя из концепции жизненного цикла знаний и приведены различные модели генерации знаний. В методологической части описаны инструменты выявления и подготовки данных для картирования знаний, рассмотрены подходы к картированию знаний, отличающиеся не только концептуально, но и размерами сфер применимости. Работа завершается практическим примером картирования знаний, реализованном в отделе Систем искусственного интеллекта в энергетике ИСЭМ СО РАН.

**1. Управление знаниями и экосистема знаний: концептуальные основы.** Современная концепция управления знаниями (УЗ) включает широкий спектр определений: от базовых («систематизация информации и знаний организации») до профессиональных трактовок, разработанных экспертами Gartner Group: «УЗ – это система, которая предполагает интегрированный подход к поиску, сбору, оценке, восстановлению и распространению всех информационных активов предприятия. В состав таких активов могут входить базы данных, документы, политики, процедуры, а также знания и опыт отдельных работников, которые ранее не фиксировались» [2].

Оба определения носят ярко выраженный организационный характер, что объясняется историческими корнями систем управления знаниями, зародившихся в корпоративной среде. По своей сути, такие системы направлены на аккумулирование и систематизацию знаний сотрудников с последующим их распространением внутри коллектива. Обобщая приведенные трактовки, можно дать следующее определение: управление знаниями представляет собой комплекс процессов, регулирующих генерацию, обработку, распространение и применение знаний в рамках организации.

**1.1. Эволюция подходов к управлению знаниями.** Экосистемы знаний рассматривают, как новый подход к управлению знаниями. В отличие от традиционных методов, экосистема знаний предполагает создание самоорганизующейся среды, где взаимодействие участников (сотрудников, ИТ-систем, данных) стимулирует генерацию инноваций. Подход к разработке "экосистемы знаний" – это путь к реализации осмысленного управления знаниями, направленный на развитие взаимодействий между участниками обмена (агентами), упрощение принятия решений и продвижение инноваций посредством развития сотрудничества между агентами [3, 4].

Понятия экосистемы знаний и подходы к их построению в области энергетики рассматривались авторами в [5-7]. В общем случае экосистемы знаний определяют, как «организации, состоящие из различных акторов, объединенных совместным поиском ценных знаний, и в то же время обладающих независимой деятельностью за пределами экосистемы знаний» [8-10]. Специалисты, разрабатывающие экологический подход к управлению знаниями, иногда обращаются к теории сложных адаптивных систем.

Как и в естественных экологических системах, экосистемы знаний имеют входы, выходы и промежуточные этапы преобразования объекта. Объекты взаимодействуют со своей средой, в которой множество уровней интегрированы в единую экосистему [11].

Экосистемы знаний включают взаимосвязанные ресурсы знаний, базы данных, сервисы для работы с ними и экспертов. Оперативный характер получения знаний с помощью информационных систем и других сервисов получения знаний позволяет им быстро переходить от одного фрагмента к другому. В некоторых ситуациях сотрудники могут учиться

и работать одновременно. Выделяются основные компоненты экосистемы знаний: технологическое ядро; критические взаимосвязи; инструменты и агенты знаний; исполнительные действия [12].

При построении экосистемы знаний могут быть востребованы не только знания, но и сведения о специалистах, владеющих этими знаниями, а также их компетенциях, определить которые помогает картирование знаний.

**1.2. Связь экосистемы знаний с картированием знаний.** Картирование знаний – это метод решения ряда организационных задач для отображения областей знаний, ролей, компетенций или стратегических потребностей и бизнес-процессов организации через построение карты знаний. Карта знаний представляет собой эффективный инструмент визуализации мыслительных процессов и систематизации информации, помогающий структурировать большие объемы информации.

Согласно международным стандартам APQC (American Productivity & Quality Center), цифровые карты знаний преследуют три ключевые цели: 1) идентифицировать, сохранять и передавать критически важные знания и экспертный опыт; 2) разрабатывать стратегии совершенствования процессов управления знаниями; 3) унифицировать и последовательно внедрять лучшие практики.

Инициатива по созданию карт знаний, как правило, исходит от руководящего состава – директоров или функциональных менеджеров. Это объясняется их ответственностью за организацию рабочих процессов, внутренний контроль и распределение обязанностей. Руководители, отвечающие за стратегическое развитие и кадровую политику в своих направлениях, способны наиболее точно выявлять компетентностные дефициты, для анализа которых и применяется метод картирования знаний. Обычно проводится картирование как явных, так и неявных знаний [13].

**1.3. Виды знаний.** Среди работ зарубежных ученых существенно выделяется подход И. Нонака, Х. Такеучи [14], с появлением которого теме управления знаниями в ее современной форме стало уделяться пристальное внимание (например, [15]). Выделяют два типа знаний: явные и неявные.

Неявные знания глубоко персонифицированы и контекстно зависимы. Их сложно формализовать и передать через вербальное или письменное выражение, поскольку они не поддаются точной фиксации языковыми или математическими средствами. Эти знания включают ментальные схемы, ценностные ориентации, убеждения и неосознаваемые предпосылки. Как отмечает К. Далкир, степень их неявности относительна: то, что один индивид может легко вербализировать, для другого останется трудно формулируемым – одни и те же знания могут быть явными для одних и неявными для других. [16].

Неявные знания представляют собой личный багаж профессиональных умений, концепций и опыта, который сложно формализовать и транслировать другим. Они включают комплексные, фрагментарные и преимущественно интуитивные познания, сформировавшиеся в сознании носителей как уникальное понимание. Для компании такие знания образуют ценный организационный капитал, играющий ключевую роль в инновационном развитии. Их грамотное применение способно значительно улучшить качество принимаемых решений и точность выполнения рабочих операций.

Главная сложность работы с этим типом знаний связана с необходимостью их предварительной вербализации для передачи, то есть перевода из неявных в явные. Часто организации не в полной мере осознают ценность неявных знаний и неэффективно их используют, что делает критически важным процесс выявления их носителей. Согласно исследованиям, около 60% рабочей информации формируется через неформальное взаимодействие – случайные беседы, обмен историями, наставничество, обучающие

мероприятия и профессиональные дискуссии. Особенно продуктивными оказываются спонтанные творческие обсуждения, возникающие в атмосфере открытого обмена идеями и практическим опытом.

Явные же знания определяются как легко кодирующаяся, передающаяся и распространяющаяся информация внутри предприятия. Чаще всего явные знания – это техническая или академическая информация. Этот вид знаний легко передается с помощью печатных и электронных средств, поэтому их часто называют формализованными знаниями. Таким образом выделяют два вида знаний: явные (формализованные) знания и неявные (неформализованные) знания [17].

**2. Методология картирования знаний.** Эффективное картирование знаний требует индивидуального подхода к каждой организации, что предполагает предварительное выявление всех заинтересованных групп, которые могут извлечь пользу из использования карт знаний. Эти группы можно классифицировать на три основные категории: 1) руководящий состав (администрация компаний или научных учреждений); 2) специалисты и рядовые сотрудники, в том числе новички; 3) внешние контрагенты (включая потенциальных пользователей создаваемой экосистемы знаний) [18].

Для каждой из этих категорий разрабатываются специализированные форматы визуализации карт знаний, соответствующие их специфическим потребностям. В зависимости от целевой аудитории меняется и содержание картирования: 1) руководителям необходим стратегический обзор организационных активов и выявление точек роста на макроуровне; 2) экспертам требуется детализированная информация по их профессиональной сфере; 3) рядовым (особенно новым) сотрудникам важно понимать, какими знаниями обладают их коллеги [19]. В университетской среде эти роли распределяются следующим образом: административный персонал (менеджеры); научные сотрудники и преподаватели, включая аспирантов (эксперты и рядовые работники). Ключевым аспектом при разработке карт знаний является обеспечение их доступности и информационной ценности для каждой из указанных групп пользователей [20].

**2.1. Целевой подход.** В первую очередь рассмотрим подход к картированию знаний, составленный на основе материалов APQC [21]. Этот подход предполагает, что приоритеты предприятий уже сформированы, риски определены. Чаще всего этот вариант используется, когда уже есть четкое представление о необходимости документирования конкретных экспертных знаний и опыта и требуется картирование знаний по критически важным областям. Процесс картирования в рамках этого подхода представлен в таблице 1.

**2.2. Комплексный подход.** Вторым будет рассмотрен подход к картированию знаний, предлагающий определенные стратегические преимущества. Данный подход отличается преимуществами относительно целевого подхода за счет следующего: 1) расширенное представление о рисках и узких местах; 2) взаимозависимости и активы знаний, которые актуальны для текущих групп; 3) более широкий взгляд на актуальность и необходимость подходов УЗ определенной организации.

Важно учитывать, что комплексное картирование знаний является ресурсоемким процессом, требующим существенных временных затрат. Ярким примером служит опыт компании Transpetro, где составление карт для трех основных бизнес-направлений заняло полтора года.

Эффективной стратегией поэтапного внедрения комплексного подхода может стать первоочередная разработка целевых карт с последующим переходом к комплексным решениям. Так, компания Goodyear начала с фокусного картирования экспертных знаний более десяти лет назад и лишь недавно приступила к реализации комплексной системы картирования в рамках технологических процессов [22].

**Таблица 1.** Процесс картирования, составленный на основе материалов APQC

| | Шаг | Результаты работ | Цель | Участники |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Проведение глубинных интервью | Перечень ключевых областей знаний для картирования | Сфокусировать процесс картирования | Эксперты, команда управления знаниями (УЗ) |
| 2 | Оценка рисков | Матрица рисков утраты знаний | Приоритизировать области знаний по: вероятности потери знаний и величине последствий | Руководители, специалисты HR, команда УЗ |
| 3 | Проведение картирования | Карта знаний | Формализовать знания с самым высоким риском | Команда УЗ, эксперты |
| 4 | Разработка плана передачи знаний | Методология и план-график передачи знаний | Гарантировать, что знания эксперта будут сохранены и распространены | Команда УЗ, руководители, |
| 5 | Выполнение плана | Ежемесячные отчеты о ходе выполнения работ по передаче знаний | | Исполнители мероприятий |

Современный комплексный подход к картированию знаний сформировался как синтез ранее описанных методик и практического опыта Transpetro, задокументированного APQC. Предлагается использовать комплексный подход, объединяющий: целевой подход, фокусирующийся на критических областях знаний; и онтологическое моделирование, направленное на создание итеративной структуры знаний с учетом специфики энергетики. Предлагаемый подход иллюстрируется рис. 1 [22].

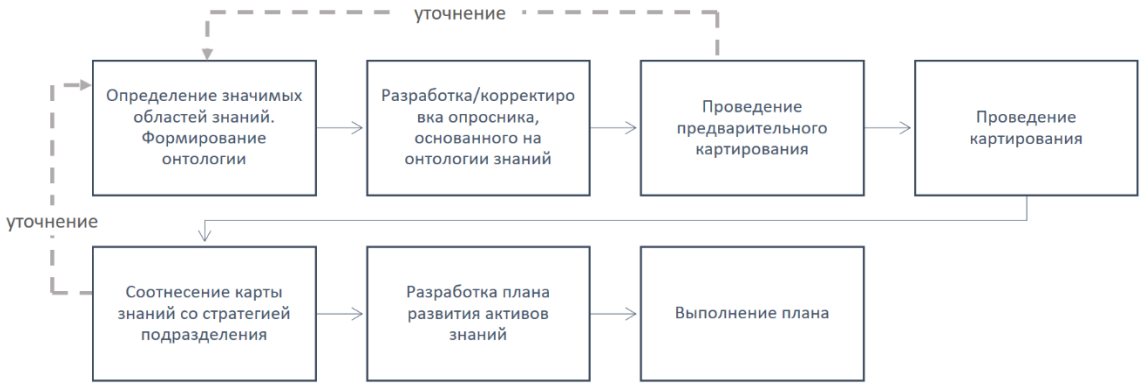



**Рис. 1.** Процесс комплексного подхода к картированию знаний в наукоёмкой организации

Нетрудно заметить, что процессы определения значимых областей и формирования онтологий происходят итеративно совместно с экспертами, что позволяет учитывать неявные знания.

Ключевые сложности при применении целевого и комплексного подходов к картированию знаний связаны с разнородностью источников информации и предметных областей. Основная проблема заключается в отсутствии стандартизации форматов представления знаний. Эта неоднородность выражается в том, что разные массивы знаний имеют различную степень детализации – от общих функциональных описаний до глубоко проработанных таксономий с многоуровневой структурой.

Для решения этой проблемы используется итеративный подход к разработке онтологии, включающий следующие этапы:

1. Первоначальный сбор данных и создание пробной версии.

2. Совместная работа с экспертами по уточнению и расширению категорий.
3. Экспертная обработка собранных знаний, включающая:
   a. унификацию терминологии (устранение синонимов и англицизмов);
   b. проверку полноты охвата;
   c. согласование уровня детализации;
   d. интеграцию с онтологической структурой.

На следующем этапе онтология проходит проверку и доработку в процессе сбора дополнительных данных. Респонденты могут предлагать новые термины и оставлять комментарии, что позволяет выявлять ранее неучтенные области знаний.

Для задач Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН), который представляют авторы, был выбран комплексный подход, поскольку в отношении картирования знаний он имеет ряд существенных преимуществ перед целевым подходом, которые были перечислены ранее. Однако важно отметить, что комплексный подход требует значительно больше ресурсов и времени, поскольку включает в себя итеративную реализацию, но за счет более глубокого понимания примерной структуры онтологии знаний в Институте, количество итераций может быть незначительно. Таким образом, комплексный подход является более эффективным в долгосрочной перспективе, так как обеспечивает более глубокое понимание структуры знаний в организации и позволяет более эффективно управлять ими на стратегическом уровне.

**2.3. Оценка знаний организации.** Оценивание системы управления знаниями затруднено в силу их нематериального характера. При этом в специальной литературе представлены различные комплексные подходы к оценке таких систем в организациях. Перечислим основные модели оценки управления знаниями в организации, существующие на данный момент:

(1) Сбалансированная система показателей Р.Каплана и Д. Нортона. Одна из наиболее эффективных, адаптированных и широко используемых различными организациями моделей для управления знаниями, которые являются основным инструментом в установлении целей разного характера. Приведем фрагмент анкеты в таблице 2 для определения удовлетворенности культурой знаний сотрудников [22].

**Таблица 2.** Фрагмент анкеты

| Номер п/п | Вопрос | Варианты ответов |
|---|---|---|
| 1 | Удовлетворяют ли вас имеющиеся возможности повышения квалификации? | 1) Да;<br>2) Нет;<br>3) Затрудняюсь ответить. |
| 2 | Выгодно ли для вас делиться своими профессиональными знаниями с коллегами? | 1) Да;<br>2) Нет;<br>3) Затрудняюсь ответить. |
| 3 | Содействует ли ваш непосредственный руководитель развитию ваших профессиональных компетенций? | 1) Да;<br>2) Нет;<br>3) Затрудняюсь ответить. |
| 4 | Удовлетворяет ли вас имеющиеся возможности коммуникаций с параллельными службами предприятия по поводу совершенствования бизнес-процессов? | 1) Да;<br>2) Нет;<br>3) Затрудняюсь ответить. |

(2) Модель, представленная в работе Будлянской, используемая для управления интеллектуальными ресурсами интегрированных промышленных корпоративных структур. Предложенная система оценки основана на анализе степени интеграции подходов кодификации и персонализации знаний. Модель позволяет классифицировать компании по

уровню применения методов управления знаниями, используя трехбалльную шкалу: 0 баллов – метод не применяется или отсутствуют данные о его использовании; 0,5 балла – технология находится в процессе внедрения; 1 балл – активное применение метода в корпоративной практике. Итоговый показатель представляет собой среднее значение по каждой методике, отражающее интенсивность ее использования [23].

(3) Модель Буковича-Уильямса представляет собой инструмент оперативной оценки уровня зрелости системы управления знаниями на различных этапах жизненного цикла корпоративных знаний. В основе методики лежит специализированный опросник, созданный экспертами PricewaterhouseCoopers. Данный инструмент использует кумулятивную шкалу оценки, позволяющую определить интегральный показатель зрелости системы управления знаниями, который отражает степень ее развития и результативности. Эта модель оценки предлагает порядка 20 вопросов на каждом этапе жизненного цикла знаний [24].

Для задач ИСЭМ СО РАН на данном этапе была выбрана модель, рассматриваемая Будлянской. Эта модель была выбрана за счет своей простоты в оценке, легкой интеграции в любые оценочные суждения, а также в силу простоты интерпретации результатов. При этом данная модель была адаптирована под типы оценок, выбранных в ИСЭМ СО РАН.

**3. Результаты и обсуждение: применение картирования знаний на примере научного отдела ИСЭМ СО РАН.** Путем круглых столов и мозговых штурмов сотрудниками отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике ИСЭМ СО РАН было решено определять совокупность экспертных знаний сотрудников, как зафиксированных, так и не зафиксированных на корпоративных материальных и нематериальных носителях. Другими словами, знания сотрудников существуют как в неявном виде, так и в документах, которые уже где-либо хранятся. Важной особенностью анализа результатов картирования знаний в этом случае является то, что выполняется анализ не только знаний, но и компетенций. Компетенция определяется, как интегральная способность, включающая в себя знания, навыки и ценностные установки сотрудника. Важность определения компетенции сотрудника состоит в том, что сотрудники с одинаковым количеством и качеством знаний могут по-разному выполнять поставленные им задачи с разным к.п.д. (навыки: Как мы применяем эти знания?), с разной безопасностью (установки: Зачем? Почему? В каких условиях я это делаю?). Также было решено рассматривать знания в двух видах: как явные, так и неявные. Неявные знания – это неформализованные и недокументированные знания, явные знания – это отчеты и публикации. Для понимания взаимодействия сотрудников организации со знаниями была предложена следующая структура (рис. 2).

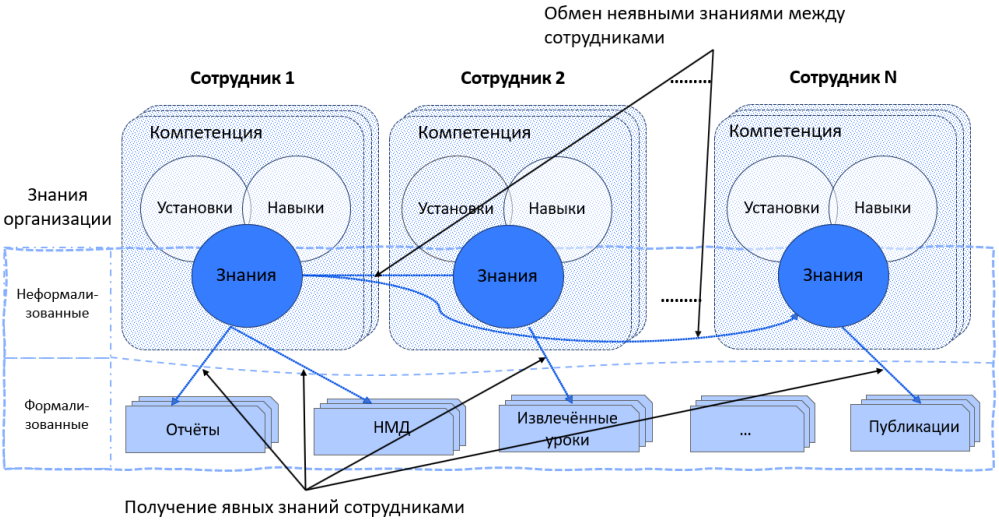



**Рис. 2.** Структура компетенций и знаний, предложенная ИСЭМ СО РАН

**3.1. Этапы внедрения.** Картирование знаний выполнялось совместно с сотрудниками отдела летом 2024 года. Взаимодействие сотрудников происходит с веб-приложением, разработанным специально для задачи развития экосистемы знаний. На данном этапе сформирована часть сервиса по оценке неявных знаний. Для оценивания неявных знаний сотрудниками отдела вместе с его руководителем был разработан опросник, с условием, что все личные данные остаются анонимными. Шапка опросника, реализованного в виде веб-приложения, представлена на рисунке 3.

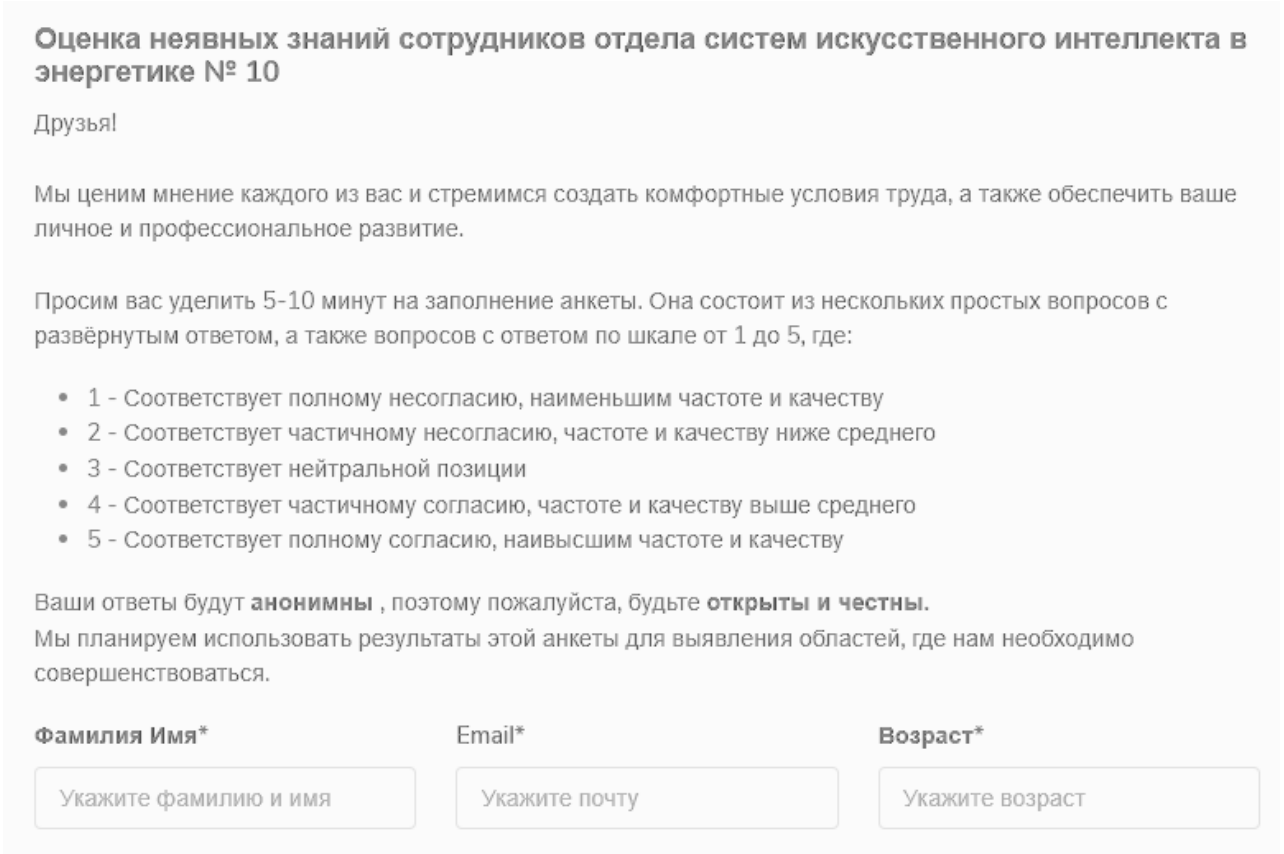



**Рис. 3.** Интерфейс веб-приложения опросника

Опрос состоял из двух этапов. На первом этапе сотрудники определяли значимые сферы для решения их исследовательских задач и при помощи самооценивания выбирали уровень знаний (рис. 4-5). Шкала уровня знаний состоит из следующих степеней (от наименьшего к наибольшему): базовый, начальный, квалифицированный, профессиональный, экспертный. Определение значимых сфер осуществлялось по двум классификаторам, которые дополняют друг друга путем сужения значимой сферы для сотрудника (классификаторы разработаны в отделе: первый связан с классификацией технологий и предметных областей, второй – с классификацией методов, которыми владеют сотрудники).

Второй этап опроса реализуют три раздела вопросов по оцениванию психологического климата в отделе, знаниевого аспекта, мотивационного аспекта. Вопросы по оцениванию климата отдела помогают определить, к кому сотрудник обращается за советом, насколько эффективно передается информация внутри отдела, открытость отдела и руководства к обсуждению вопросов. Вопросы по оцениванию климата в отделе представлены на рисунке 6.

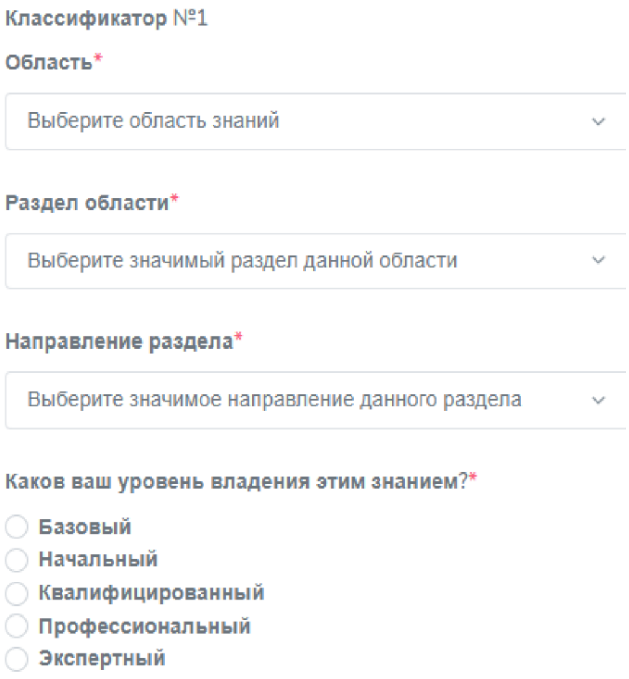



**Рис. 4.** Интерфейс оценки технических дисциплин по первому классификатору

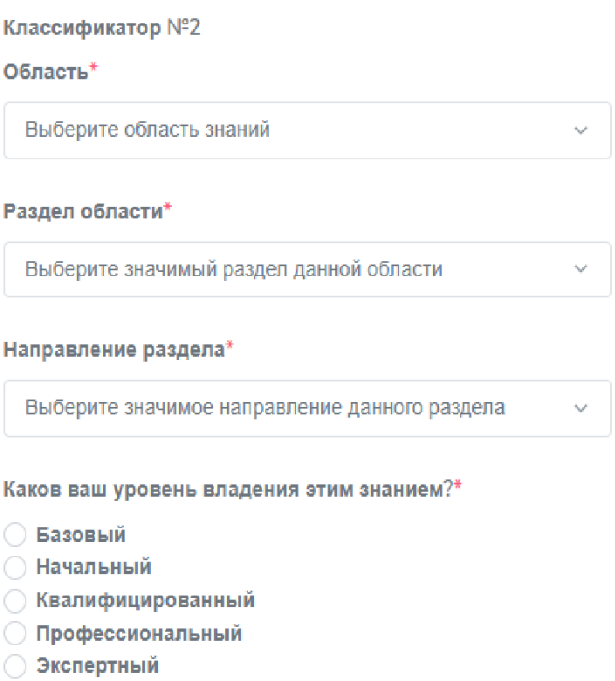



**Рис. 5.** Интерфейс оценки технических дисциплин по второму классификатору

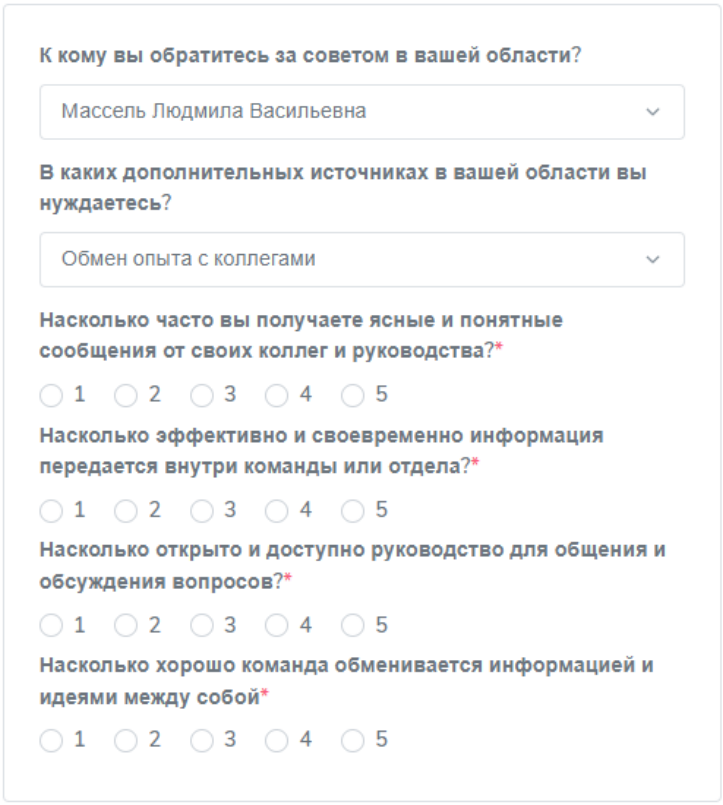



**Рис. 6.** Раздел интерфейса оценки опроса для определения климата в отделе

Следующими после вопросов для оценки климата в компании идут вопросы по знаниевому аспекту, оценивается готовность фиксировать знания и делиться ими, можно ли найти знания во внешних документах, во внутренних и т.д. (рис. 7).

Последним разделом опроса является список вопросов, помогающий сформировать понимание состояния мотивации в отделе: оценка вовлеченности в рабочие задачи и проекты, признание и уважение другими сотрудниками отдела, желание развивать новые навыки и возможность развития этих навыков (рис. 8).

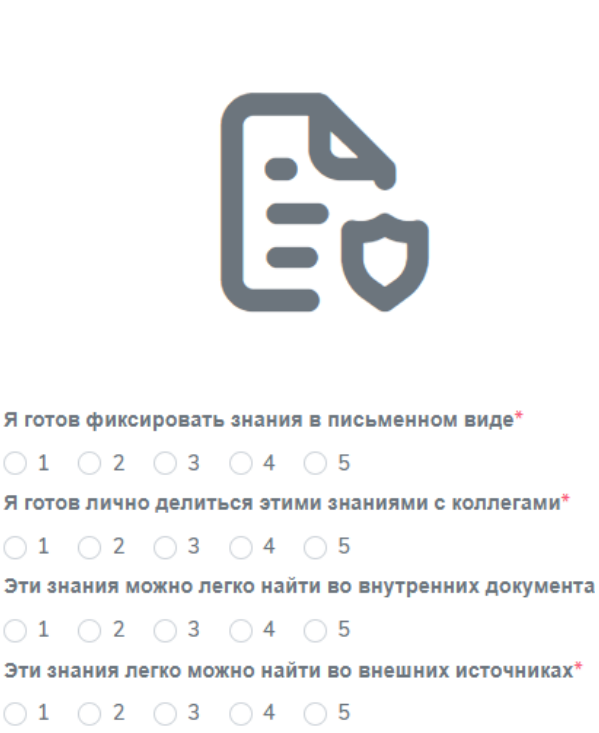



**Рис. 7.** Раздел интерфейса оценки опроса для определения знаниевого аспекта

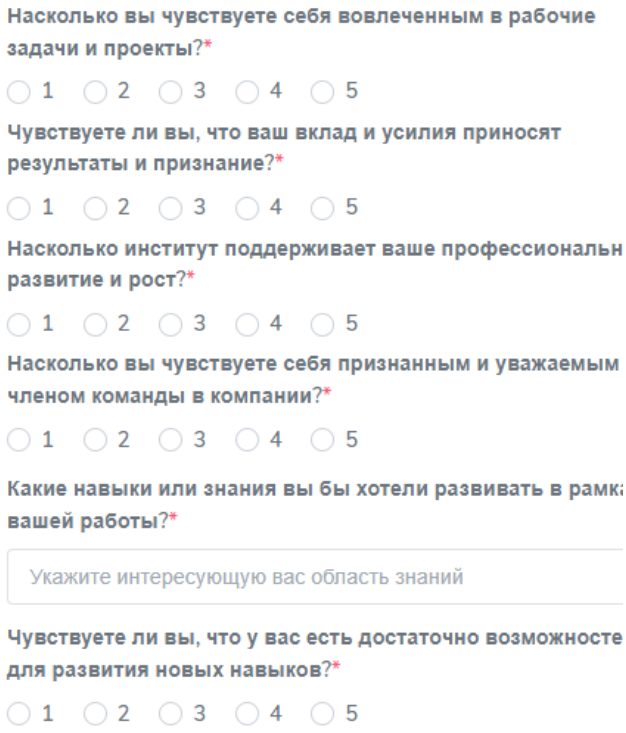



**Рис. 8.** Часть интерфейса оценки опроса для уровня мотивации

**3.2. Обсуждение результатов.** Результатом картирования стало построение ряда визуальных представлений. Первая часть представлена в виде количественных оценок уровней владения знаниями по двум классификаторам и три количественные оценки: климата коллектива, мотивации, передачи знаний (рис. 9).

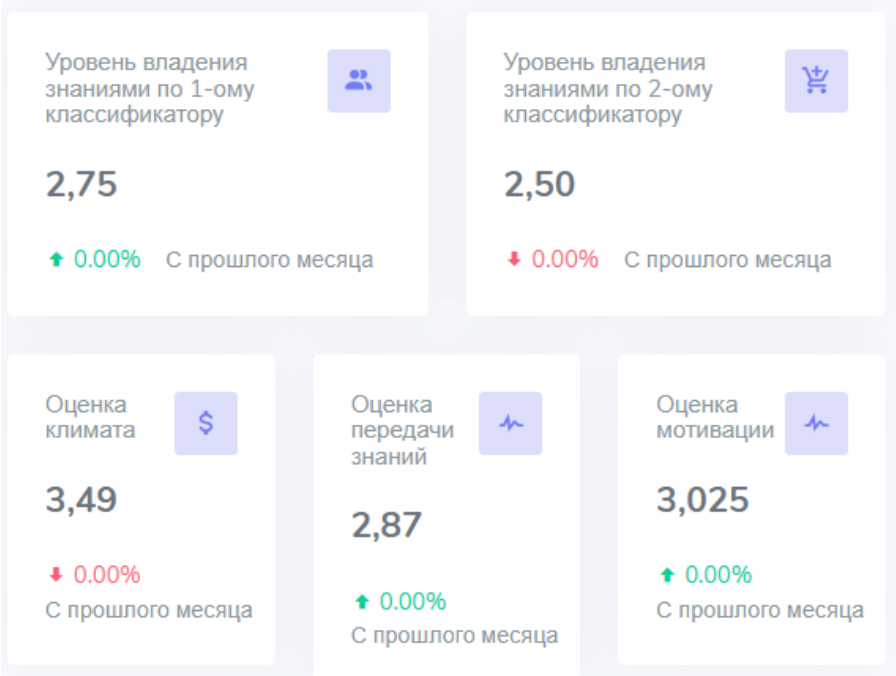



**Рис. 9.** Интерфейс количественных оценок отдела

Следующими, но не менее важными, являются оценки превалирующей области знаний по двум упомянутым выше классификаторам. Так, нетрудно заметить, что оценка по первому классификатору показывает лидерство «Информационных технологий» в отделе среди значимых сфер (рис. 10).

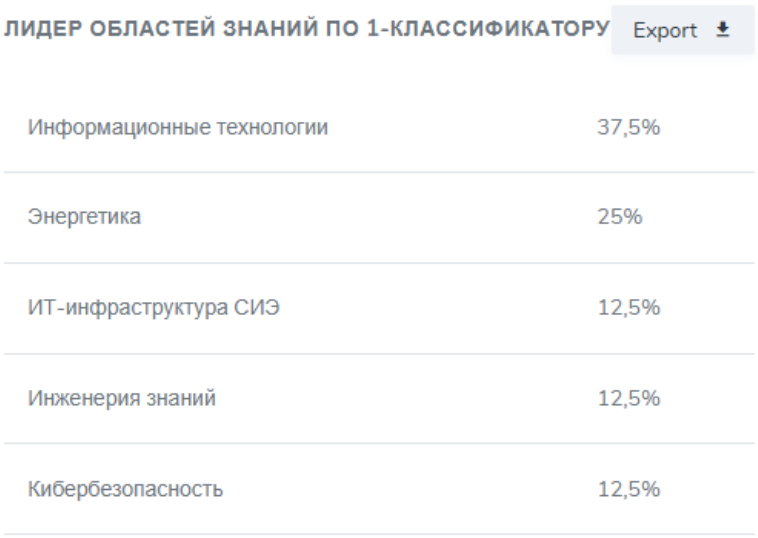



**Рис. 10.** Лидеры значимых сфер внутри 10 отдела

Заключительная карта – значимости и важности референтов. На ней показаны референты, к которым чаще всего обращаются сотрудники 10 отдела. Не трудно заметить, что здесь присутствует три лидера мнений – три основных эксперта (рис. 11).

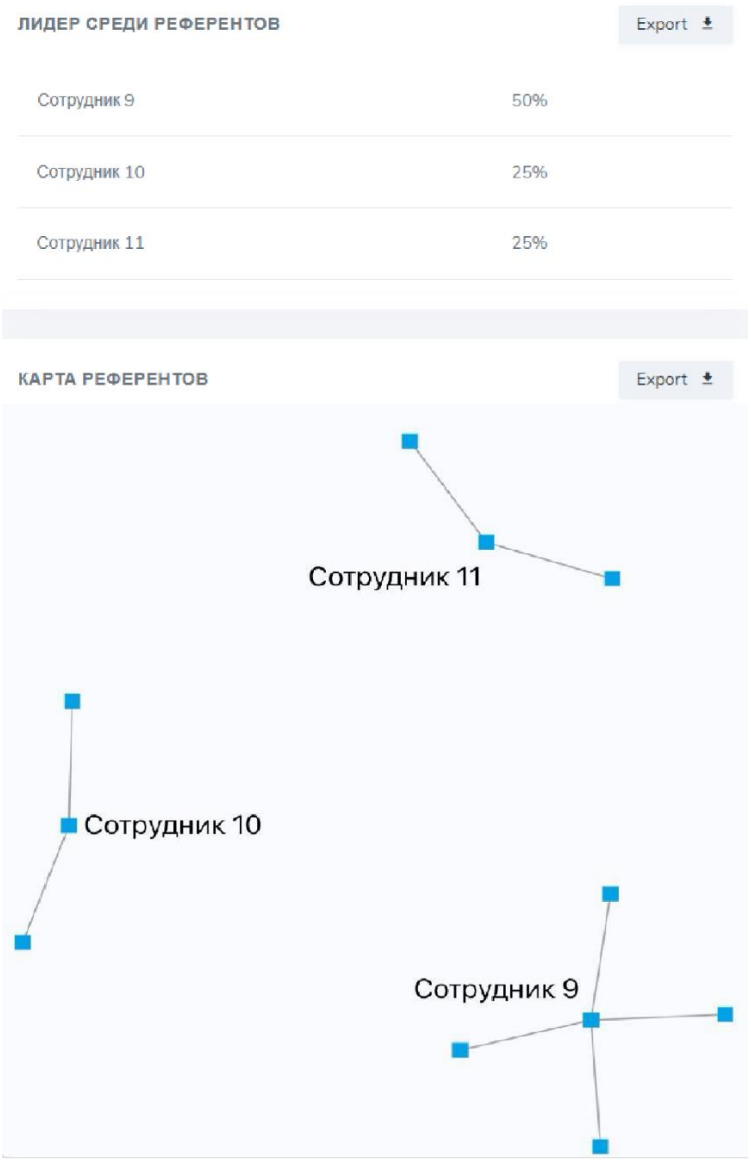



**Рис. 11.** Карта экспертов отдела 10

Представленная карта знаний позволяет принимать обоснованные управленческие решения, в частности: определять сотрудников, которым требуется наставничество и развитие конкретных компетенций; привлекать наиболее опытных специалистов; разрабатывать стратегию персональной передачи знаний.

**Заключение.** Выполнен аналитический обзор существующих методов картирования знаний и моделей оценки знаний, обоснован выбор используемых в работе. В статье рассмотрен подход к построению экосистемы знаний, в качестве одного из инструментов которого предлагается картирование знаний. Используемый метод картирования знаний в сочетании с анализом по компетенциям демонстрирует значимость следующих факторов:

1. Вклад в теорию управления знаниями. Предложен комплексный подход, сочетающий в себе онтологии, оценку явных и неявных знаний, оценку компетенций и инструменты визуализации. Это расширяет методологическую базу исследований в области экосистем знаний, особенно для энергетического сектора.
2. Практическая ценность. Метод применим не только в энергетике, но и в других наукоемких отраслях (машиностроение, IT), где критически важны управление компетенциями и минимизация риска утечки знаний. Внедрение веб-приложения позволит сократить время анализа данных, а выявление ключевых экспертов позволит оптимизировать распределение задач.
3. Перспективы для организаций. Результаты исследования позволят организациям формировать стратегии развития персонала на основе объективных данных.

Выполнено картирование знаний на примере одного из научных отделов ИСЭМ СО РАН, который рассматривается, как ключевой актор проектируемой экосистемы знаний в энергетике. Были получены следующие результаты: получение дополнительной информации для оптимизации процессов управления знаниями; выявление «узких мест» в компетенциях сотрудников; повышение прозрачности интеллектуальных активов организации.

Предполагается дальнейшее развитие этой работы и тиражирование предложенного подхода применительно к другим отделам ИСЭМ СО РАН, а также интеграция с AI-алгоритмами для создания самообучающейся экосистемы знаний и внедрения автоматизированных систем оценки навыков сотрудников для оптимизации проблемы «самооценки сотрудников».

Таким образом, работа вносит вклад как в академическую дискуссию об управлении знаниями, так и в практику повышения эффективности наукоемких организаций.

## Список источников

1. Гаврилова Т.А. Управление знаниями с российским акцентом: победы и поражения / Т.А. Гаврилова, А.И. Алсуфьев, Л.О. Кокоулина // Инновации, 2017. – №1 (219). – С. 59-69.
2. Прохоров А.И. Современные тенденции управления знаниями в организации // Общество: социология, психология, педагогика. 2023. – № 7. – С. 21-25. – DOI:10.24158/spp.2023.7.2.
3. Shrivastava P. Knowledge ecology: knowledge ecosystems for business education and training, 1998.
4. Bray D.A. Knowledge Ecosystems: a theoretical lens for organizations confronting hyperturbulent environments. OAI, 2007.
5. Массель Л.В. Экосистема знаний как развитие и специализация цифровой экосистемы / Л.В. Массель // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии–2023». Научное издание в 2-х томах. Т.2. – Таганрог: Издатель Ступин С.А., 2023. – С. 155-164.
6. Массель Л.В. Построение экосистемы знаний на основе ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике / Л.В. Массель, А.Г. Массель // Вестник Югорского университета, 2023. – №4. – С. 78- 87. – DOI:10.18822/byusu20230478-87.
7. Массель Л.В. Экосистема знаний как инновационный подход к управлению знаниями. / Л.В. Массель, А.Г. Лезин // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии». Научн. изд. в 2-х т. Т.I. – Таганрог: Изд. Ступина С.А., 2024. – С. 93-94.

8. Bathelt H., Cohendet P. The Creation of knowledge: local building, global accessing and economic development-toward an agenda. J. Econ. Geogr, 2014, vol. 14, pp. 869-882, DOI:10.1093/jeg/lbu027.
9. Scaringella L., Radziwon A. Innovation, entrepreneurial, knowledge, and business ecosystems: Old wine in new bottles? Technol. Forecast. Soc. Chang. 2018, 136, pp. 59-87, DOI:10.1016/j.techfore.2017.09.023.
10. Valkokari, K. Business, innovation, and knowledge ecosystems: how they differ and how to survive and thrive within them. Technol. Innov. Manag. Rev., 2015, 5. pp. 17-24.
11. Robertson J. Competition in knowledge ecosystems: a theory elaboration approach using a case study. Sustainability, 2020, vol. 12, DOI:10.3390/su12187372.
12. Bahrami H., Evans S. The research laboratory: silicon valley's knowledge ecosystem. Super-flexibility for knowledge enterprises, Springer, 2005.
13. Гаврилова Т.А. Картирование знаний для вуза: анализ подходов и пример использования / Т.А. Гаврилова, А.В. Кузнецова, Э.Я. Гринберг //Открытое образование, 2024. – №28(3). – С. 12-24. – DOI:10.21686/1818-4243-2024-3-12-24.
14. Нонака И. Компания – создатель знания: зарождение и развитие инноваций в японских фирмах / И. Нонака, Х. Такеучи пер. с англ. – Москва: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2011. –366 с.
15. Тузовский А.Ф. Системы управления знаниями (методы и технологии) / А.Ф. Тузовский, С.В. Чириков, В.З. Ямпольский. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.
16. Dalkir K. Knowledge management in theory and practice. London: Routledge, 2005, 368 p. DOI:10.4324/9780080547367
17. Пушкарева Т.П. Применение карт знаний для систематизации математической информации / Т.П. Пушкарева // Мир науки, культуры, образования, 2011. – № 2 (27). – С. 139-144.
18. Мирошников В.В. Управление знаниями в системах качества промышленных предприятий / В.В. Мирошников, О.А. Горленко, В.П. Федоров, и др. // Транспортное машиностроение, 2017. №8 (61). С. 49-53.
19. Гаврилова, Т.А. Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге / Т.А. Гаврилова, Э.В. Страхович // Онтология проектирования, 2020. – Т. 10. – №1(35). – С.87-99. – DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
20. Антюхов В.И. Моделирование процесса интеллектуальной поддержки деятельности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России при принятии управленческих решений/ В.И. Антюхов, Н.В. Остудин // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2017. – С. 78-91.
21. Гаврилова Т.А. Визуализация компетенций сотрудников с помощью карт знаний / Т.А. Гаврилова, А.В. Кузнецова, О.Н. Алканова, и др. // Российский журнал менеджмента, 2024. – № 22 (1). – С. 86–112 DOI:10.21638/spbu18.2024.104.
22. Гринберг Э.Я. Разработка и апробация методики картирования знаний наукоемкой организации / Э.Я. Гринберг, Е.А. Верзин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С. 148-159. – DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.013.
23. Будлянская Д. Анализ современных методов и форм организации управления знаниями в российских интегрированных промышленных корпоративных структурах / Д. Будлянская // Экономический анализ: теория и практика, 2015. – № 27.– С. 42-52.
24. Букович У. Управление знаниями: руководство к действию / У. Букович, Р. Уилльямс Пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 2002. 500 с.

***Массель Людмила Васильевна.*** *Доктор технических наук, профессор, зав. отделом Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 8466, SPIN: 3757-0830, Scopus AuthorID: 56440157300, ORCID: 0000-0002-9088-9012, massel@isem.irk.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.*

***Лезин Александр Геннадьевич.*** *Инженер-исследователь, аспирант отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 1305686, SPIN: 8757-7078, lag071999@mail.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.*

UDC 004.8:620.9
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.005

# Knowledge mapping as one of the tools for building a knowledge ecosystem in the energy sector

**Alexander G. Lezin, Liudmila V. Massel**

L.A. Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *lag071999@mail.ru*

**Abstract.** Currently, the global community is showing significant interest in the field called "Knowledge management". Research on this topic is also being carried out in Russia, but not as actively as abroad. Great importance in this research are the issues of developing methods and tools for knowledge management in the knowledge ecosystem. One of the fragments of the knowledge ecosystem can be not only knowledge, but also information about specialists who possess this knowledge, as well as their competencies, which can be determined by knowledge mapping. The article proposes an approach to building a knowledge ecosystem for knowledge-intensive organizations in the energy sector based on knowledge mapping. The novelty of the research lies in the adaptation of a comprehensive knowledge mapping method with the integration of ontological modeling and the assessment of employee competencies. The practical significance of the work is confirmed by the approbation of the method in the Department of Artificial Intelligence Systems of the ISEM SB RAS, where key experts, development areas have been identified and knowledge management processes have been optimized.

**Keywords:** knowledge mapping, knowledge ecosystem, knowledge management, knowledge assessment, high-tech organization

## References

1. Gavrilova T.A., Alsufyev A.I., Kokoulina L.O. Upravleniye znaniyami s rossiyskim aktsentom: pobedy i porazheniya [Knowledge management with a russian accent: victories and defeats]. Innovatsii [Innovations], 2017, no. 1 (219), pp. 59-69.
2. Prokhorov A.I. Sovremennyye tendentsii upravleniya znaniyami v organizatsii [Modern trends of knowledge management in organizations]. Obshchestvo: sotsiologiya, psikhologiya, pedagogika [Society: sociology, psychology, pedagogy], 2023, no. 7, pp. 21-25, DOI:10.24158/spp.2023.7.2.
3. Shrivastava P. Knowledge ecology: knowledge ecosystems for business education and training, 1998.
4. Bray D.A. Knowledge Ecosystems: a theoretical lens for organizations confronting hyperturbulent environments. OAI, 2007.
5. Massel L.V. Ekosistema znaniy kak razvitiye i spetsializatsiya tsifrovoy ekosistemy [Knowledge Ecosystem as a Development and Specialization of a Digital Ecosystem]. Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa “Intellektual'nyye sistemy i informatsionnyye tekhnologii-2023” [Proceedings of the International scientific and technical congress "intelligent systems and information technologies-2023"]. Vol. 2, Taganrog: Izdately Stupin S.A., 2023, pp. 155-164.
6. Massel L.V., Massel A.G. Postroyeniye ekosistemy znaniy na osnove IT-infrastruktury sistemnykh issledovaniy v energetike [Building a Knowledge Ecosystem Based on the IT Infrastructure of System Research in Energy]. Vestnik Yugorskogo universiteta [Bulletin of Ugra university], 2023, no. 4, pp. 78-87, DOI:10.18822/byusu20230478-87.
7. Massel L.V., Lezin A.G. Ekosistema znaniy kak innovatsionnyy podkhod k upravleniyu znaniyami [Knowledge Ecosystem as an Innovative Approach to Knowledge Management]. Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa “Intellektual'nyye sistemy i informatsionnyye tekhnologii” [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress “Intelligent Systems and Information Technologies”]. Vol. I, Taganrog: Izd. Stupina S.A., 2024, pp. 93-94.
8. Bathelt H., Cohendet P. The Creation of knowledge: local building, global accessing and economic development-toward an agenda. J. Econ. Geogr, 2014, vol. 14, pp. 869-882, DOI:10.1093/jeg/lbu027.
9. Scaringella L., Radziwon A. Innovation, entrepreneurial, knowledge, and business ecosystems: Old wine in new bottles? Technol. Forecast. Soc. Chang. 2018, 136, pp. 59-87, DOI:10.1016/j.techfore.2017.09.023.
10. Valkokari, K. Business, innovation, and knowledge ecosystems: how they differ and how to survive and thrive within them. Technol. Innov. Manag. Rev., 2015, 5. pp. 17-24.
11. Robertson J. Competition in knowledge ecosystems: a theory elaboration approach using a case study. Sustainability, 2020, vol. 12, DOI:10.3390/su12187372.
12. Bahrami H., Evans S. The research laboratory: silicon valley's knowledge ecosystem. Super-flexibility for knowledge enterprises, Springer, 2005.

13. Gavrilova T.A., Kuznetsova A.V., Grinberg E.Ya. Kartirovaniye znaniy dlya vuza: analiz podkhodov i primer ispol'zovaniya [Knowledge mapping for a university: analysis of approaches and an example of use]. Otkrytoye obrazovaniye [Open education], 2024, vol. 28, no. 3, pp. 12-24, DOI:10.21686/1818-4243-2024-3-12-24.
14. Nonaka I., Takeuchi H. Kompaniya – sozdatel' znaniya: zarozhdeniye i razvitiye innovatsiy v yaponskikh firmakh [The knowledge-creating company: how japanese companies create the dynamics of innovation]. Moskva: ZAO "Olimp-Biznes" [Moscow: ZAO "Olimp-Biznes"], 2011, 366 p.
15. Tuzovsky A.F., Chirikov S.V., Yampolsky V.Z. Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii) [Knowledge management systems (methods and technologies)]. Tomsk: NTL Publishing House, 2005, 260 p.
16. Dalkir K. Knowledge management in theory and practice. London: Routledge, 2005, 368 p. DOI:10.4324/9780080547367
17. Pushkareva T.P. Primeneniye kart znaniy dlya sistematizatsii matematicheskoy informatsii [The use of knowledge maps for systematization of mathematical information]. Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya [World of science, culture, education], 2011, no. 2 (27), pp. 139-144.
18. Miroshnikov V.V., Gorlenko O.A., Fedorov V.P., et al. Upravleniye znaniyami v sistemakh kachestva promyshlennykh predpriyatiy [Knowledge management in the quality systems of industrial enterprises]. Transportnoye mashinostroyeniye [Transport engineering], 2017, no. 8 (61), pp. 49-53.
19. Gavrilova T.A., Strakhovich E.V. Vizual'no-analiticheskoye myshleniye i intellekt-karty v ontologicheskom inzhiniringe [Visual-analytical thinking and mind maps in ontological engineering]. Ontologiya proektirovaniya [Design ontology], 2020, vol. 10, no. 1(35), pp. 87-99, DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
20. Antyukhov V.I., Ostudin N.V. Modelirovaniye protsessa intellektual'noy podderzhki deyatel'nosti dolzhnostnykh lits tsentrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MChS Rossii pri prinyatii upravlencheskikh resheniy [Modeling the Process of Intellectual Support for the Activities of Officials of Crisis Management Centers of the Russian Emergencies Ministry in Making Management Decisions]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii [Bulletin of the Saint Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia], 2017, pp. 78-91.
21. Gavrilova T.A., Kuznetsova A.V., Alkanova O.N., et al. Vizualizatsiya kompetentsiy sotrudnikov s pomoshch'yu kart znaniy [Visualization of employee competencies using knowledge maps]. Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta [Russian management journal], 2024, vol. 22, no. 1, pp. 86-112, DOI:10.21638/spbu18.2024.104..
22. Grinberg E.Ya., Verzin E.A. Razrabotka i aprobatsiya metodiki kartirovaniya znaniy naukoyemkoy organizatsii [Development and testing of a methodology for knowledge mapping of a knowledge-intensive organization]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp. 148-159, DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.013.
23. Budlyanskaya D. Analiz sovremennykh metodov i form organizatsii upravleniya znaniyami v rossiyskikh integrirovannykh promyshlennykh korporativnykh strukturakh [Analysis of modern methods and forms of knowledge management organization in Russian integrated industrial corporate structures]. Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika [Economic analysis: theory and practice], 2015, no. 27, pp. 42-52.
24. Bukovich W., Williams R. Upravleniye znaniyami: rukovodstvo k deystviyu [The knowledge management fieldbook]. Moscow: INFRA-M, 2002, 500 p.

***Massel Liudmila Vasilievna.*** *D.Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 8466, SPIN: 3757-0830, Scopus AuthorID: 56440157300, ORCID: 0000-0002-9088-9012, massel@isem.irk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

***Lezin Alexander Gennadievich.*** *Research engineer, post-graduate student of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Industry, L. A. Melentiev Institute of Energy Systems SB RAS. AuthorID: 1305686, SPIN: 8757-7078, lag071999@mail.ru. 130 Lermontov Street, Irkutsk, Russia.*

*Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 24.08.2025.*

*The article was submitted 04/17/2025; approved after reviewing 06/25/2025; accepted for publication 08/24/2025.*

УДК 004.8:620.9
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.006

# Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности

**Массель Алексей Геннадьевич, Мамедов Тимур Габилович**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *amassel@isem.irk.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается методика интеграции когнитивного и математического моделирования для анализа направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с позиции энергетической безопасности. Предлагаемый подход позволяет формализовать и автоматизировать процесс перехода от качественного анализа угроз и мер противодействия им к количественной оценке их влияния на ТЭК с помощью оптимизационных моделей. В основе методики лежит использование онтологий для структуризации знаний предметной области, построение когнитивных карт для визуализации причинно-следственных связей и разработка реляционных баз данных для интеграции семантических и математических моделей. Применение данного подхода демонстрируется на примере вычислительного эксперимента, включающего моделирование угроз и оценку эффективности стратегий обеспечения энергетической безопасности. Результаты исследования могут быть использованы для принятия управленческих решений в условиях неопределённости и кризисных сценариев.

**Ключевые слова:** когнитивное моделирование, энергетическая безопасность, топливно-энергетический комплекс, онтологии, вычислительный эксперимент, оптимизационные модели.

**Цитирование:** Массель А.Г. Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3(39). – С. 61-71. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.006.

**Введение.** Современный топливно-энергетический комплекс (ТЭК) представляет собой сложную систему, функционирование которой подвержено множеству внутренних и внешних угроз. В условиях глобальной нестабильности и возрастающих рисков обеспечение энергетической безопасности (ЭБ) становится ключевой задачей государственной политики [1]. Для анализа таких сложных систем с высокой степенью неопределённости применяется когнитивное моделирование, позволяющее формализовать причинно-следственные связи между факторами и разрабатывать стратегии управления в условиях возмущений [2].

Когнитивные карты, представляющие собой ориентированные графы, широко используются для визуализации взаимосвязей между элементами системы [3, 4]. Однако для количественной оценки последствий реализации угроз и эффективности мер противодействия требуется интеграция когнитивных методов с методами математического моделирования. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН) для этих целей применяется программный комплекс ИНТЭК, основанный на использовании оптимизационных моделей балансов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Однако существующие модели не учитывают угрозы и мероприятия напрямую, что затрудняет анализ сценариев развития ТЭК в условиях кризисных ситуаций.

Целью данной работы является разработка методики интеграции семантического (когнитивного) и математического моделирования для исследования направлений развития ТЭК с учётом угроз энергетической безопасности. Основные задачи заключаются в формализации и структурировании предметной области за счет построения онтологий для ТЭК и угроз его функционированию; разработке когнитивных карт, связывающих качественные и количественные аспекты моделирования и формализации данных с помощью реляционных баз данных, и затем, проведении вычислительных экспериментов для оценки устойчивости ТЭК в различных сценариях.

Предлагаемый подход позволяет автоматизировать переход от качественного анализа к количественным расчётам, что снижает нагрузку на экспертов и ускоряет процесс принятия решений. В работе представлены алгоритмы формирования семантических моделей, методика проведения вычислительных экспериментов и примеры применения подхода для анализа конкретных угроз на примере выхода из строя части газопровода.

**Исследования направлений развития ТЭК с позиции ЭБ.** Исследованиями ТЭК в условиях возмущений занимается отдел энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН. Основная цель исследований в сфере энергетической безопасности государства заключается в научно обоснованном выборе приоритетных направлений, обеспечивающих стабильное и долгосрочное снабжение потребителей всеми необходимыми видами топливно-энергетических ресурсов [5]. Предлагаемые меры должны быть универсальными и эффективными в условиях различных негативных сценариев в экономике и энергетике. Кроме того, особое внимание уделяется разработке решений, гарантирующих бесперебойное энергоснабжение в чрезвычайных ситуациях.

В рамках этих исследований решаются следующие задачи: выявление возможных угроз и моделирование на их основе возмущающих сценариев, анализ состояния ТЭК при их реализации, выявление узких мест в энергоснабжении, оценка эффективности мер по их устранению и отбор наиболее надёжных стратегий обеспечения энергетической безопасности [6].

Из-за масштабности и сложности ТЭК невозможно проводить полноценные натурные эксперименты. Поэтому для изучения устойчивости и функционирования системы при различных условиях проводится серия вычислительных экспериментов. Их результаты служат основой для выбора оптимальных решений в управлении и планировании развития ТЭК.

Вычислительный эксперимент – это метод анализа технических систем и физических процессов с помощью математического моделирования и программной реализации математических моделей. Он предполагает создание модели, адекватно отражающей объект, и её численное исследование, что позволяет имитировать поведение системы при разных условиях. Здесь роль экспериментальной установки выполняет программный комплекс, а не физический объект, что повышает требования к качеству программного обеспечения, применяемого в научных исследованиях.

Одним из инструментов автоматизации выполнения вычислительного эксперимента является программный комплекс (ПК) ИНТЭК. Комплекс предназначен для анализа различных сценариев развития ТЭК с учётом угроз энергетической безопасности и помогает формировать стратегические решения, направленные на их предупреждение или снижение последствий. В конце 90-х гг. прошлого века новая версия ИНТЭК, с учетом предыдущих разработок, была создана А.Р. Ершовым [7], архитектуру «клиент-сервер» реализовал Е.А. Болдырев [8], следующую мультиагентную версию ИНТЭК-М разработал Д.А. Фартышев [9–11]. Последнюю версию ПК ИНТЭК-SAW разработал Мамедов Т.Г. под руководством А.Г.

ПК ИНТЭК-SAW использует для расчётов модель оптимизации балансов ТЭР по России [12], в математическом смысле при помощи которой решается классическая задача линейного программирования. Модель описывается системой линейных уравнений и целевой функцией минимизации суммы приведенных затрат и потерь от дефицита топливно-энергетических ресурсов среди потребителей. В содержательном смысле описывается территориально-производственная модель ТЭК с блоками электроэнергетики, тепло-, газо- и углеснабжения, а также нефтепереработки – мазутоснабжения.

Для описания экономико-математической модели экспертами-энергетиками была принята система обозначений переменных и уравнений [13], которая сохранена в последней версии. Название переменной (TRV) состоит из 7 символов (XXXYYZZ), где XXX-код

объекта (или группы объектов) добычи, производства, транспорта, переработки, и потребления энергоресурсов, YY – код района, ZZ – код технологии, используемой на определенном объекте в определённом районе. Название ограничения (IR) содержит 5 символов (QQQYY), где QQQ – код энергетического ресурса, YY – код района

Модель не описывает угрозы развитию ТЭК или мероприятия по компенсации реализации угроз, но может отразить их последствия при помощи изменений параметров факторов ТЭК, описанных в модели. Следовательно, для описания угроз и мероприятий можно ввести дополнительные сущности, которые можно связать с параметрами модели и установить между ними функциональную зависимость и, таким образом, сформировать базу знаний для исследований. Для достижения этой цели предлагается интегрировать семантическое и математическое моделирование для модификации моделей с использованием когнитивных карт и визуализации результатов расчетов с их помощью.

**Методика интеграции когнитивного и математического моделирования.** Для интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК была разработана методика, которая включает следующие этапы:

- построение онтологий для структуризации знаний предметной области и их использование в качестве компонентов когнитивной карты, отражающих наличие связей между факторами модели ТЭК;
- построение когнитивных карт исследования развития ТЭК, используемых в качестве интерфейса для формирования вычислительного сценария и инструмента интерпретации результатов оптимизации сценария;
- определение множества реляционных отношений для интеграции семантических и математических моделей;
- проведение вычислительного эксперимента.

Каждый этап состоит из нескольких шагов и подробно описан ниже.

**Этап 1. Построение онтологий и когнитивных карт.**

Для **интеграции когнитивного** и **математического** моделирования требуется выбрать концепт для каждого элемента технико-экономической модели, также можно определить концепт для группы элементов технико-экономической модели. Концепты когнитивной карты делятся на 2 вида: концепты, характеризующие элементы технико-экономической модели, и концепты, характеризующие факторы угроз и мероприятий. После получения множества концептов требуется установить связи между концептами и значения связей.

**Шаг 1. Построение онтологий.**

Для перехода от технико-экономической модели к когнитивным картам предлагается использовать онтологии. При помощи онтологии описываются связи между элементами технико-экономической модели. Для этого в онтологиях используются триплеты.

В ходе работы были выделены следующие типы триплетов онтологий и когнитивных карт: угроза – предикат – объект; угроза– предикат – мероприятие; мероприятие – предикат – объект; мероприятие – предикат – угроза; объект – предикат – объект. Основные предикаты, которые были выделены в ходе работы: снижение, увеличение, обеспечение, сокращение и др., что, в свою очередь, соответствует предикатам в когнитивной карте.

На рисунке 1 приведены примеры для каждого типа триплета онтологии и триплета когнитивной карты.

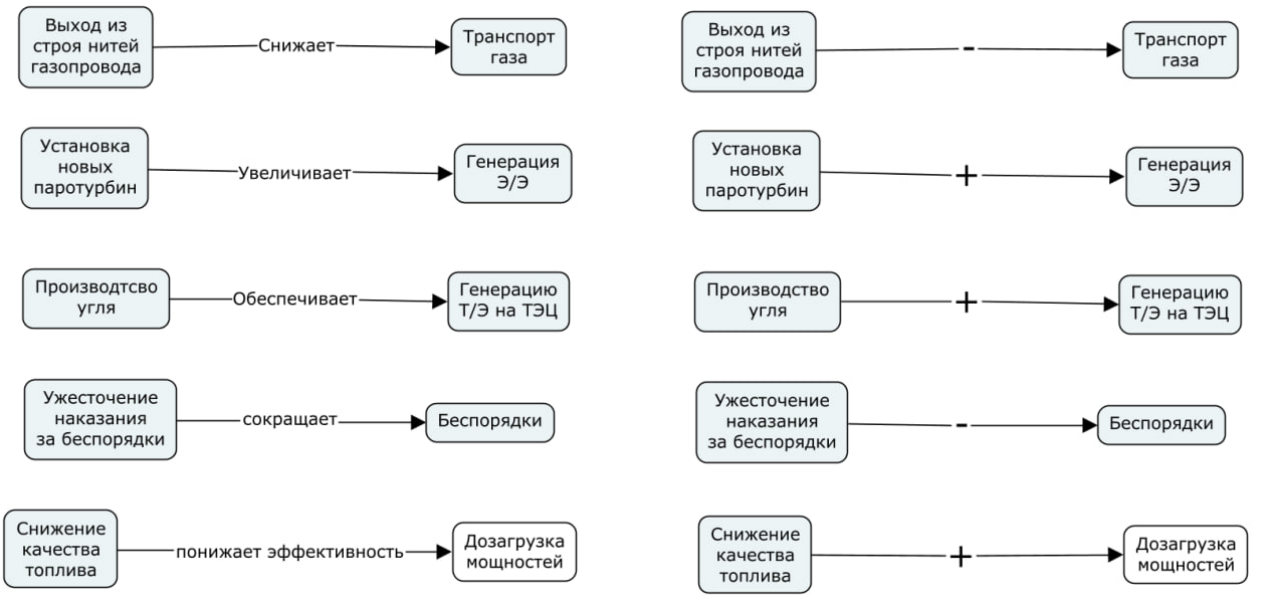



**Рис. 1.** Типы триплетов для онтологий и когнитивных карт

Также в ходе работы были построены онтология технико-экономической модели ТЭК. На рисунке 2 представлен фрагмент онтологии в графическом виде, где каждому концепту соответствуют уравнение или переменная в технико-экономической модели.

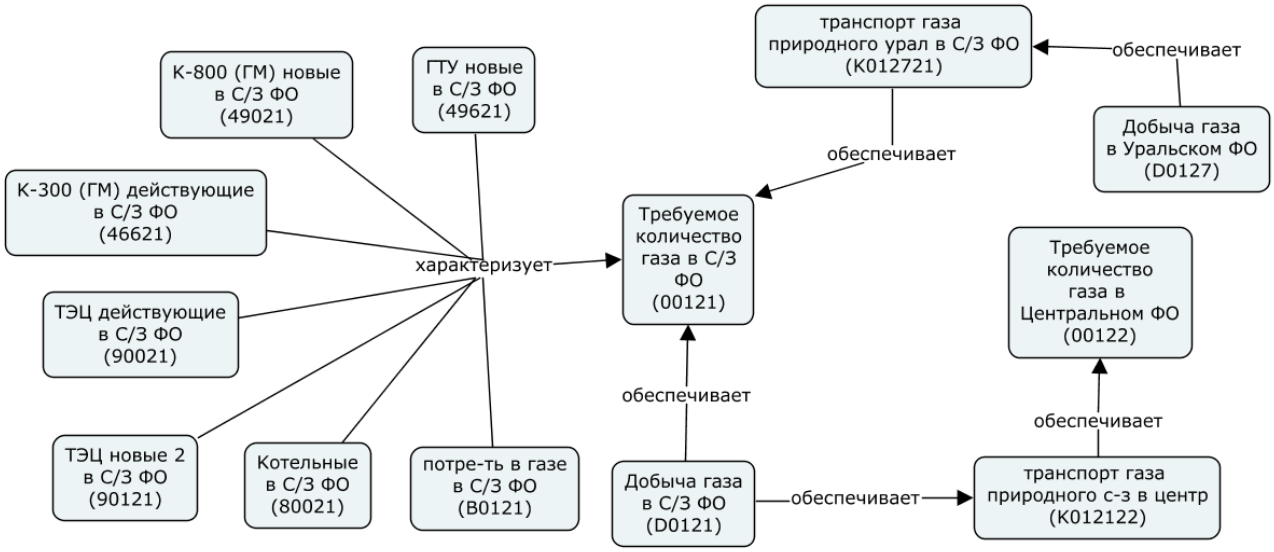



**Рис. 2.** Фрагмент онтологии связей между элементами технико-экономической модели

Все триплеты хранятся в виде таблиц, пример описания триплета онтологии приводится в таблице 1.

**Таблица 1.** Описание триплета онтологии

| | |
|---|---|
| Наименование концепта А | К-800 (ГМ) новые в С/З ФО |
| Тип элемента А | Уравнение (IR) |
| Код элемента А | 49021 |
| Наименование концепта Б | Требуемое количество газа в С/З ФО |
| Тип элемента Б | Уравнение (IR) |
| Код элемента Б | 00121 |
| Значение связи | «Обеспечивает» |

**Шаг 2. Построение когнитивных карт.**

Полученная онтология будет использоваться для построения когнитивной карты, а именно, для построения триплетов, описывающих взаимосвязь между элементами технико-экономической модели. Для добавления в когнитивную карту угроз/мероприятий требуется описать триплет когнитивной карты следующим образом: название угрозы/мероприятия; тип элемента технико-экономической модели, на который будет влиять угроза/мероприятие; код элемента; параметр элемента; тип связи; значение связи. Параметры элементов технико-экономической модели, на которые может влиять угроза/мероприятие, отображены в табл. 2.

**Таблица 2.** Описание элементов модели

| Тип элемента модели | Параметр элемента |
|---|---|
| Переменная (TRV) | Верхнее ограничение |
| | Нижнее ограничение |
| | Коэффициент при целевой функции |
| Уравнение (IR) | Верхнее ограничение |
| | Нижнее ограничение |
| | Коэффициент переменной в неравенстве |

Далее составляется триплет когнитивной карты для конкретной угрозы. В качестве иллюстрационного примера взята угроза «Выход из строя нити газопровода». Описание триплета представлено в таблице 3.

**Таблица 3.** Описание триплета угрозы «Выход из строя нити газопровода»

| Наименование угрозы | Выход из строя нити газопровода |
|---|---|
| Тип элемента | Переменная (TRV) |
| Код элемента | K012721 |
| Параметр элемента | Верхнее ограничение |
| Тип связи | Функция |
| Значение связи | Y=F(x) |

После описания триплета угрозы на когнитивной карте появляется соответствующий концепт, через корректировку значения которого будет меняться верхнее ограничение переменной, характеризующей транспорт газа, следовательно, после расчёта решателем будут получены новые оптимальные значения. Результаты расчётов отражаются на когнитивной карте (рисунок 3).

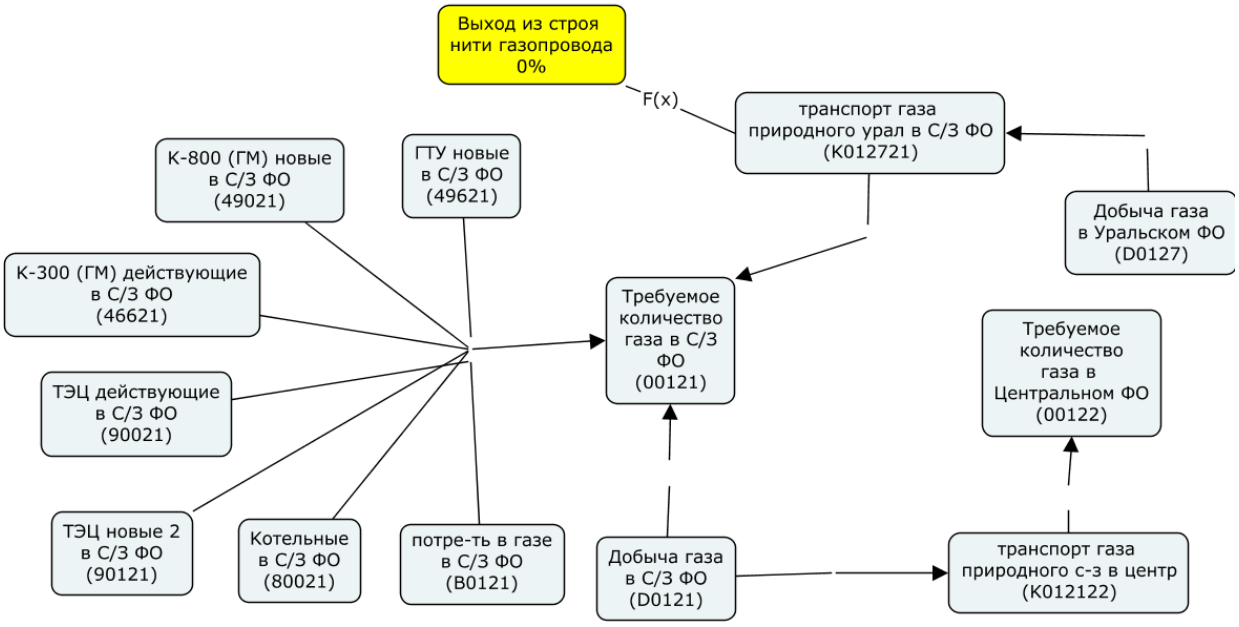



**Рис. 3.** Когнитивная карта угрозы «Выход из строя нити газопровода»

**Шаг 3. Определение множества реляционных отношений.**

Далее необходимо определить множества реляционных отношений. Предлагается формализовать данные, используемые для исследования, с помощью реляционных баз данных, и разработать алгоритмы обработки этих данных. Выделенные множества реляционных отношений описаны в нотации Чена, которая представлена на рисунке 4. В соответствии с полученной нотацией Чена были выделены следующие отношения (таблицы в реляционной БД):

- **Отношение «Переменные»** хранит наименование переменной, ее верхнего и нижнего ограничения, а также оптимальное значение, полученное после расчёта модели, и коэффициент при целевой функции.
- **Отношение «Уравнения»** хранит наименование уравнений и значения верхних и нижних ограничений.
- **Отношение «Модели»** хранит наименование моделей и данные о расчёте: была рассчитана модель или нет, было найдено оптимальное решение или нет; также хранит тип целевой функции(максимум/минимум) и текстовое описание модели.
- **Отношение «Сценарии»** хранит наименование и описание вычислительного сценария
- **Отношение «Элементы модели»** хранит информацию об элементах модели, используется как связывающее отношения между семантическими моделями и технико-экономической моделью.
- **Отношение «Триплеты онтологий»** хранит триплеты, описывающие взаимосвязи между элементами технико-экономической модели.
- **Отношение «Триплеты когнитивных карт»** хранит триплеты, описывающие влияние угроз и мероприятий на элементы технико-экономической модели.

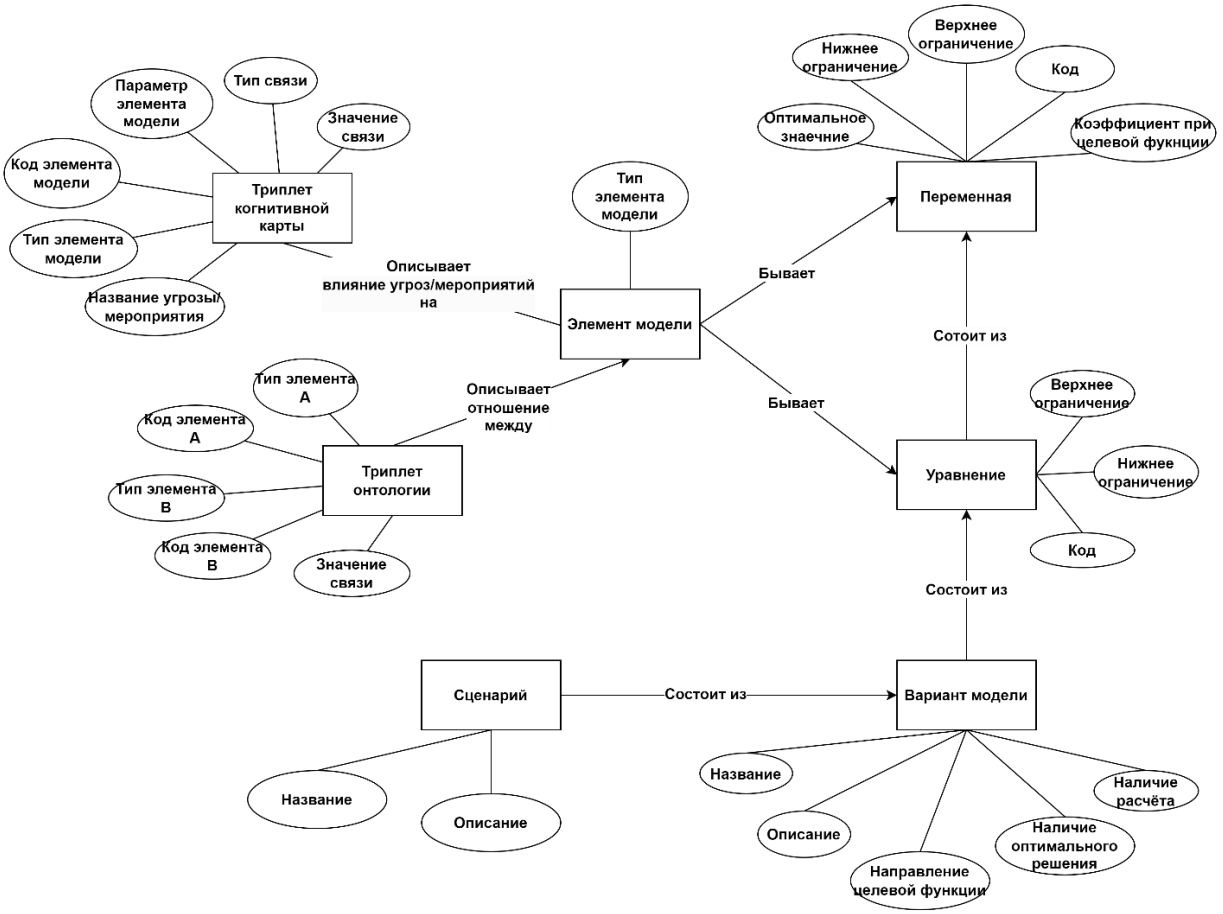



**Рис. 4.** Множество реляционных отношений в нотации Чена

**Этап 2. Формирование и реализация вычислительного сценария исследований.**

Этап включает в себя построение базового варианта и вариантов развития ТЭК с угрозами и мероприятиями, их расчёта и интерпретации с использованием семантических моделей.

Для формирования вычислительного сценария определяются: базовый вариант модели, угрозы и мероприятия, индикаторы оценки эффективности выбранной стратегии развития в условиях возмущений.

**Шаг 1. Построение базового варианта модели.**

Для построения базового варианта модели из сформированного ранее отношения онтологий выберем онтологию, описывающую требуемый для исследования фрагмент технико-экономической модели ТЭК. Исследователь выбирает район(ы), которым в программе присвоены определенные коды. По этим кодам из отношения онтологий выбираются советующие концепты и устанавливаются связи, также описанные в этом отношении.

На текущем шаге определяются угрозы и мероприятия, и их исходные значения, которые характеризуют **базовые значения угрозы.** Базовые значения угрозы – это значения угрозы, которые исследователь указывает в исходном варианте модели вычислительного сценария. Из отношения угроз и мероприятий исследователю предоставляется список угроз и мероприятий, связи которых установлены с теми элементами модели, которые представлены онтологией на предыдущем шаге. Это сопоставление выполняется по кодам элементов моделей (переменные, уравнения).

Выполняем поиск оптимального решения базового варианта. Для концептов онтологий рассчитываются и устанавливаются значения. На следующем шаге формируются варианты развития с угрозами и мероприятиями.

**Шаг 2. Внесение корректировок в модель.**

Для формирования вариантов развития ТЭК в условиях возмущений необходимо установить новые значения для концептов угроз и выполнить расчеты.

Если для угроз установлены функциональные зависимости для описания причинно-следственной связи, тогда для проведения расчётов достаточно установить для концептов угроз новые значения и выполнить расчёт.

Если для угроз для описания причинно-следственных связей установлены знаки, веса, пустые связи и прочее, тогда исследователю требуется самостоятельно установить значение параметров для элемента, с которым связана угроза, и выполнить расчёт.

Результаты расчёта будут показаны на когнитивной карте. Точно таким же образом выполняются построение и расчёт для варианта модели с мероприятиями. Продолжаем повторять этот шаг до тех пор, пока не будет построен целиком вычислительный сценарий.

После проведения всех расчетов есть возможность построения балансовых таблиц и внесение значений в когнитивную карту. На рисунке 5 приводится алгоритм, реализующий методику интеграции семантического и математического моделирования для проведения вычислительного эксперимента.

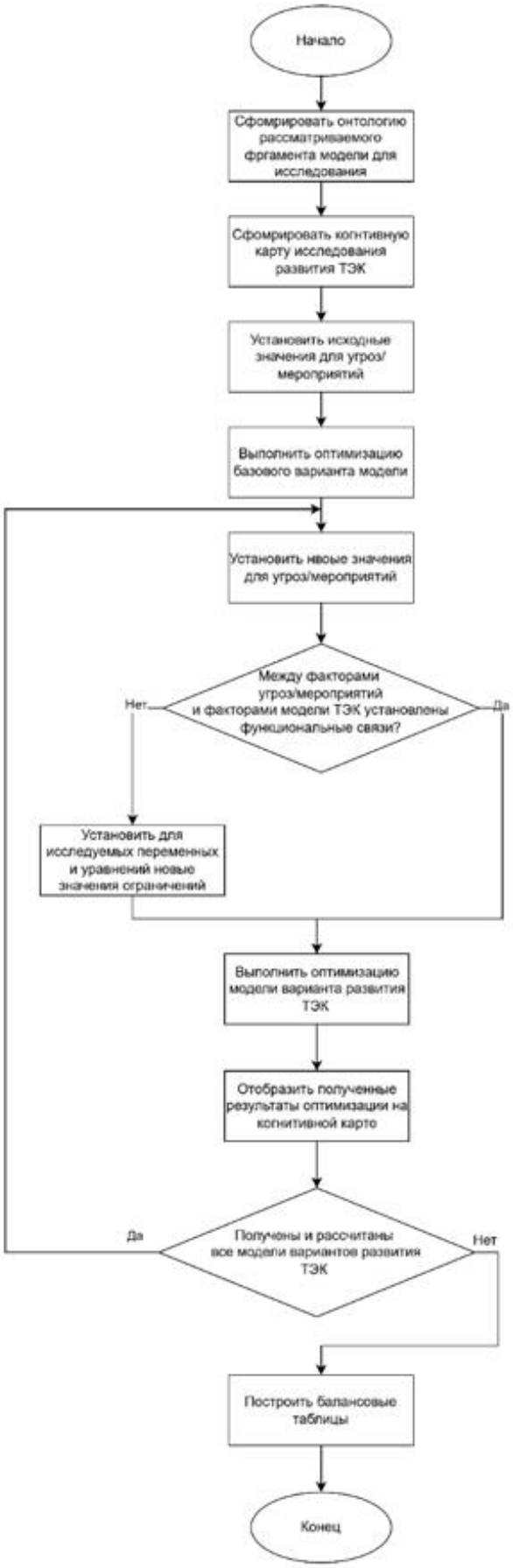



**Рис. 5.** Алгоритм интеграции семантических и математических моделей и проведения вычислительного эксперимента

**Заключение.** В статье предложена методика интеграции когнитивного и математического моделирования для анализа направлений развития ТЭК с учетом угроз энергетической безопасности. Разработанный подход позволяет формализовать сложные взаимосвязи между факторами ТЭК, угрозами и мерами противодействия им, обеспечивая переход от качественного анализа к количественным оценкам с использованием оптимизационных моделей.

За счет предложенного подхода решаются следующие задачи:

- Структуризация знаний. Построенные онтологии позволяют систематизировать данные о технико-экономической модели ТЭК, угрозах и мероприятиях. Использование триплетов обеспечивает гибкость в описании причинно-следственных связей.
- Визуализация и анализ угроз ЭБ. Когнитивные карты являются интерфейсом для формирования вычислительных сценариев и интерпретации результатов моделирования. На примере угрозы «Выход из строя нити газопровода» продемонстрирована возможность оценки влияния возмущений на параметры ТЭК.
- Интеграция моделей. Предложенная реляционная база данных объединяет семантические и математические модели, упрощает обработку данных и автоматизацию вычислительных экспериментов.

Таким образом, предложенный подход позволяет существенно повысить эффективность анализа энергетической безопасности за счет сочетания когнитивного и математического моделирования, обеспечивая научно обоснованное принятие решений в условиях нестабильности.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0007) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

**Список источников**

1. Энергостратегия. – URL: https://minenergo.gov.ru (дата обращения: 18.08.2025).
2. Массель А.Г. Методологический подход к организации интеллектуальной поддержки исследований проблемы энергетической безопасности / А.Г. Массель // Информационные технологии, 2010. –№ 9. – С. 32-36.
3. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: Научно-практическое издание. Серия «Информатизация России на пороге XXI века» / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
4. Axelrod R. Structure of decision: The cognitive maps of political elites. Princeton University Press, 1976, 405 p.
5. Воропай Н.И. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Н.И. Воропай. – М., 2005. – 53 с.
6. Энергетическая безопасность России (введение в проблему): СЭИ СО РАН / рук. Воропай Н.И., Клименко С.М., Криворуцкий Л.Д., Массель Л.В. – Иркутск, 1997.
7. Массель Л.В. Инструментальные средства поддержки решений по обеспечению энергетической безопасности / Л.В. Массель, Н.Н. Макагонова, А.Р. Ершов // Методические вопросы исследований надежности больших систем энергетики. – Спб., 1997. – Т. 49. – С. 492-503.
8. Болдырев Е.А. Моделирование программного обеспечения на примере программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности / Е.А. Болдырев // Информационные технологии в науке, технике и образовании. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2002. – С. 40-45.
9. Аршинский В.Л. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности / В.Л. Аршинский, А.Г. Массель, Д.А. Фартышев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – Т. 3. – С. 283-289.
10. Фартышев Д.А. Методика построения и разработка многоагентного программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности / Д.А. Фартышев // Программные продукты и системы. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010.
11. Фартышев Д.А. Разработка многоагентного ПК ИНТЭК-М для исследований проблемы энергетической безопасности / Д.А. Фартышев // Программные продукты и системы, 2010. –№ 3. – С. 126-129.
12. Макаров А.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства / А.А. Макаров, Л.А. Мелентьев. – Новосибирск: Наука, 1973. – 273 с.

13. Массель А.Г. Адаптация методики реинжиниринга унаследованных программных систем / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. –№ 4 (24). – С. 88-99.

***Массель Алексей Геннадьевич.*** *Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 173012, SPIN:2940-2510, Scopus AuthorID: 57220804764, ORCID: 0000-0002-0351-0415, amassel@gmail.com, Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

***Мамедов Тимур Габилович.*** *Инженер-исследователь, аспирант отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 1040958, SPIN: 2011-2120, Scopus AuthorID: 58026460700, ORCID: 0000-0002-3396-5074, mamedowtymur@yandex.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

---

UDC 004.8:620.9
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.006

# Integration of mathematical and cognitive modeling in research on the development of the fuel and energy complex from the perspective of energy security

**Aleksei G. Massel, Timur G. Mamedov**

Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *amassel@isem.irk.ru*

**Abstract.** The article discusses the methodology of integrating cognitive and mathematical modeling to analyze the directions of development of the fuel and energy complex (fuel and energy complex) from the perspective of energy security. The proposed approach makes it possible to formalize and automate the process of transition from a qualitative analysis of threats and countermeasures to a quantitative assessment of their impact on the fuel and energy sector using optimization models. The methodology is based on the use of ontologies to structure domain knowledge, the construction of cognitive maps to visualize cause-and-effect relationships, and the development of relational databases to integrate semantic and mathematical models. The application of this approach is demonstrated by the example of a computational experiment involving threat modeling and evaluation of the effectiveness of energy security strategies. The results of the study can be used to make managerial decisions in conditions of uncertainty and crisis scenarios.

**Keywords:** cognitive modeling, energy security, fuel and energy complex, ontologies, computational experiment, optimization models

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the draft state assignment (no. FWEU-2021-0007) of the fundamental research program of the Russian Federation for 2021-2030.

## References

1. Energostrategiya [Energy Strategy], available at: https://minenergo.gov.ru (accessed: 08/18/2025).
2. Massel A.G. Metodologicheskiy podkhod k organizatsii intellektual'noy podderzhki issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Methodological approach to organizing intelligent support for energy security research]. Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies], 2010, no. 9, pp. 32-36.
3. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy: Nauchno-prakticheskoye izdaniye. Seriya “Informatizatsiya Rossii na poroge XXI veka” [Computer decision support: Scientific and practical publication. Series "Informatization of Russia on the Threshold of the 21st Century"]. Moscow, SINTEG Publ., 1998, 376 p.
4. Axelrod R. Structure of decision: The cognitive maps of political elites. Princeton University Press, 1976, 405 p.
5. Voropay N.I. Energeticheskaya bezopasnost'. Terminy i opredeleniya [Energy security. Terms and definitions]. Moscow, 2005, 53 p.
6. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii (vvedeniye v problemu): SEI SO RAN [Energy Security of Russia (Introduction to the Problem): ESI SB RAS]. Head N.I. Voropay, S.M. Klimenko, L.D. Krivorutskiy, L.V. Massel. Irkutsk, 1997.

7. Massel L.V., Makagonova N.N., Yershov A.R. Instrumental'nyye sredstva podderzhki resheniy po obespecheniyu energeticheskoy bezopasnosti [Instrumental means of decision support for ensuring energy security]. Metodicheskiye voprosy issledovaniy nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [methodological issues of reliability research of large energy systems], St. Petersburg, 1997, vol. 49, pp. 492-503.
8. Boldyrev E.A. Modelirovaniye programmnogo obespecheniya na primere programmnogo kompleksa dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Software modeling using the example of a software complex for energy security research]. Informatsionnyye tekhnologii v nauke, tekhnike i obrazovanii [Information technologies in science, engineering and education], Irkutsk, ISEM SB RAS, 2002, pp. 40-45.
9. Arshinskiy V.L., Massel A.G., Fartyshev D.A. Mul'tiagentnyy programmnyy kompleks dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Multi-agent software complex for energy security research]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], Irkutsk, ISEM SB RAS, 2009, vol. 3, pp. 283-289.
10. Fartyshev D.A. Metodika postroyeniya i razrabotka mnogoagentnogo programmnogo kompleksa dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Methodology for building and developing a multi-agent software complex for energy security research]. Programmnyye produkty i sistemy [Software products and systems] Irkutsk, ISEM SB RAS, 2010.
11. Fartyshev D.A. Razrabotka mnogoagentnogo PK INTÉK-M dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Development of the multi-agent software complex INTÉK-M for energy security research]. Programmnyye produkty i sistemy [Software & Systems], 2010, no. 3, pp. 126-129.
12. Makarov A.A., Melentyev L.A. Metody issledovaniya i optimizatsii energeticheskogo khozyaystva [Methods for research and optimization of the energy economy]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973, 273 p.
13. Massel A.G., Mamedov T.G. Adaptatsiya metodiki reinzhiniringa unasledovannykh programmnykh sistem [Adaptation of the legacy software systems reengineering methodology]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 4 (24).

***Massel Aleksei Gennadievich.*** *Ph. D, Senior Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 173012, SPIN:2940-2510, Scopus AuthorID: 57220804764, ORCID: 0000-0002-0351-0415, amassel@gmail.com. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

***Mamedov Timur Gabilovich.*** *Research engineer, postgraduate of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 1040958, SPIN: 2011-2120, Scopus AuthorID: 58026460700, ORCID: 0000-0002-3396-5074, mamedowtymur@yandex.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

*Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 25.08.2025.*

*The article was submitted 08/21/2025; approved after reviewing 08/25/2025; accepted for publication 08/25/2025.*

## Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 620.9
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.007

# Оптимизация тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей

**Зорина Татьяна Геннадьевна[1], Юркевич Ольга Ивановна[2], Кабанов Павел Алексеевич[2]**

[1]Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь, Минск, *tanyazorina@tut.by*
[2]Витебскэнерго, Республика Беларусь, Витебск

**Аннотация.** В статье представлено комплексное исследование проблемы оптимизации тарифной политики в энергетике Республики Беларусь с предложением внедрения инновационных методов предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей. Авторы проводят детальный анализ текущего состояния тарифной политики в Беларуси, выявляя ключевую проблему – высокий уровень перекрестного субсидирования, при котором тарифы на электроэнергию для промышленности значительно превышают тарифы для населения, что существенно влияет на конкурентоспособность предприятий. В статье отмечено, что основную долю перекрестного субсидирования в тарифе на электрическую энергию для юридических лиц составляет недоплата потребителей до уровня обоснованных затрат по тепловой энергии. Исследование раскрывает несовершенство существующих методов прогнозирования тепловых нагрузок, основанных преимущественно на статистических данных и не учитывающих множество динамических факторов. В качестве решения предлагается инновационная технология нейросетевого прогнозирования, использующая гибридную архитектуру глубоких нейронных сетей, сочетающую преимущества рекуррентных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью и сверточных нейронных сетей. Новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к оптимизации тарифной политики через повышение точности прогнозирования тепловых нагрузок, что позволяет оптимизировать режимы работы теплогенерирующего оборудования, минимизировать потери при транспортировке и сократить эксплуатационные расходы. Авторы отмечают, что внедрение предложенной технологии способно снизить удельный расход топлива на 8-12% и сократить эксплуатационные затраты на 15-20%, создавая существенный резерв для снижения тарифов без ущерба для финансовой устойчивости энергетических предприятий. Результаты исследования имеют практическую значимость для реформирования тарифной политики в энергетике стран СНГ и повышения конкурентоспособности национальных экономик.

**Ключевые слова:** энергетика Беларуси, теплоснабжение, теплоэнергетика, прогнозирование тепловых нагрузок, предиктивное моделирование тепловых нагрузок, нейросетевое прогнозирование тепловых нагрузок, тарифная политика в энергетике, тарифы на энергию

**Цитирование:** Зорина Т.Г. Оптимизация тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич, П.А. Кабанов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3(39). – С. 72-87. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.007.

**Введение.** Энергетика является основой для экономического развития, производства и обеспечения жизненно важных потребностей населения. От степени ее развития и состояния топливно-энергетического комплекса напрямую зависит эффективное развитие страны, производственные возможности, перспективы экономики и ее конкурентоспособность, обеспечение надежного функционирования жилищно-коммунального комплекса и комфортных условий для жизни населения. Для обеспечения социально-экономического развития требуется формирование оптимальной тарифной политики на энергоресурсы, обеспечивающей баланс интересов потребителей, энергетических предприятий и государства. Для стран СНГ, и, в частности, для Республики Беларусь, характерен высокий уровень тарифов на энергию, что обусловливает необходимость постоянного поиска механизмов совершенствования тарифной политики и резервов для снижения себестоимости энергии.

**1. Анализ текущего состояния тарифной политики в Республике Беларусь.** Тарифы на электрическую энергию для промышленных предприятий в Республике Беларусь находятся на уровне значительно выше стран Евразийского союза и Европы, что что изначально ставит энергоемкие предприятия республики (нефтехимия, нефтепереработка, металлургия, машиностроение и т.п.) в не конкурентоспособное положение [1]. Тарифы для населения в большинстве стран Европы в 1,5-3 раза выше тарифов для промышленности, в то время как в Республике Беларусь они почти на 40% ниже промышленных тарифов (рис. 1).

**Рис. 1.** Сравнительный уровень тарифов на электроэнергию для бытовых абонентов и промышленности в странах ЕАЭС, цент. США (по данным [2])

Такой высокий уровень тарифов на электрическую энергию объясняется перекрёстным субсидированием – механизмом формирования тарифов, при котором тарифы на энергию для отдельных групп потребителей установлены на уровне ниже базовых тарифов и компенсируются за счет установления более высокого уровня тарифов на энергию для других групп потребителей. Здесь также важно отметить наличие перекрестного субсидирования и в других странах ЕАЭС. Разница между тарифами для промышленности и населения в некоторых странах очень значительна, однако одним из самых высоких на постсоветском пространстве уровень перекрестного субсидирования остается в Беларуси и Кыргызстане, в России ситуация варьируется по регионам, однако общий объём перекрёстного субсидирования также остается значительным.

Мнения экспертов о влиянии перекрестного субсидирования на экономику различно. Некоторые из них (Хуберт Ф. [3]) полагают, что при общем низком уровне тарифов такие меры могут быть оправданы, однако большинство (Н.А. Назарова, Н.Т. Минеханова [4], И.А. Королев и Л.Д.Хабачев [5]; Селляхова О., Фатеева Е. [6]; И.Ю. Золотова [7]; Е.Г. Гладких, Е.А. Базанова [8]) сходятся во мнении, что данный механизм ценообразования неэффективен и

оказывает негативное влияние как на экономику страны в целом, так и на развитие энергетической отрасли.

В Республике Беларусь в настоящее время население возмещает 93% затрат на производство электрической энергии и всего 22-23% затрат на производство тепловой энергии (рис. 2) [9].

**Рис. 2.** Возмещение тарифами для населения затрат на производство электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь, %

Если более детально рассматривать уровень покрытия затрат тарифом по электрической энергии, то при себестоимости 1 кВтч 6,7 центов США среднеотпускной тариф для всех категорий потребителей составляет 9,3 цента США, однако по населению среднеотпускной тариф ниже более чем на треть и составляет 6,3 цента США (рис. 3).

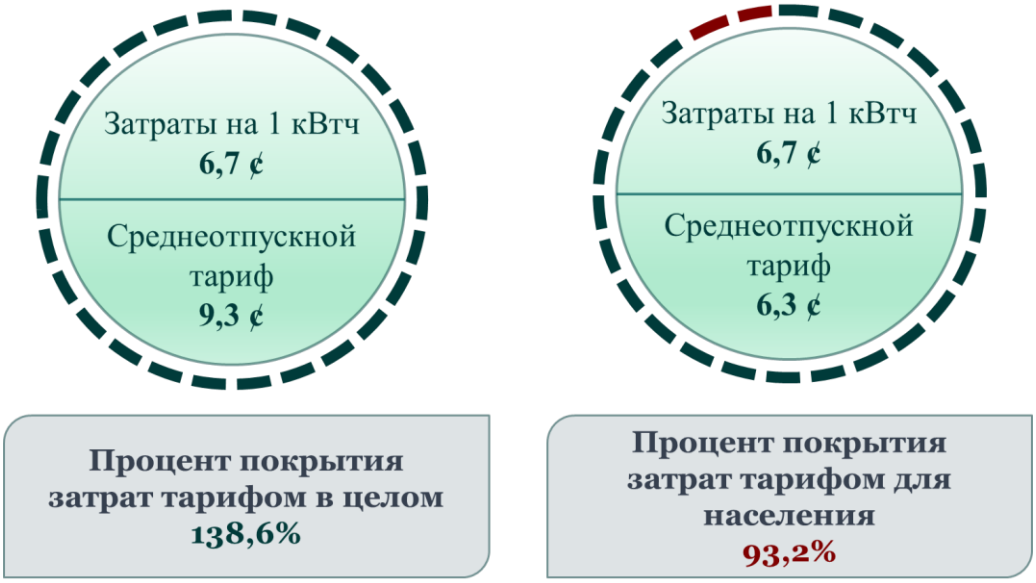



**Рис. 3.** Уровень покрытия затрат тарифом на электрическую энергию в Республике Беларусь за 2024 год

Если рассмотреть уровень покрытия затрат тарифом по тепловой энергии, то при себестоимости 1 Гкал почти 41,5 долл. США среднеотпускной тариф для всех категорий потребителей составляет всего 22,3 долл. США, а по населению среднеотпускной тариф почти в 2,5 раза ниже и составляет всего 9,3 долл. США (рис. 4).

Из представленных рис. 3, 4 становится понятно, что в Республике Беларусь перекрестное субсидирование имеет свою особенность: тарифом на электрическую энергию для промышленности субсидируется не только недоплата населением до уровня экономически обоснованного тарифа по электрической энергии, но также и недоплата по тепловой энергии. Так, в тарифе на электрическую энергию для промышленных потребителей обоснованные расходы на энергию составляют 74%, чуть менее 1,5% – это недоплата населением по электрической энергии и 24% – недоплата по тепловой энергии.

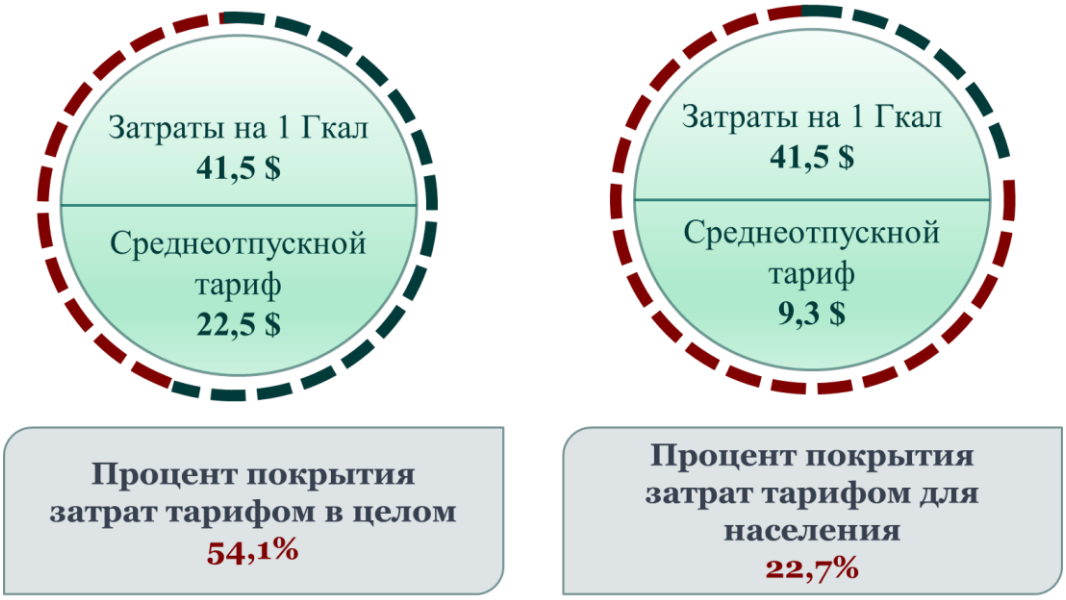



**Рис. 4.** Уровень покрытия затрат тарифом на тепловую энергию в Республике Беларусь за 2024 год

Важно отметить, что, несмотря на более дешевые тарифы на оплату энергии в составе ЖКУ, население в конечном итоге всё равно оплачивает полную стоимость энергии через покупку отечественных товаров и услуг, включающих расходы производителей на энергию. Таким образом, установление экономически обоснованных тарифов для категорий потребителей должно производится с учетом комплексной оценки роста расходов населения на оплату энергии не только по платежам за жилищно-коммунальные услуги, но и в составе отечественных товаров и услуг.

Расчёт средних расходов населения на энергию в составе отечественных товаров, работ, услуг, рассчитанный на основе структуры потребительских расходов населения Республики Беларусь и систем статистических таблиц «Затраты-выпуск», в сравнении с расходами населения на энергию в составе жилищно-коммунальных услуг (далее – ЖКУ), показал, что более 70% от совокупных расходов населения на энергию составляют расходы на энергию в приобретаемых товарах и услугах (рис. 5).

Таким образом, несмотря на более низкие тарифы на энергию в рамках ЖКУ, население всё равно несёт полные расходы на энергию через цены на отечественные товары и услуги. Анализ совокупных расходов населения на энергию подчеркивает важность комплексного подхода к оценке расходов на энергию: установление экономически обоснованных тарифов для потребителей должно учитывать не только прямые платежи за ЖКУ, но и влияние на общие расходы населения, включая затраты на энергию, заложенные в стоимость товаров и

услуг. Ключевым шагом в установлении более прозрачной и справедливой системы ценообразования является сокращение практики перекрестного субсидирования и установление тарифов, отражающих реальные затраты на производство и распределение энергии [10].

**Рис. 5.** Совокупные расходы населения на энергию

Комплекс мер по ликвидации перекрестного субсидирования должен включать в себя в обязательном порядке работу по оптимизации затрат энергоснабжающих организаций за счет реализации эксплуатационно-технических мероприятий, мероприятий по энергосбережению, снижению непроизводственных и прочих расходов, включаемых в затраты на производство и реализацию энергии. В условиях необходимости обеспечения эффективного управления энергетическими ресурсами и высокой себестоимости тепловой энергии, характерной для стран СНГ и, в частности, для Республики Беларусь, где централизованные сети обслуживают более 60% потребителей, одним из направлений оптимизации затрат должно стать внедрение более эффективных методов прогнозирования тепловых нагрузок.

**2. Существующая система прогнозирования тепловых нагрузок.** Современная ситуация в теплофикации Беларуси характеризуется высокой степенью концентрации и серьезным старением основных фондов. Несмотря на планомерную модернизацию тепловых сетей и внедрение современных приборов учета, существующие методы прогнозирования нагрузки основаны в основном на статистических данных и не учитывают множество динамических факторов, влияющих на потребление тепловой энергии.

Фундаментальная проблема заключается в том, что традиционные методы прогнозирования тепловых нагрузок, основанные на статистических данных и детерминированных моделях, не способны адекватно отражать сложную динамику современного энергопотребления. Высокая волатильность тепловых нагрузок, обусловленная климатическими изменениями, трансформацией структуры потребления и модернизацией систем теплоснабжения, создает условия, при которых существующие подходы к планированию демонстрируют критически низкую точность прогнозирования.

Особую остроту проблеме придает недостаточная интеграция различных источников данных в единую информационную систему. Несмотря на внедрение автоматизированных систем коммерческого учета энергии на крупных объектах, на уровне конечных потребителей степень автоматизации существенно различается. Это создает информационные разрывы, препятствующие формированию целостной картины энергопотребления и, как следствие, точности прогнозирования тепловых нагрузок.

Временные задержки в получении и обработке данных усугубляют ситуацию, в связи с чем существующие алгоритмы прогнозирования демонстрируют неспособность адекватно реагировать на нестандартные ситуации, включая резкие изменения погодных условий или аварийные ситуации в системе теплоснабжения.

Качество доступных данных для построения прогнозных моделей характеризуется критической неоднородностью как по временному охвату, так и по детализации измерений. Структура накопленных исторических данных о потреблении тепловой энергии не оптимизирована для применения современных методов анализа, что ограничивает возможности разработки точных прогностических моделей.

Неспособность существующих методов учитывать сложные нелинейные зависимости между множественными факторами, влияющими на формирование тепловых нагрузок, приводит к систематическим ошибкам в планировании объема производства тепловой энергии. Это, в свою очередь, создает условия для неоптимального использования генерирующих мощностей, повышенного расхода топлива и увеличения эксплуатационных затрат, что неизбежно отражается на себестоимости и в последующем на тарифах на энергию.

**3. Анализ существующих методов прогнозирования тепловых нагрузок.** Современная практика прогнозирования тепловых нагрузок базируется на широком спектре методологических подходов, каждый из которых обладает специфическими характеристиками применимости (табл. 1). Эволюция методов прогнозирования отражает постепенный переход от детерминированных подходов к вероятностным моделям и далее к методам искусственного интеллекта.

**Таблица 1.** Сравнение методов прогнозирования тепловых нагрузок

| Группа | Метод | Краткое описание | Основные недостатки |
|---|---|---|---|
| Традиционные статистические методы | Метод скользящих средних | Сглаживание краткосрочных флуктуаций потребления на основе анализа исторических данных | Ограниченная способность учета сезонных закономерностей и долгосрочных трендов |
| | Экспоненциальное сглаживание (включая Хольта-Винтерса) | Учет трендов и сезонности в временных рядах теплопотребления | Принципиальная ограниченность в отношении нелинейных зависимостей |
| | ARIMA-модели | Анализ автокорреляционной структуры данных временных рядов теплопотребления | Неспособность адекватно обрабатывать многофакторные зависимости и нелинейные взаимосвязи |
| | Множественная регрессия | Установление количественных зависимостей между потреблением тепловой энергии и влияющими факторами (температура, ветер, характеристики потребителей) | Предположение о линейности связей ограничивает применимость для описания сложной динамики энергетических систем |
| Детерминированные физические | Модели теплового баланса зданий | Физическое моделирование на основе законов термодинамики с учетом теплофизических свойств конструкций и климатических воздействий | Вычислительная сложность для городских систем; чувствительность к точности исходных данных |

| Группа | Метод | Краткое описание | Основные недостатки |
|---|---|---|---|
| | Гидравлические модели тепловых сетей | Учет особенностей транспортировки теплоносителя и потерь тепловой энергии при распределении | Необходимость детального описания всех элементов системы и сложность масштабирования |
| | Интегрированные физические модели | Комплексное моделирование системы теплоснабжения путем интеграции моделей потребителей и тепловых сетей | Сложность учета стохастических факторов, поведенческих аспектов потребителей и климатических аномалий |
| Гибридные статистико-физические подходы | Калиброванные физические модели | Корректировка теоретических расчетов физических моделей, на основе измеренных данных в реальных условиях эксплуатации | Требование значительной экспертной поддержки; сложность автоматизации калибровки |
| | Адаптивные гибридные модели | Использование физических закономерностей, как базовой структуры с последующей статистической корректировкой параметров | Необходимость априорного задания структуры модели; ограниченная доступность данных о физических характеристиках |
| | Рекурсивная идентификация параметров | Автоматическая адаптация моделей к изменяющимся условиям функционирования системы теплоснабжения | Сохранение принципиальных ограничений гибридных методов; сложность реализации |

Составлено авторами на основании [11-16].

Анализ применимости традиционных методов прогнозирования в контексте современных требований к точности и оперативности управления энергетическими системами выявляет ряд принципиальных ограничений: неспособность адекватно учитывать нелинейные взаимосвязи между множественными факторами, особенно в условиях нестандартных режимов работы; отсутствие необходимой адаптивности к изменяющимся условиям функционирования энергетических систем (включая модернизацию оборудования, изменение структуры потребления и климатические изменения); ограниченная способность к обработке больших объемов разнородных данных и интеграции данных различной природы и временного разрешения; высокие требования к экспертной поддержке и ручной настройке параметров моделей; отсутствие механизмов автоматической адаптации к новым условиям функционирования системы и др. Указанные ограничения снижают практическую ценность традиционных методов и создают барьеры для их широкого практического применения, что подчеркивает необходимость разработки более точных и эффективных методов прогнозирования.

**4. Технология предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей.** Для решения задачи повышения точности прогнозирования тепловых нагрузок, позволяющего повысить эффективность управления энергетическими ресурсами и

создать резерв для снижения себестоимости тепловой энергии, предлагается использовать комплексную систему интеллектуального анализа данных, основанную на применении глубоких нейронных сетей. Нейросетевое прогнозирование, в отличие от традиционных методов прогнозирования, обладает рядом преимуществ (рис. 6), при этом архитектура системы интегрирует современные достижения в области машинного обучения со специфическими требованиями энергетической отрасли [17].

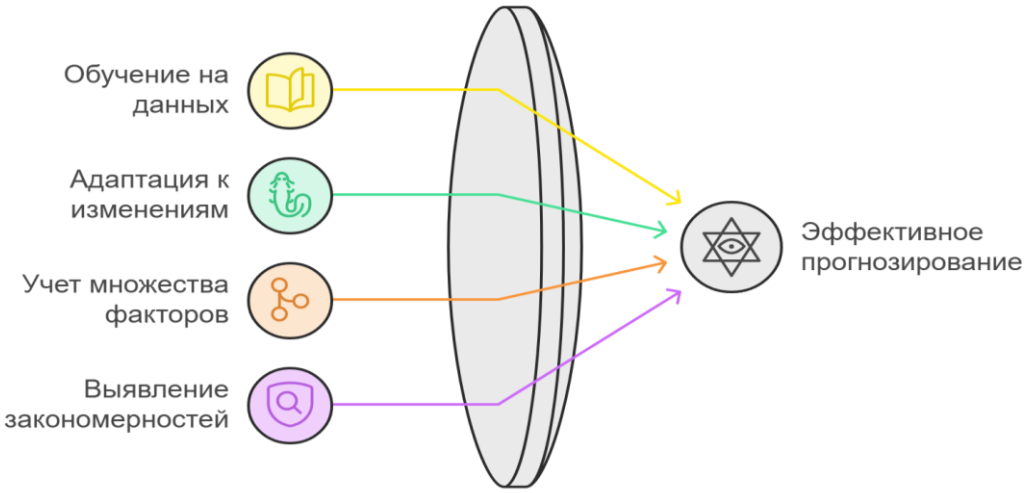



**Рис. 6.** Преимущество нейросетевого прогнозирования тепловых нагрузок

*Архитектура нейронной сети.* Основу технологии составляет гибридная архитектура глубокой нейронной сети, сочетающая преимущества рекуррентных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и сверточных нейронных сетей (CNN) для обработки временных рядов различной природы. Рекуррентные слои LSTM обеспечивают эффективную обработку последовательностей данных о потреблении тепловой энергии, сохраняя информацию о долгосрочных зависимостях и сезонных закономерностях в структуре энергопотребления.

Сверточные слои предназначены для выявления локальных паттернов в многомерных данных, включающих метеорологические параметры, характеристики потребителей и технические параметры системы теплоснабжения. Применение одномерных сверточных операций позволяет эффективно извлекать признаки из временных рядов различной частоты дискретизации, обеспечивая автоматическое выявление скрытых закономерностей в данных.

Механизм внимания (attention mechanism) интегрирован в архитектуру для динамического взвешивания важности различных входных параметров в зависимости от прогнозируемого горизонта и текущих условий функционирования системы. Данный подход обеспечивает адаптивную фокусировку модели на наиболее релевантных факторах для каждого конкретного случая прогнозирования.

Выходной слой сети реализует многозадачное обучение, одновременно прогнозируя точечные значения тепловых нагрузок и доверительные интервалы прогноза. Использование функции потерь, учитывающей как точность прогноза, так и качество оценки неопределенности, обеспечивает получение не только точных прогнозов, но и надежных оценок их достоверности.

*Система предобработки данных.* Технология включает комплексную систему предобработки и нормализации входных данных, адаптированную к специфике энергетических временных рядов. Модуль обнаружения и коррекции аномалий использует комбинацию статистических методов и автоэнкодеров для выявления и исправления ошибок измерений, технических сбоев и нетипичных режимов потребления.

Алгоритмы заполнения пропущенных значений основываются на методах матричной факторизации и интерполяции с учетом сезонных закономерностей и корреляционных связей между различными параметрами системы. Специализированные процедуры обработки обеспечивают сохранение статистических свойств временных рядов при восстановлении отсутствующих данных.

Система масштабирования данных применяет адаптивную нормализацию, учитывающую нестационарность энергетических временных рядов и различия в масштабах измерения различных параметров. Робастные методы нормализации обеспечивают устойчивость к выбросам и сохранение информативности признаков.

Модуль конструирования признаков автоматически генерирует дополнительные информативные характеристики на основе исходных данных, включая скользящие статистики, лаговые переменные, частотные характеристики и индикаторы сезонности. Применение методов автоматического отбора признаков позволяет оптимизировать размерность входного пространства и повысить обобщающую способность модели.

*Алгоритм обучения и оптимизации.* Процесс обучения нейронной сети реализован с использованием адаптивных алгоритмов оптимизации, специально настроенных для работы с энергетическими данными. Предполагается применение модифицированного алгоритма Adam с адаптивным изменением скорости обучения, учитывающим специфику сходимости на энергетических временных рядах.

Стратегия регуляризации включает dropout-слои с адаптивными коэффициентами, batch normalization для стабилизации процесса обучения и L2-регуляризацию для предотвращения переобучения. Применение техники early stopping с мониторингом качества прогнозирования на валидационной выборке обеспечивает оптимальную остановку процесса обучения.

Система кросс-валидации адаптирована к временной структуре данных, используя схему временного разбиения для корректной оценки обобщающей способности модели. Применение техники walk-forward validation обеспечивает реалистичную оценку качества прогнозирования в условиях, максимально приближенных к практическому применению.

Гиперпараметры модели оптимизируются с использованием байесовской оптимизации, что позволяет эффективно исследовать пространство параметров и находить оптимальную конфигурацию сети для конкретных характеристик системы теплоснабжения.

*Система адаптации и обновления модели.* Технология включает механизмы непрерывного обучения, позволяющие модели адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования системы теплоснабжения без полного переобучения. Применение техники transfer learning обеспечивает эффективное использование предварительно обученных компонентов модели при адаптации к новым условиям.

Система мониторинга качества прогнозов в реальном времени отслеживает отклонения фактических значений от прогнозируемых и автоматически инициирует процедуры корректировки модели при обнаружении систематических ошибок. Адаптивные алгоритмы позволяют модели самостоятельно настраиваться на изменения в структуре потребления или характеристиках системы теплоснабжения.

Модульная архитектура системы обеспечивает возможность селективного обновления отдельных компонентов модели без нарушения работы всей системы. Применение ансамблевых методов позволяет комбинировать прогнозы нескольких специализированных моделей для повышения общей точности и надежности прогнозирования.

*Интеграция с информационными системами.* Технология предусматривает глубокую интеграцию с существующими информационными системами предприятий теплоснабжения через стандартизированные API и протоколы обмена данными. Модуль интеграции

обеспечивает автоматическое получение данных из систем SCADA, коммерческого учета энергии и метеорологических служб.

Система управления данными включает специализированное хранилище временных рядов, оптимизированное для быстрого доступа к историческим данным и эффективного хранения больших объемов информации. Применение технологий сжатия данных и индексирования обеспечивает высокую производительность системы при работе с многолетними архивами данных.

Система предполагает наличие модуля визуализации и отчетности с интерактивными дашбордами, позволяющими специалистам энергетических предприятий оперативно анализировать прогнозы и принимать обоснованные решения по управлению системой теплоснабжения.

*Обеспечение надежности и безопасности.* Архитектура системы включает многоуровневые механизмы обеспечения надежности, включая резервирование критических компонентов и автоматическое переключение на резервные режимы работы при обнаружении сбоев. Система мониторинга состояния непрерывно отслеживает работоспособность всех компонентов и обеспечивает своевременное уведомление о потенциальных проблемах.

Модуль обеспечения информационной безопасности реализует современные стандарты защиты данных, включая шифрование информации, аутентификацию пользователей и контроль доступа к различным функциям системы. Применение технологий блокчейн для обеспечения целостности данных создает дополнительные гарантии достоверности информации, используемой для прогнозирования.

Система аудита ведет детальный журнал всех операций с данными и результатами прогнозирования, что обеспечивает полную прослеживаемость процессов принятия решений и соответствие требованиям регулирующих органов в области энергетики.

Таким образом, предлагаемое решение обеспечит высокую точность прогнозирования тепловых нагрузок при сохранении адаптивности к изменяющимся условиям функционирования системы теплоснабжения.

Для эффективного функционирования системы прогнозирования необходимо обеспечить соответствующую вычислительную инфраструктуру (рис. 6) [18].

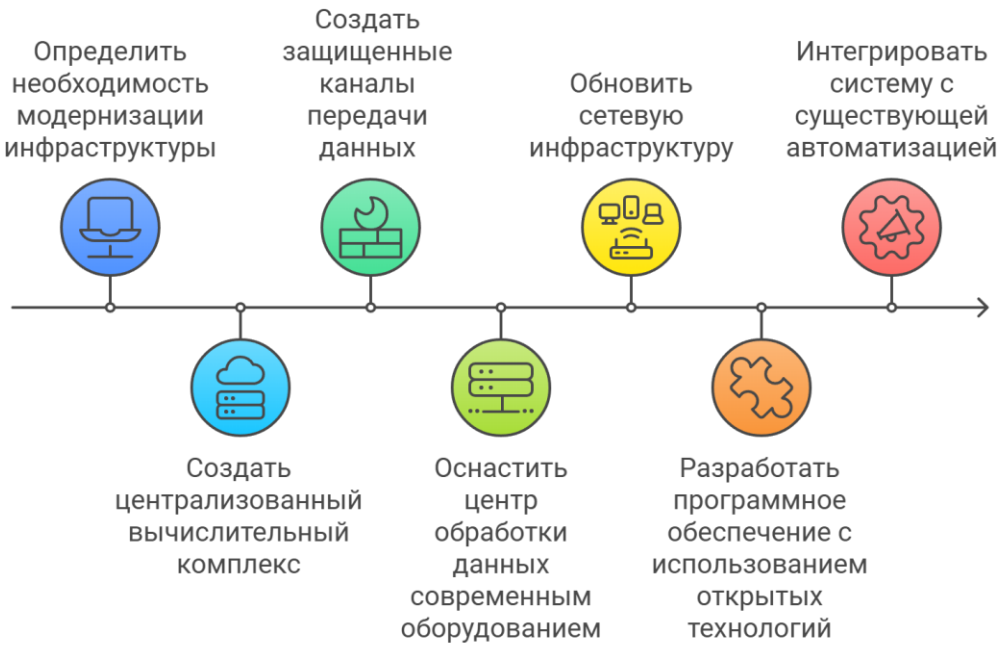



**Рис. 6.** Этапы модернизации инфраструктуры

Внедрение системы прогнозирования предполагает создание централизованного вычислительного комплекса с распределенной системой сбора данных, который может быть интегрирован с существующими системами диспетчеризации энергосистем стран СНГ.

**5. Потенциал оптимизации тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок.** Внедрение технологий предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей создает фундаментальные предпосылки для оптимизации тарифной политики в направлении снижения экономической нагрузки на потребителей при сохранении финансовой устойчивости энергетических предприятий.

Механизм снижения тарифов основывается на снижении себестоимости производства тепловой энергии, достигаемой за счет комплексного повышения эффективности всех звеньев системы теплоснабжения через повышение качества прогнозирования и оптимальное планирование режимов работы.

Снижение удельного расхода топлива достигается путем оптимизации режимов работы теплогенерирующего оборудования: повышение точности прогнозирования тепловых нагрузок обеспечивает возможность оптимального планирования загрузки оборудования с учетом его технических характеристик и экономических показателей [19]. Нейросетевые модели позволяют определить оптимальную последовательность включения и распределения нагрузки между различными источниками тепловой энергии, что позволяет достичь наиболее экономичных режимов работы оборудования. Предиктивное моделирование позволяет минимизировать периоды работы оборудования в неоптимальных режимах, характеризующихся повышенным расходом топлива на единицу произведенной тепловой энергии. Более точное прогнозирование пиковых нагрузок обеспечивает возможность заблаговременной подготовки резервного оборудования, что исключает необходимость экстренного запуска менее эффективных источников тепла. Интеграция прогнозирования с системами автоматического управления позволяет реализовать стратегии упреждающего регулирования, учитывающие инерционность тепловых процессов и характеристики тепловых сетей.

Сокращение эксплуатационных затрат достигается за счет возможности перехода от реактивного к проактивному управлению системой теплоснабжения через предиктивное моделирование. Повышение качества прогнозов тепловых нагрузок позволяет оптимизировать графики технического обслуживания оборудования, планируя профилактические работы в периоды минимального потребления тепловой энергии. Снижение количества внеплановых остановок оборудования и аварийных ситуаций достигается за счет возможности заблаговременного выявления потенциальных проблем через анализ отклонений фактического потребления от прогнозируемых значений. Помимо этого, оптимизация режимов циркуляции теплоносителя в тепловых сетях на основе точных прогнозов потребления позволяет снизить затраты электроэнергии на работу сетевых насосов. Адаптивное управление гидравлическими режимами с учетом прогнозируемого распределения нагрузок по районам города обеспечивает поддержание необходимых параметров теплоносителя при минимальных энергетических затратах на транспортировку.

Сокращение потерь тепловой энергии в сетях достигается через оптимизацию температурных графиков на основе повышения точности прогнозирования потребления [20]. Предиктивные модели позволяют определить минимально необходимые параметры теплоносителя для обеспечения требуемого уровня теплоснабжения, что снижает тепловые потери при транспортировке.

Таким образом, экономический эффект от применения предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей достигается за счет оптимизации

режимов работы теплогенерирующего оборудования, минимизации потерь при транспортировке и сокращения эксплуатационных расходов, что особенно актуально для энергосистем стран СНГ с высоким уровнем износа инфраструктуры. Дополнительно важно отметить улучшение качественных показателей теплоснабжения, включая стабильность температурных режимов и сокращение количества аварийных ситуаций. Достигаемый за счёт этих факторов эффект создает резерв для снижения тарифов на энергию без ущерба для финансовой устойчивости энергетических предприятий.

Предварительные количественные оценки показывают возможность достижения снижения удельного расхода топлива на 8-12% и сокращения эксплуатационных затрат на 15-20% [21]. Затраты на топливо являются основной статьей затрат на производство энергии и составляют порядка 53% общих затрат, затраты на эксплуатационно-ремонтное обслуживание – 8,5% от общих затрат, таким образом, применение предиктивного моделирования тепловых нагрузок позволит снизить себестоимость тепловой энергии на 5-8%, или на 2,5-3,5 долл. США.

В свою очередь, снижение себестоимости тепловой энергии позволит на 2,5-3% снизить тарифы на электрическую энергию для промышленных потребителей (рис. 7), которые на сегодняшний день практически на четверть включают в себя недоплату потребителей до уровня затрат на производство тепловой энергии.

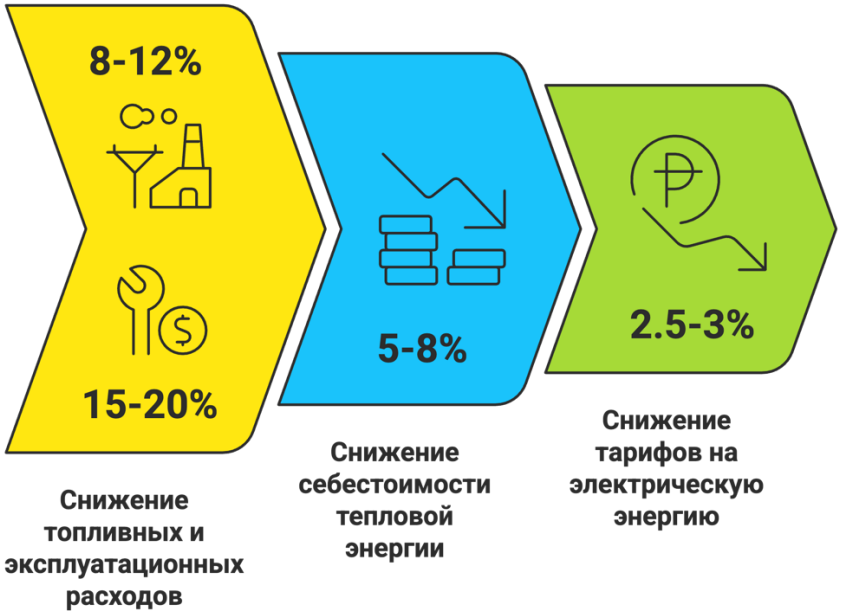



**Рис. 7.** Влияние предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей на тарифную политику в энергетике

Таким образом, предиктивное моделирование тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей позволит не только повысить качественные характеристики функционирования системы теплоснабжения, но также и оптимизировать тарифную политику в энергетическом секторе, снижая долю перекрестного субсидирования, связанного с недоплатой до себестоимости тепловой энергии.

**Заключение.** Проведенное исследование демонстрирует, что внедрение технологий предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей представляет собой перспективное направление оптимизации тарифной политики в энергетическом секторе Республики Беларусь и других стран СНГ. Комплексный анализ существующей ситуации выявил критические недостатки действующей системы тарифообразования, в частности, высокий уровень перекрестного субсидирования, в том

числе между видами энергии, который негативно влияет на конкурентоспособность промышленных предприятий и экономику в целом.

Предложенная технология нейросетевого моделирования, основанная на гибридной архитектуре глубоких нейронных сетей, позволяет преодолеть ограничения традиционных методов прогнозирования и обеспечить высокую точность прогнозирования тепловых нагрузок с учетом множества динамических факторов. Экономический эффект от внедрения данной технологии достигается за счет оптимизации режимов работы теплогенерирующего оборудования, минимизации потерь при транспортировке и сокращения эксплуатационных расходов, что создает значительный потенциал для снижения себестоимости производства тепловой энергии. Эти резервы позволят сформировать экономическую базу для постепенного снижения тарифов на энергию, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению практики перекрестного субсидирования.

Помимо экономических преимуществ, внедрение предлагаемой технологии обеспечивает повышение надежности теплоснабжения, сокращение количества аварийных ситуаций и улучшение качественных показателей энергоснабжения. В долгосрочной перспективе развитие технологий предиктивного моделирования создает основу для перехода к интеллектуальным энергетическим системам, способным эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования.

Таким образом, оптимизация тарифной политики на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей представляет собой комплексное решение, направленное на повышение эффективности энергетического сектора, укрепление конкурентоспособности национальной экономики и обеспечение устойчивого развития энергетических систем стран СНГ в условиях современных технологических и экономических вызовов.

## Список источников


1. Зорина Т.Г. Анализ электроемкости ВВП Республики Беларусь при прогнозировании электропотребления / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – №1 (29). – С. 86-98.
2. Рейтинг стран Европы по доступности электроэнергии для населения. URL: https://riarating.ru.
3. Хуберт Ф. Перекрестное субсидирование тарифов в электроэнергетической промышленности России не так плохо, как его репутация / Ф. Хуберт // Экономический журнал высшей школы экономики, 2002. – № Т. 6. – № 3. – С. 343-353.
4. Назарова Н.А. Перекрестное субсидирование: за и против / Н.А. Назарова, Н.Т. Минеханова // Энергетика Татарстана, 2009. – №4. – С. 68–74.
5. Королев И.А. О направлениях и принципах ликвидации системы перекрестного субсидирования в электроэнергетике / И.А. Королев, Л.Д. Хабачев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки, 2013. – № 6-1 (185). – С. 54-64.
6. Селляхова О. Перекрестное субсидирование и социальная норма электропотребления // О. Селляхова, Е. Фатеева // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2012. – №6 (75). – С. 32-49.
7. Золотова И.В. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике: эмпирический анализ, оценка эффективности собственной генерации / И.В. Золотова // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2017. – №3. – С. 70-77.
8. Гладких Е.Г. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике Российской Федерации как неэффективный институт / Е.Г. Гладких, Е.А. Базанова // Экономика и предпринимательство, 2016. – №11-1 (76-1). – С. 572-577.
9. Зорина Т.Г. Тарифная политика в электроэнергетике республики Беларусь: состояние, направления совершенствования, социальные и экономические аспекты реализации / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич // Белорусский экономический журнал, 2024. – №4. – С. 56-72.
10. Yurkevich O. Socio-economic consequences of changes in the tariff policy of the electric power industry. E3S Web of Conferences. IVth International Conference “Energy systems research” (ESR-2023), Irkutsk, Russia, vol. 470, DOI:10.1051/e3sconf/202347001042

11. Ковалев Д.В. Методы прогнозирования потребления тепловой энергии / Д.В. Ковалев, А.С. Алексеев // Энергосбережение и водоподготовка, 2020. – № 4 (126). – С. 15-20.
12. Затонский А.В. Выбор модели прогнозирования отпуска тепловой энергии / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Теплоэнергетика, 2021. – № 3. – С. 89-98.
13. Кузнецов Г.В. Численное моделирование процессов теплопереноса в системах теплоснабжения / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 95-105.
14. Затонский А.В. Выбор модели прогнозирования отпуска тепловой энергии / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Теплоэнергетика, 2021. – № 3. – С. 89-98.
15. Манусов В.З. Методы прогнозирования электрической нагрузки в распределительных сетях / В.З. Манусов, Д.А. Павлюченко // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2019. – № 1. – С. 25-29.
16. Петров В.В. Прогнозирование электрической нагрузки энергосистемы на следующие сутки с использованием метода искусственных нейронных сетей / В.В. Петров // Энергетика и автоматика, 2021. – №2. – С. 45-52.
17. Zoryna T., Yurkevich O., Kabanov P. Key drivers and barriers to digital transformation of the electric power industry in cis countries. In: Taratukhin, V., Levchenko, A., Kim, S. (eds) Cultural perspectives of human-centered and technological innovations. CPHCATI 2024. Communications in computer and information science, 2025, vol 2233, DOI:10.1007/978-3-031-77012-8_16
18. Кабанов П.А. Технология прогнозирования тепловых нагрузок на основе нейронных сетей: перспективы и опыт внедрения в Беларуси / П.А. Кабанов // Энергетическая стратегия, 2025. – №1 (103). – С. 32-37.
19. Зорина Т.Г. Развитие методов прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства Республики Беларусь с использованием методов нечеткого математического программирования / Т.Г. Зорина, И.В. Кашникова, И.Т. Богдан // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – №3 (15). – С. 111-120. – DOI:10.25729/2413-0133-2019-3-102.
20. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – Москва: Издательство МЭИ, 2019. – 472 с.
21. Mokhov V.G., Demyanenko T.S., Ostanin I.P. Modeling of energy consumption using direct propagation neural networks on the example of the Unified Energy System of Russia. Journal of computational and engineering mathematics, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 73-78.

***Зорина Татьяна Геннадьевна.*** *Доктор экономических наук, профессор. Заведующая лабораторией "Устойчивое энергетическое развитие" Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. AuthorID:84240, SPIN:1455-9834, ORCID:0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by.*

***Юркевич Ольга Ивановна.*** *Начальник сектора бизнес-планирования деятельности предприятия планово-экономического управления РУП «Витебскэнерго». AuthorID:1305673, SPIN:3990-8608, ORCID:0009-0005-8987-4533. oi.yurkevich@yandex.by.*

***Кабанов Павел Алексеевич.*** *Аспирант Белорусского национального технического университета Директор филиала «Учебный центр» РУП «Витебскэнерго». ORCID:0009-0005-5803-7695, pkabanov@gmail.com.*

---

UDC 620.9
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.007

# Optimization of tariff policy in the energy sector based on predictive modeling of heat loads using neural networks

**Tatsiana G. Zoryna[1], Olga I. Yurkevich[2], Pavel A. Kabanov[2]**

[1]Institute of power engineering of NAS of Belarus,
Belarus, Minsk, *tanyazorina@tut.by*
[2]Vitebskenergo RUE, Republic of Belarus, Vitebsk

**Abstract.** The paper presents a comprehensive study of the problem of tariff policy optimization in the energy sector of the Republic of Belarus with a proposal to introduce innovative methods of predictive modeling of heat

loads using neural networks. The authors conduct a detailed analysis of the current state of tariff policy in Belarus, identifying the key problem – a high level of cross-subsidization, with electricity tariffs for industry significantly exceeding those for households, which significantly affects the competitiveness of enterprises. The article notes that the main share of cross-subsidization in electricity tariffs for legal entities is the underpayment of consumers to the level of reasonable costs for heat energy. The study reveals the imperfection of the existing methods of heat load forecasting, which are based mainly on statistical data and do not take into account many dynamic factors. As a solution, we propose an innovative neural network forecasting technology that uses a hybrid architecture of deep neural networks combining the advantages of recurrent neural networks with long short-term memory and convolutional neural networks. The novelty of the study lies in the development of a comprehensive approach to the optimization of tariff policy through improving the accuracy of heat load forecasting, which allows to optimize the operation modes of heat generating equipment, minimize transportation losses and reduce operating costs. The authors note that the introduction of the proposed technology can reduce specific fuel consumption by 8-12% and reduce operating costs by 15-20%, creating a significant reserve for reducing tariffs without affecting the financial stability of energy companies. The results of the study have practical significance for reforming the tariff policy in the energy sector of the CIS countries and improving the competitiveness of national economies.

**Keywords:** energy sector of Belarus, heat supply, heat power engineering, heat load forecasting, predictive modeling of heat loads, neural network forecasting of heat loads, tariff policy in the energy sector, energy tariffs

## References

1. Zorina T.G., Yurkevich O.I. Analiz elektroyemkosti VVP Respubliki Belarus' pri prognozirovanii elektropotrebleniya [Analysis of GDP electricity intensity of the Republic of Belarus when forecasting electricity consumption]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 1 (29), pp. 86-98.
2. Reyting stran Yevropy po dostupnosti elektroenergii dlya naseleniya [Rating of European countries by electricity affordability for the population]. Available at: https://riarating.ru.
3. Hubert F. Perekrestnoye subsidirovaniye tarifov v elektroenergeticheskoy promyshlennosti Rossii ne tak plokho, kak yego reputatsiya [Cross-subsidization of tariffs in the Russian electric power industry is not as bad as its reputation]. Ekonomicheskiy zhurnal vysshey shkoly ekonomiki [Economic journal of the higher school of economics], 2002, vol. 6, no. 3, pp. 343-353.
4. Nazarova N.A., Minekhanova N.T. Perekrestnoye subsidirovaniye: za i protiv [Cross-subsidization: pros and cons]. Energetika Tatarstana [Energy sector of Tatarstan], 2009, no. 4, pp. 68-74.
5. Korolev I.A., Khabachev L.D. O napravleniyakh i printsipakh likvidatsii sistemy perekrestnogo subsidirovaniya v elektroenergetike [On the directions and principles of eliminating the cross-subsidization system in the electric power industry]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskiye nauki [St. Petersburg State Polytechnical university journal. Economics], 2013, no. 6-1 (185), pp. 54-64.
6. Sellyakhova O., Fateyeva E. Perekrestnoye subsidirovaniye i sotsial'naya norma elektropotrebleniya [Cross-subsidization and the social norm of electricity consumption]. Strategicheskiye resheniya i risk-menedzhment [Strategic decisions and risk management], 2012, no. 6 (75), pp. 32-49.
7. Zolotova I.V. Perekrestnoye subsidirovaniye v elektroenergetike: empiricheskiy analiz, otsenka effektivnosti sobstvennoy generatsii [Cross-subsidization in the electric power industry: empirical analysis, assessment of self-generation efficiency]. Strategicheskiye resheniya i risk-menedzhment [Strategic decisions and risk management], 2017, no. 3, pp. 70-77.
8. Gladkikh E.G., Bazarova E.A. Perekrestnoye subsidirovaniye v elektroenergetike Rossiyskoy Federatsii kak neeffektivnyy institut [Cross-subsidization in the electric power industry of the Russian Federation as an ineffective institution]. Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economics and entrepreneurship], 2016, no. 11-1 (76-1), pp. 572-577.
9. Zorina T.G., Yurkevich O.I. Tarifnaya politika v elektroenergetike respubliki Belarus': sostoyaniye, napravleniya sovershenstvovaniya, sotsial'nyye i ekonomicheskiye aspekty realizatsii [Tariff policy in the electric power industry of the Republic of Belarus: state, improvement directions, social and economic aspects of implementation]. Belorusskiy ekonomicheskiy zhurnal [Belarusian economic journal], 2024, no. 4, pp. 56-72.
10. Yurkevich O. Socio-economic consequences of changes in the tariff policy of the electric power industry. E3S Web of Conferences. IVth International Conference “Energy systems research” (ESR-2023), Irkutsk, Russia, vol. 470. DOI:10.1051/e3sconf/202347001042.
11. Kovalev D.V., Alekseev A.S. Metody prognozirovaniya potrebleniya teplovoy energii [Methods for forecasting heat energy consumption]. Energosberezheniye i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment], 2020, no. 4 (126), pp. 15-20.

12. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. Vybor modeli prognozirovaniya otpuska teplovoy energii [Choosing a model for forecasting heat energy supply]. Teploenergetika [Thermal engineering], 2021, no. 3, pp. 89-98.
13. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. Chislennoye modelirovaniye protsessov teploperenosa v sistemakh teplosnabzheniya [Numerical modeling of heat transfer processes in district heating systems]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering], 2018, vol. 329, no. 8, pp. 95-105.
14. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. Vybor modeli prognozirovaniya otpuska teplovoy energii [Choosing a model for forecasting heat energy supply]. Teploenergetika [Thermal engineering], 2021, no. 3, pp. 89-98.
15. Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A. Metody prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki v raspredelitel'nykh setyakh [Methods for forecasting electrical load in distribution networks]. Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical engineering industry], 2019, no. 1, pp. 25-29.
16. Petrov V.V. Prognozirovaniye elektricheskoy nagruzki energosistemy na sleduyushchiye sutki s ispol'zovaniyem metoda iskusstvennykh neironnykh setey [Forecasting the power system load for the next day using the artificial neural networks method]. Energetika i avtomatika [Energy and automation], 2021, no. 2, pp. 45-52.
17. Zoryna T., Yurkevich O., Kabanov P. Key drivers and barriers to digital transformation of the electric power industry in cis countries. In: Taratukhin, V., Levchenko, A., Kim, S. (eds) Cultural perspectives of human-centered and technological innovations. CPHCATI 2024. Communications in computer and information science, 2025, vol 2233, DOI: 10.1007/978-3-031-77012-8_16
18. Kabanov P.A. Tekhnologiya prognozirovaniya teplovykh nagruzok na osnove neironnykh setey: perspektivy i opyt vnedreniya v Belarusi [Neural network-based heat load forecasting technology: prospects and implementation experience in Belarus]. Energeticheskaya strategiya [Energy strategy], 2025, no. 1 (103), pp. 32-37.
19. Zorina T.G., Kashnikova I.V., Bogdan I.T. Razvitiye metodov prognozirovaniya optimal'noy struktury energoproizvodstva Respubliki Belarus' s ispol'zovaniyem metodov nechetkogo matematicheskogo programmirovaniya [Development of methods for forecasting the optimal structure of energy production in the Republic of Belarus using fuzzy mathematical programming methods]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3 (15), pp. 111-120, DOI:10.25729/2413-0133-2019-3-102.
20. Sokolov E.Ya. Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnik dlya vuzov [District heating and heat networks: a textbook for universities]. Moscow: Izdatel'stvo MEI [Moscow power engineering institute publishing house], 2019, 472 p.
21. Mokhov V.G., Demyanenko T.S., Ostanin I.P. Modeling of energy consumption using direct propagation neural networks on the example of the Unified Energy System of Russia. Journal of computational and engineering mathematics, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 73-78.

***Zoryna Tatsiana Gennadyevna.*** *Doctor of Economics, Professor. Head of the Laboratory "Sustainable Energy Development" of the Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus. AuthorID: 84240, SPIN: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by.*

***Yurkevich Olga Ivanovna.*** *Head of the Business Planning Sector for the Enterprise Activities of the Planning and Economic Management of RUE "Vitebskenergo". AuthorID:1305673, SPIN:3990-8608, ORCID:0009-0005-8987-4533, oi.yurkevich@yandex.by.*

***Kabanov Pavel Alekseevich.*** *Postgraduate student of the Belarusian National Technical University Director of the branch "Training Center" of RUE "Vitebskenergo". ORCID:0009-0005-5803-7695. pkabanov@gmail.com.*

*Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 18.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.*

*The article was submitted 06/11/2025; approved after reviewing 06/18/2025; accepted for publication 06/25/2025.*

УДК 621.311.17
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.008

# Оценка эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов

**Северина Яна Дмитриевна[1], Шакиров Владислав Альбертович[2]**

[1]Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *yan.sewerina2910@yandex.ru*
[2]Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск

**Аннотация.** В настоящее время применение автономных гибридных энергокомплексов (ГЭК), сочетающих дизельные генераторы и возобновляемые источники энергии, является эффективным направлением повышения эффективности электроснабжения потребителей изолированных и труднодоступных территорий. Создание ГЭК сопряжено с необходимостью решения оптимизационной задачи, в рамках которой требуется определить оптимальный состав оборудования и их установленных мощностей в условиях многокритериальности. При многокритериальном решении задачи в большинстве исследований применяется двухуровневый подход: на верхнем уровне проводится формирование оптимальных по Парето конфигураций ГЭК с помощью эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации, а на нижнем уровне выполняется моделирование функционирования каждой рассматриваемой конфигурации ГЭК для детальной оценки каждого решения по ряду критериев. Существует большое количество эвристических алгоритмов, применяемых на верхнем уровне для планирования развития энергетических систем и комплексов, которые обладают как достоинствами, так и недостатками, что создает сложности при выборе алгоритма. В данном исследовании представлена оценка эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации на основе эволюционных алгоритмов, таких, как NSGA-II, NSGA-III, AGE-MOEA и MOEA/D с использованием среды Python и библиотеки Pymoo. Для сравнения алгоритмов применялись показатели, оценивающие: равномерность множества Парето; расстояние между истинным множеством Парето и Парето-множеством, формируемым эвристическим алгоритмом; эффективность алгоритма в отношении достижения лучших критериальных оценок; затраты времени на формирование множества Парето. Оценка алгоритмов оптимизации была проведена на примере решения задачи развития гибридного энергокомплекса в удаленном районе Сахалинской области. По результатам оценки алгоритмов для многокритериальной оптимизации состава оборудования ГЭК на верхнем уровне двухуровневого подхода следует выбрать эвристический алгоритм NSGA-II, так как он позволяет получить множество Парето высокого качества, обеспечить достижение минимальных оценок по критериям с использованием меньшего времени по сравнению с другими алгоритмами.

**Ключевые слова:** эвристические алгоритмы; многокритериальная оптимизация; гибридные энергетические комплексы; множество Парето

**Цитирование:** Северина Я.Д. Оценка эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов / Я.Д. Северина, В.А. Шакиров // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 88-103. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.008.

**Введение**. В настоящее время более 60% территории России находится в зоне децентрализованного электроснабжения, где потребители получают питание от автономных дизельных электростанций. К таким районам относятся изолированные и труднодоступные территории Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов [1].

В связи с суровыми климатическими условиями, низким уровнем развития транспортной инфраструктуры, а также рассредоточенностью большого количества потребителей малой мощности для повышения надежности, экономической и экологической эффективности целесообразно развитие энергетических систем таких территорий на основе использования местных и возобновляемых энергоресурсов. Эффективным направлением является создание гибридных энергетических комплексов (ГЭК) на базе дизельных электростанций с

дополнением их генерирующими установками на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителями.

Планирование развития ГЭК сопряжено с необходимостью решения многокритериальной оптимизационной задачи, в рамках которой необходимо определить оптимальный состав источников и накопителей энергии, их установленные мощности и емкость в соответствии с технико-экономическими и экологическими критериями. Задача усложняется стохастическим характером генерации ВИЭ, технологическими ограничениями накопителей энергии и дизельных генераторов, поэтому в большинстве исследований для решения задачи определения оптимального состава оборудования ГЭК в условиях многокритериальности применяется двухуровневый подход [2, 3]. На верхнем уровне проводится многокритериальная оптимизация мощности энергоисточников и емкости накопителей ГЭК с использованием, как правило, эвристических алгоритмов, таких, как генетический алгоритм, рой частиц, стая сальп и другие, принцип действия которых основан на имитации поведения «живых» систем. В результате применения алгоритма оптимизации верхнего уровня формируется множество Парето из недоминируемых альтернатив – конфигураций ГЭК. Каждая альтернатива превосходит другие альтернативы множества хотя бы по одному критерию и потенциально может быть выбрана в качестве эффективного решения. Для оценки альтернатив по части критериев необходимо моделировать функционирование ГЭК с почасовой детализацией. Для этого на нижнем уровне применяются имитационные модели или модели на основе линейного (LP) или смешанного целочисленного линейного (MILP) программирования [4, 5]. Из полученного на основе такого подхода множества Парето лицо, принимающее решение (ЛПР), может окончательно выбрать наиболее предпочтительную конфигурацию ГЭК с использованием многокритериальных методов принятия решений, например, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) или AHP (Analytic Hierarchy Process).

В подавляющем большинстве исследований по оптимизации состава оборудования ГЭК не проводятся предварительное сравнение и выбор эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для верхнего уровня, хотя они значительно отличаются по эффективности. В данном исследовании будет выполнено сравнение четырех алгоритмов в рамках двухуровневого подхода на примере развития ГЭК в удаленном районе Сахалинской области.

**Методы и алгоритмы оптимизации для решения задачи оптимизации состава оборудования ГЭК.** Многие исследования посвящены многокритериальной оптимизации состава оборудования гибридных энергокомплексов с использованием эвристических алгоритмов на верхнем уровне двухуровневого подхода. В статье [6] для нахождения оптимальной конфигурации ГЭК с минимальными значениями нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и недоотпуском электроэнергии (LPSP) используется генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II), в основе которого, как и у однокритериального генетического алгоритма, лежит процесс естественного отбора и эволюции. В исследовании [7] применяется многокритериальная оптимизация методом роя частиц (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO), принцип действия которого основан на поиске в пространстве решений группой частиц (стая птиц, пчел и т.д.), обменивающихся между собой своей текущей наилучшей позицией. В работе [8] для выбора конфигурации ГЭК с минимальными значениями стоимости электроэнергии и потерь мощности используется комбинация оптимизационных методов, таких как MOPSO и SSO (Social Spider Optimization) – алгоритма, основанного на поведении социальных пауков. В статье [9] для определения установленных мощностей оборудования гибридной энергосистемы был использован алгоритм гравитационного поиска (Gravitational

Search Algorithm, GSA), основанный на законах гравитации и взаимодействии масс. В работе [10] применяется метаэвристическая многокритериальная оптимизация состава ГЭК на основе комбинации метода роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) и многокритериального алгоритма по схеме «Лидер-последователь» (MO leaders-and-follower, MO-LaF), который основан на использовании двух популяций (наборов решений), состоящих из «лидеров» и «последователей».

Как было отмечено ранее, для оптимизации функционирования гибридного энергокомплекса на нижнем уровне применяются имитационное моделирование и модели на основе LP и MILP. В исследовании [11] используется модель на основе MILP для определения конфигурации гибридной энергосистемы с наименьшими значениями суммарных затрат и выбросов углекислого газа. В работе [5] представлена реализованная в MATLAB модель на основе MILP, которая позволяет определить рациональный состав оборудования автономной энергосистемы для удовлетворения спроса на электроэнергию и снижения зависимости от ископаемого топлива. В работе [12] используется оптимизационная модель гибридной энергосистемы на основе LP для минимизации капитальных затрат в зависимости от спроса на энергию и установленной мощности источника. В исследованиях [13, 14] для определения оптимального состава гибридного энергокомплекса на верхнем уровне используются генетический алгоритм и метод роя частиц, а для оптимизации функционирования на нижнем уровне – имитационное моделирование.

Таким образом, для решения задачи планирования развития ГЭК существует достаточно большое количество оптимизационных методов и алгоритмов, которые обладают как достоинствами, так и недостатками, что создает сложности при выборе подходящих методов для использования двухуровневого подхода.

Например, прежде чем выбрать эвристический алгоритм многокритериальной оптимизации для определения рациональных установленных мощностей ГЭК на верхнем уровне, необходимо оценить его эффективность на основе анализа формируемого множества Парето. Существует достаточно большое количество показателей для проведения такой оценки, но исследований, связанных с оценкой эвристического алгоритма перед его применением для решения оптимизационных задач в энергетике, немного [13, 15]. В большинстве исследований такая оценка не выполняется [16, 17].

Таким образом, в связи с проблемой выбора методов для верхнего уровня двухуровневого подхода при решении задачи оптимизации состава оборудования ГЭК, в статье представлен сравнительный анализ эвристических алгоритмов.

**Методика оценки эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для выбора состава ГЭК.** Сравнительный анализ эвристических алгоритмов оптимизации был проведен на примере выбора состава оборудования ГЭК в удаленном районе Сахалинской области, где имеется большое разнообразие вариантов развития ГЭК и высокий потенциал ВИЭ. В рассматриваемом энергорайоне «Новиково», расположенном на Тонино-Анивском полуострове, электроснабжение осуществляется от дизельных электростанций. При создании ГЭК и оптимизации состава оборудования на верхнем уровне рассматривались следующие источники энергии: ветровая (ВЭС) и солнечная (СЭС) электростанции, так как исследуемая территория располагает высоким ветроэнергетическим и гелиоэнергетическим потенциалом, а также дизель-генераторная установка (ДГУ) и аккумуляторные батареи (АКБ) для накопления избыточной энергии ВИЭ и повышения надежности электроснабжения потребителей. На нижнем уровне решения задачи используется имитационная модель функционирования ГЭК, ранее представленная в работе [18]. Моделирование осуществлялось для каждой из конфигураций ГЭК в течение расчетного периода 8760 часов.

В рамках двухуровневого подхода на верхнем уровне проводится формирование конфигурации ГЭК одним из эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации, а на нижнем уровне проводится имитационное моделирование функционирования каждой конфигурации, что позволяет детально оценить каждый вариант решения по ряду критериев на основе графика покрытия нагрузки каждым источником. На рисунке 1 в качестве примера представлен фрагмент графика покрытия нагрузки одним из возможных вариантов ГЭК.

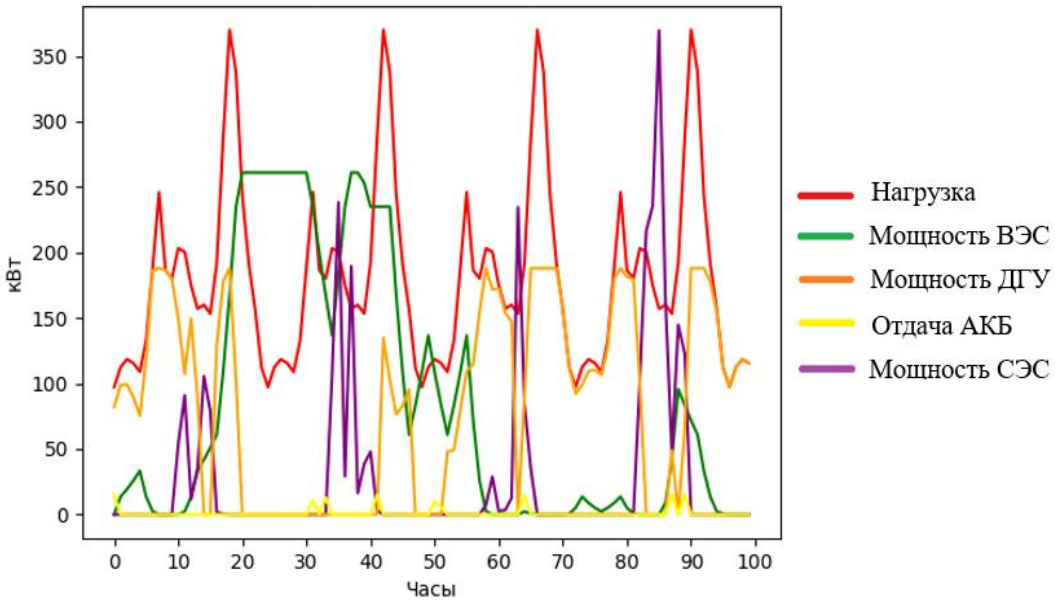



**Рис. 1.** График покрытия нагрузки энергорайона «Новиково»

Для сравнения эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации на верхнем уровне были выбраны: генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой NSGA-II, NSGA-III (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm), адаптивный алгоритм AGE-MOEA (Adaptive Geometry Estimation based Many Objectives Evolutionary Algorithm) и алгоритм многокритериальной оптимизации, основанный на методе декомпозиции MOEA/D (Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition) [19, 20, 21]. Эти алгоритмы были выбраны для анализа, так как они основаны на процессе естественного отбора и эволюции, имеют одинаковые параметры для настройки, а также путем подбора, комбинирования и селекции искомых величин формируют множество оптимальных по Парето альтернатив. Отличительной особенностью NSGA-II является использование принципов недоминируемой сортировки и оценки скученности решений (crowding distance) для получения разнообразных решений [22]. Алгоритм NSGA-III является расширением NSGA-II, отличается применением опорных точек на стадии селекции и формирования новых популяций для повышения разнообразия пространства недоминируемых решений. Алгоритм AGE-MOEA в целом схож с алгоритмом NSGA-II, но использует другой подход для оценки скученности решений и применяет итерационный метод Ньютона-Рафсона для решения нелинейного уравнения, задающего условие нахождения наиболее близкой к идеалу точки [23]. Алгоритм MOEA/D разделяет многокритериальную задачу оптимизации на ряд скалярных подзадач и оптимизирует их одновременно [24].

Для реализации рассмотренных алгоритмов необходимо задать гены, которые представляют собой искомые оптимизируемые параметры. Далее формируется начальная популяция особей, имеющих отличия в генах. В процессе реализации алгоритма проводится оценка особей популяции, их селекция для скрещивания и образования новых поколений. Также для повышения разнообразия решений используются различные варианты мутации. В проведенном исследовании в качестве генов были заданы установленные мощности

источников энергии и емкость АКБ. Популяция представляет собой набор альтернатив – конфигураций ГЭК, каждая из которых может являться потенциально лучшим выбором для ЛПР. Для оценки решений, селекции и формирования новых поколений используются рассмотренные ниже критерии.

Многоцелевая оптимизация выполнялась по трем критериям:

1. Нормированная стоимость электроэнергии LCOE (Levelized Cost of Energy), $/кВт·ч:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=25}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=25}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (1)$$

где $I_t$ – инвестиционные затраты в $t$-ый год; $M_t$ – эксплуатационные затраты в $t$-ый год, $F_t$ – затраты на топливо в $t$-ый год, $E_t$ – производство электроэнергии в $t$-ый год, $r$ – ставка дисконтирования, $n$ – жизненный цикл ГЭК, принятый 25 лет.

2. Расход дизельного топлива, т:

$$V_{\text{д.т.}} = m_{\text{у.т.}} \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{t=1}^{8760} W_{\text{ДЭС}}(t), \quad (2)$$

где $m_{\text{у.т.}}$ – удельный расход топлива, принятый 200 г/кВт·ч; $\sum_{t=1}^{8760} W_{\text{ДЭС}}(t)$ – суммарная выработка ДЭС за весь период моделирования, кВт·ч.

3. Доля избыточной энергии EEF (Excess energy fraction), %:

$$EEF = \frac{\sum_{t=1}^{8760}(N_{\text{сумм}}(t) - P_{\text{нагр}}(t))}{\sum_{t=1}^{8760} P_{\text{нагр}}(t)} \cdot 100\ \%, \quad (3)$$

где $\sum_{t=1}^{8760} N_{\text{сумм}}(t)$ – суммарная выработка всеми источниками энергии за весь период моделирования, кВт·ч; $\sum_{t=1}^{8760} P_{\text{нагр}}(t)$ – суммарная нагрузка за весь период моделирования, кВт·ч.

Эвристические методы оптимизации обеспечивают получение не истинного множества Парето, а приближенного к нему множества. В связи с этим возникает потребность в оценке того, насколько формируемые множества близки к Парето-оптимальному множеству. Кроме того, формируемые множества могут быть неоднородны, что также снижает эффективность поиска решений. Поэтому существуют специальные показатели [25, 26], которые позволяют оценить методы и алгоритмы формирования множества Парето.

Оценка производительности алгоритмов NSGA-II, NSGA-III, AGE-MOEA и MOEA/D и качества получаемых множеств Парето осуществлялась в среде Python с использованием библиотеки Pymoo [27] по следующим показателям:

1. Расстояние GD (Generational Distance). Данный показатель измеряет расстояние между каждым Парето-оптимальным решением, полученным эвристическим алгоритмом, и ближайшим решением истинного множества Парето:

$$GD(X) = \frac{1}{|X|}\left(\sum_{i=1}^{|X|} d_i^p\right)^{\frac{1}{p}}, \quad (4)$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{|X|}\}$ – Парето-множество, полученное эвристическим алгоритмом; $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{|z|}\}$ – истинное Парето-множество решений; $d_i$ – Евклидово расстояние ($p = 2$) между любой точкой $x_i$ и любой точкой $Z$.

2. Модифицированное расстояние GD+ (Generational Distance Plus):

$$GD^+(X) = \frac{1}{|X|}\left(\sum_{i=1}^{|X|} d_i^{+2}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где $d_i^+ = max\{x_i - z_i, 0\}$ – расстояние от любого решения $x_i$ множества $X$ до ближайшего решения $z_i$ Парето-оптимального множества $Z$ с учетом доминирования. Модифицированный показатель более точно характеризует качество Парето-фронта, так как при оценивании расстояния учитывает отношение доминирования между решениями.

Следует отметить, что чем меньше значение показателей (4) и (5), тем ближе полученное множество решений к истинному Парето-оптимальному множеству решений.

3. Обратное расстояние IGD (Inverted Generational Distance). Этот показатель измеряет расстояние между решениями истинного Парето-оптимального множества $Z$ и ближайшим решением из Парето множества $X$, сформированного эвристическим алгоритмом:

$$IGD(X) = \frac{1}{|Z|}\left(\sum_{i=1}^{|Z|} \hat{d}_i^p\right)^{\frac{1}{p}}, \tag{6}$$

где $\hat{d}_i$ – Евклидово расстояние $(p = 2)$ между $z_i$ Парето-оптимального множества $Z$ и ближайшим решением множества $X$.

4. Модифицированное обратное расстояние IGD+ (Inverted Generational Distance Plus).Этот показатель измеряет расстояния между решениями Парето-оптимального множества и Парето-множества, сформированного эвристическим алгоритмом, но с проверкой доминирования между решениями:

$$IGD^+(X) = \frac{1}{|Z|}\left(\sum_{i=1}^{|Z|} d_i^{+2}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{7}$$

где $d_i^+ = max\{x_i - z_i, 0\}$ –расстояние между решением $z_i$ оптимального Парето-фронта $Z$ и ближайшим решением $x_i$ множества $X$ с учетом доминирования.

Чем меньше значение показателей (6) и (7), тем ближе полученное множество решений к Парето-оптимальному множеству.

5. Показатель распределения решений в пространстве (Spacing). Данный показатель оценивает равномерность распределения множества Парето в пространстве:

$$Spacing = \left[\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \left(\bar{d} - d_i\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{8}$$

где $d_i$ – минимальное расстояние от $i$-го решения до ближайшего решения из рассматриваемого множества:

$$d_i = min_{j \neq i}\left(\left|f_1(x_i) - f_1(x_j)\right| + \left|f_2(x_i) - f_2(x_j)\right| + \left|f_3(x_i) - f_3(x_j)\right|\right), \qquad i, j = 1, \dots, N \tag{9}$$

где $\bar{d}$ – среднее расстояние между решениями $d_i$; $f_n(x_i), f_n(x_j)$, – $i$-ое и $j$-ое решения множества Парето по $n$ критерию; $N$ – количество решений;

6. Модифицированный показатель распределения решений в пространстве (Advanced spacing) отличается подходом к нормализации расстояний и использует предварительное упорядочивание решений по оценкам одного из критериев [28]:

$$ASpacing = \left[\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \left(1 - \frac{d_i}{\bar{d}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{10}$$

где $d_i$ – расстояние между решениями, полученными в результате предварительного упорядочивания:

$$d_i = \sqrt{\left(f_1(x_i) - f_1(x_{i+1})\right)^2 + \left(f_2(x_i) - f_2(x_{i+1})\right)^2 + \left(f_3(x_i) - f_3(x_{i+1})\right)^2}, \tag{11}$$

Чем меньше значение показателей (8) и (10), тем равномернее распределено множество Парето в пространстве [28].

7. Относительное расстояние между решениями HRS (Hole Relative Size). Данный показатель позволяет вычислить наибольшее расстояние между соседними решениями в пространстве, что отражает равномерность полученного множества. Для возможности сопоставления расстояние нормализируется путем деления его на среднее расстояние между решениями:

$$HRS = \frac{maxd_i}{\bar{d}}, \tag{12}$$

где $d_i$ – максимальное расстояние между соседними решениями, $\bar{d}$ – среднее расстояние между решениями.

Меньшее значение показателя $HRS$ соответствует более равномерному распределению решений множества Парето в пространстве.

8. Количество решений (Cardinality):

$$Cardinality = |X|, \tag{13}$$

где $|X|$– количество решений, составляющих множество Парето. Различные эвристические алгоритмы формируют множество Парето с различным числом решений. Чем больше решений, тем эффективнее работа алгоритма.

9. Лучшее значение критерия, достигнутое алгоритмом по каждому из критериев. Используемые в работе критерии (1) – (3) направлены на минимизацию оценок:

$$F_{\min\,(k)} = min\big(f_k(x_i)\big), i = 1, \dots, N, \tag{14}$$

где $f_k(x_i)$ – оценка $i$-го решения по $k$-му критерию (*LCOE*, $V_{\text{д.т.}}$ *EEF*).

Показатели $Spacing$, $ASpacing$, $HRS$, $Cardinality$ и $F_{min}$ проводят оценку непосредственно самого полученного множества Парето, в то время как показатели $GD$, $GD+$, $IGD$, $IGD+$ сравнивают полученные эвристическим методом множества Парето с истинным Парето-оптимальным множеством.

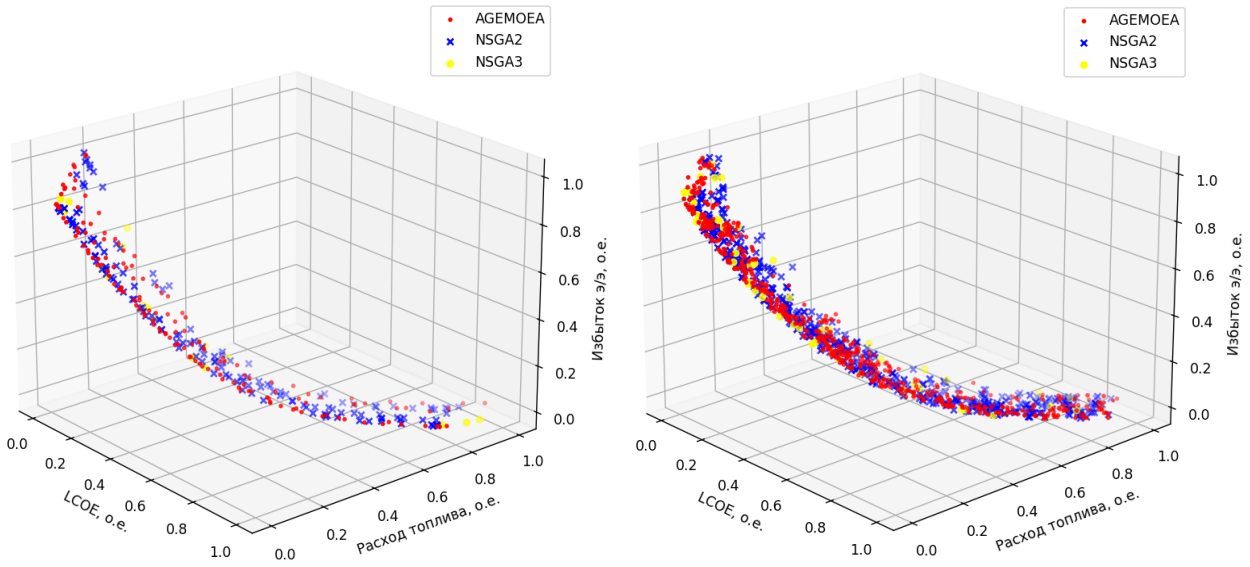
При решении многокритериальной оптимизационной задачи зачастую Парето-оптимальное множество неизвестно, поэтому его получают искусственным путем [29]. Одним из таких способов является объединение результатов нескольких запусков алгоритма с настройками, обеспечивающими более глубокий поиск и большие затраты вычислительных ресурсов. Далее из полученного объединенного множества исключаются доминируемые решения, т.е. заведомо худшие решения, которые по всем трем критериям имеют оценки хуже, чем другие решения.

Как правило, при настройке алгоритма изменяют численность популяции (pop_size) и количество поколений (n_gen). При использовании эвристических алгоритмов для конкретных задач сложно определить, при каких значениях pop_size и n_gen алгоритм обеспечит лучшие решения. Например, эффективность может быть выше при большом значении популяции и маленьком количестве поколений или, наоборот, при маленьком значении популяции и большом количестве поколений. В выполненном исследовании оптимальный Парето-фронт был получен путем объединения результатов двух запусков алгоритмов с вышеописанным подходом к заданию параметров.

На рисунке 2 (а) представлено множество Парето, полученное при объединении результатов NSGA-II, NSGA-III и AGE-MOEA. У всех алгоритмов были выставлены одинаковые настройки: pop_size = 50 и n_gen = 100. На рисунке 2 (б) представлено множество Парето, полученное при объединении результатов NSGA-II, NSGA-III и AGE-MOEA при настройках pop_size = 200 и n_gen = 10.

На рисунке 3 (а) представлено множество Парето, полученное при объединении результатов двух множеств. На рисунке 3 (б) представлено Парето-оптимальное множество,

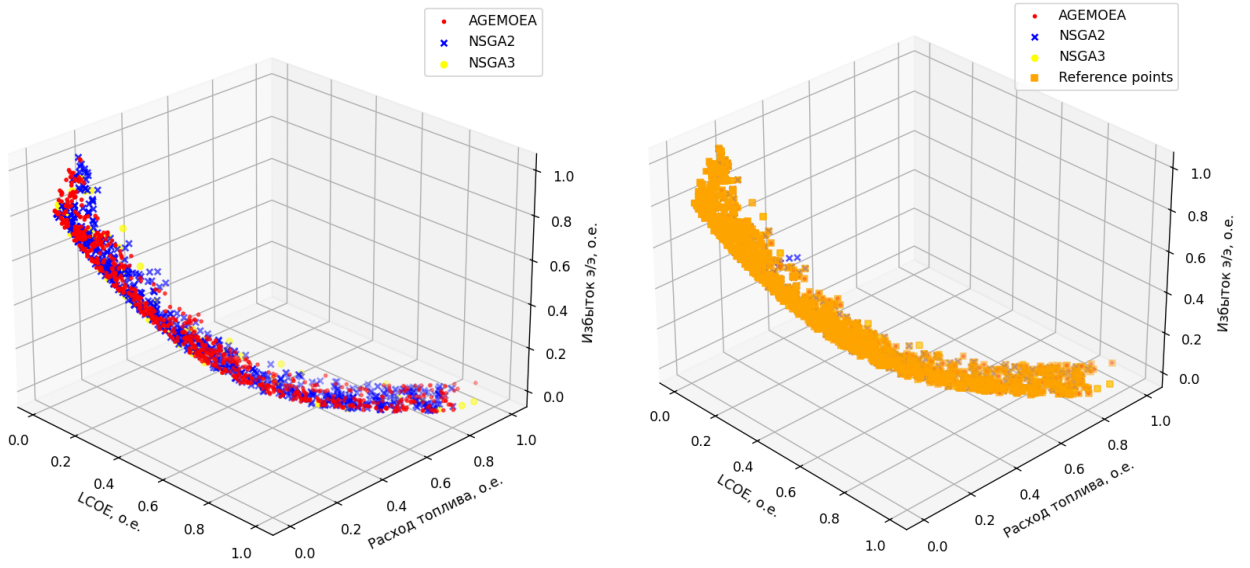
полученное в результате исключения доминируемых решений, т.е. тех решений, которые хуже по всем трем критериям.




а) б)

**Рис. 2.** Множество Парето при настройках алгоритма:
а) pop_size = 50 и n_gen = 100, б) pop_size = 200 и n_gen = 10

Как видно из рис. 3, несколько значений, полученных NSGA-II, не вошли в объединенное Парето-оптимальное множество (Reference Points), так как имеют наибольшие значения по всем трем критериям относительно других решений.

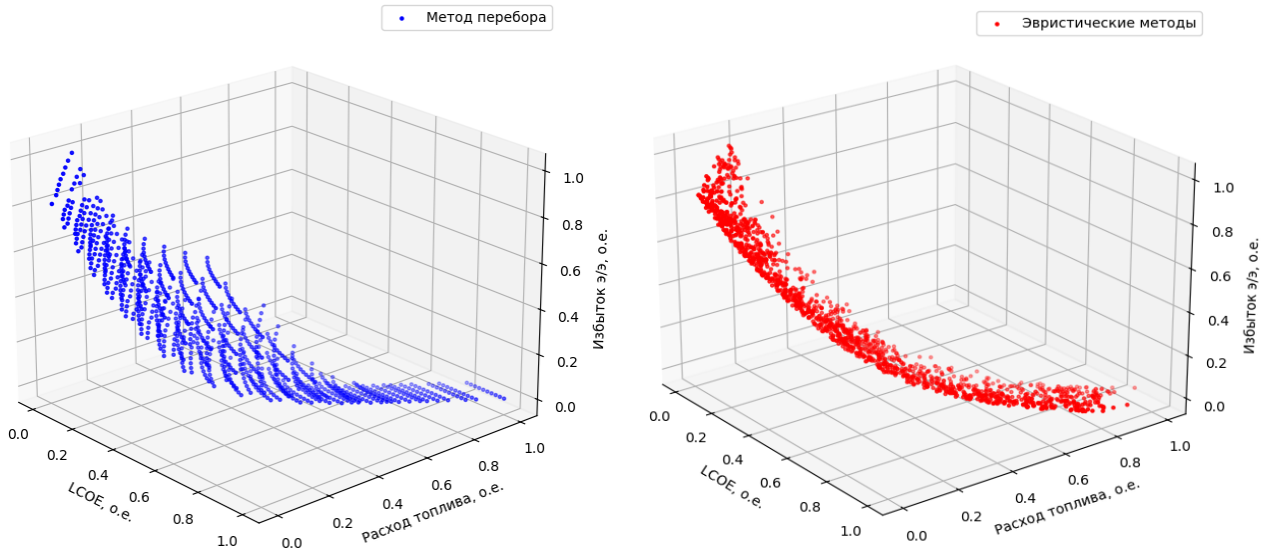



а) б)

**Рис. 3.** Множество Парето в результате объединения двух множеств:
а) без исключения доминируемых решений, б) с исключением доминируемых решений (Парето-оптимальное множество)

Для сравнения было сформировано истинное Парето-оптимальное множество с помощью метода полного перебора вариантов состава оборудования ГЭК в пределах от 0 до 500 с шагом 50 (рис. 4 (а)). На рисунке 4 (б) представлено объединенное Парето-оптимальное множество решений, полученное путем объединения результатов эвристических алгоритмов.

На рисунке 5 представлено сравнение Парето-оптимальных множеств, полученных при использовании метода перебора и путем объединения множеств нескольких запусков эвристических алгоритмов.




а) б)

**Рис. 4.** Парето-оптимальные множества, полученные:
а) методом перебора; б) объединением результатов эвристических алгоритмов

Как видно из рис. 5, распределение решений имеет в целом схожий характер, что позволяет сделать вывод о возможности использования подхода к замене истинного Парето-оптимального множества объединенным.

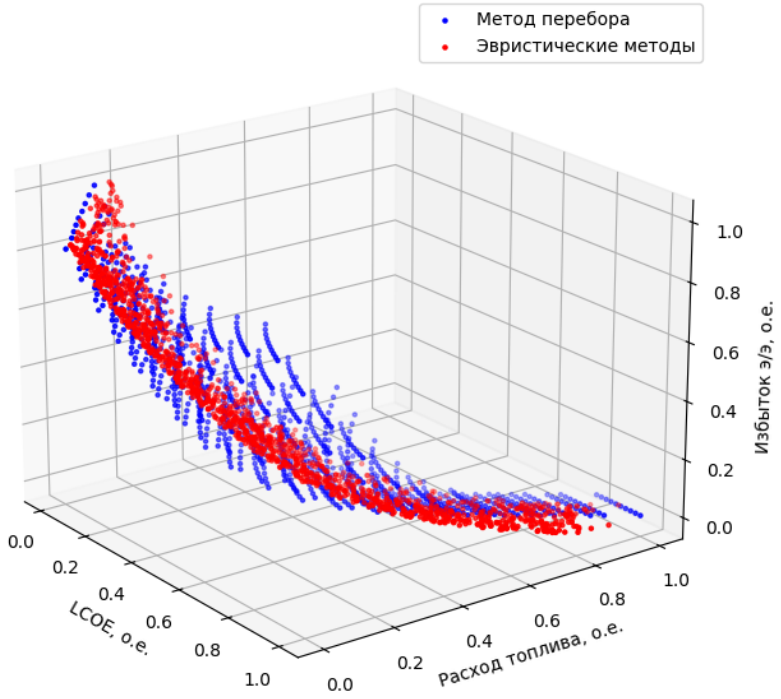
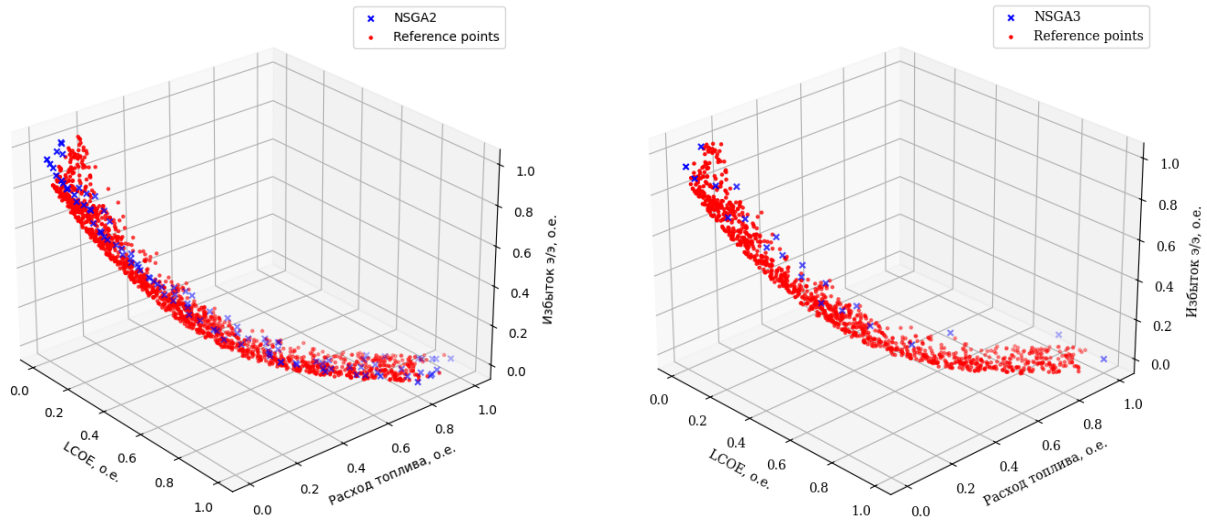



**Рис. 5.** Сравнение результатов метода перебора и эвристики

После формирования объединенного и истинного Парето-оптимального множества были выполнены три запуска каждого алгоритма с целью оценки показателей качества получаемых решений. На рисунке 6 представлен результат распределения множества решений одного из запусков алгоритмов NSGA-II (рис. 6 (а) и NSGA-III (рис. 6 (б) относительно объединенного Парето-оптимального множества.




а) б)

**Рис. 6.** Распределение множества решений относительно Парето-оптимального множества для: а) NSGA-II; б) NSGA-III

Результаты расчета показателей (4) – (14) для трех запусков алгоритмов NSGA-II и NSGA-III представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты расчета показателей для алгоритмов NSGA-II и NSGA-III

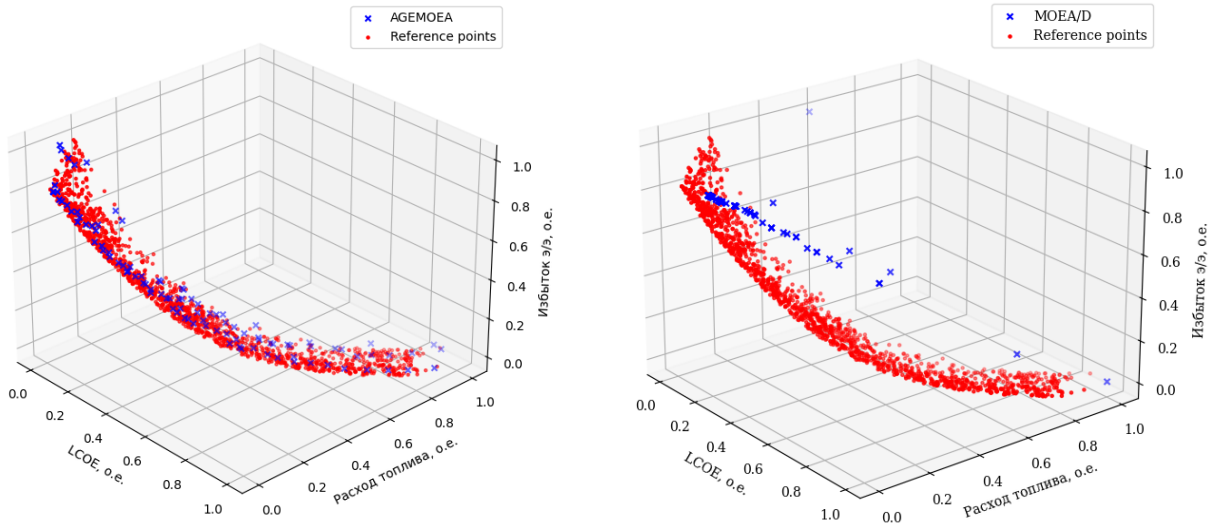
| Показатель/ Номер запуска | NSGA-II | | | NSGA-III | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1. GD | 0,021 | 0,018 | **0,014** | 0,024 | 0,061 | 0,029 |
| 2. GD+ | 0,009 | **0,003** | 0,005 | 0,019 | 0,054 | 0,018 |
| 3. IGD | 0,035 | **0,031** | 0,032 | 0,094 | 0,099 | 0,077 |
| 4. IGD+ | 0,025 | **0,007** | 0,013 | 0,055 | 0,082 | 0,038 |
| 5. Spacing | **1,764** | 2,308 | 2,149 | 146,23 | 69,125 | 161,44 |
| 6. ASpacing | **0,937** | 1,063 | 0,941 | 1,927 | 1,412 | 1,783 |
| 7. HRS | 6,185 | 6,681 | **5,371** | 8,746 | 6,432 | 8,076 |
| 8. Cardinality | **100** | **100** | **100** | 20 | 19 | 19 |
| 9. $F_1$ min (LCOE, \$/кВт·ч) | 0,144 | 0,143 | **0,140** | 0,142 | 0,144 | 0,143 |
| 10. $F_2$ min ($V_{д.т.}$, т) | 116,29 | 120,83 | **116,29** | 117,26 | 118,87 | 117,7 |
| 11. $F_3$ min (EEF, %) | **0** | **0** | **0** | **0** | 0,0096 | **0** |
| 12. Затраты времени | 44 мин. 6 с. | **42 мин. 39 с.** | 45 мин. 32 с. | 58 мин. 59 с. | 44 мин. 12 с. | 1 час 3 мин. |

** жирным шрифтом выделены лучшие оценки*

На рисунке 7 представлен результат распределения множества решений одного из запусков алгоритмов AGE-MOEA (рис. 7 (а) и MOEA/D (рис. 7 (б) относительно объединенного Парето-оптимального множества.

Результаты расчета показателей (4) – (14) для трех запусков алгоритмов AGE-MOEA и MOEA/D представлены в таблице 2.

Также была выполнена оценка всех алгоритмов относительно истинного Парето-оптимального множества, полученного методом перебора. Так как качество распределения решений Парето-множеств каждого алгоритма уже было оценено в таблицах 1-2 и не зависит от сопоставления с истинным Парето-множеством, то в таблице 3 представлены только показатели (4) – (7), зависящие от расстояний между сравниваемыми множествами.




а) б)

**Рис. 7.** Распределение множества решений относительно объединенного Парето-оптимального множества: а) AGE-MOEA; б) MOEA/D

**Таблица 2**. Результаты расчета показателей для алгоритмов AGE-MOEA и MOEA/D

| Показатель/ Номер запуска | AGE-MOEA | | | MOEA/D | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1. GD | **0,011** | 0,022 | 0,013 | 0,172 | 0,152 | 0,167 |
| 2. GD+ | **0,003** | 0,011 | 0,004 | 0,17 | 0,118 | 0,151 |
| 3. IGD | **0,026** | 0,036 | 0,029 | 0,255 | 0,329 | 0,289 |
| 4. IGD+ | **0,011** | 0,022 | 0,013 | 0,250 | 0,305 | 0,257 |
| 5. Spacing | 2,693 | 4,894 | 7,558 | **0,018** | 0,038 | 0,026 |
| 6. ASpacing | **1,191** | 1,507 | 1,8502 | 3,184 | 3,794 | 3,553 |
| 7. HRS | **6,385** | 13,009 | 16,941 | 22,795 | 30,081 | 26,893 |
| 8. Cardinality | **100** | **100** | **100** | 90 | 87 | 89 |
| 9. $F_1$ min (LCOE, \$/кВт·ч) | 0,144 | **0,141** | 0,142 | 0,144 | 0,145 | 0,145 |
| 10. $F_2$ min ($V_{д.т.}$, т.) | 121,19 | 118,45 | 119,36 | **114,25** | 114,25 | 114,25 |
| 11. $F_3$ min (EEF, %) | **0** | **0** | **0** | 0,94 | 0,94 | 0,95 |
| 12. Затраты времени | 55 мин. 42 с. | **45 мин. 42 с.** | 59 мин. 45 с. | 1 час 11 мин. | 1 час 12 мин. | 1 час 4 мин. |

* *жирным шрифтом выделены лучшие оценки*

**Таблица 3.** Результаты расчета показателей GD, GD+, IGD, IGD+ для всех алгоритмов

| Показатели | NSGA-II | NSGA-III | AGE-MOEA | MOEA/D |
|---|---|---|---|---|
| 1. GD | 0,029 | 0,028 | 0,026 | 0,168 |
| 2. GD+ | 0,008 | 0,004 | 0,005 | 0,152 |
| 3. IGD | 0,069 | 0,103 | 0,063 | 0,333 |
| 4. IGD+ | 0,044 | 0,041 | 0,036 | 0,326 |

Результаты таблицы 3 показывают, что алгоритм AGE-MOEA является более эффективным, в то же время NSGA-II и NSGA-III показывают близкие результаты. На основе оценок таблиц 1-3 для окончательного сопоставления были выбраны NSGA-II и AGE-MOEA (таблица 4).

**Таблица 4**. Сравнительный анализ алгоритмов NSGA-II и AGE-MOEA

| Показатели | NSGA-II | AGE-MOEA |
|---|---|---|
| 1. GD | 0,014 | **0,011** |
| 2. GD+ | **0,003** | **0,003** |
| 3. IGD | 0,031 | **0,026** |
| 4. IGD+ | **0,007** | 0,011 |
| 5. Spacing | **1,764** | 2,693 |
| 6. ASpacing | **0,937** | 1,507 |
| 7. HRS | **5,371** | 6,385 |
| 8. Cardinality | **100** | **100** |
| 9. $F_1$ min (LCOE, о.е.) | **0,140** | 0,141 |
| 10. $F_2$ min ($V_{д.т.}$, т.) | **116,29** | 118,45 |
| 11. $F_3$ min (EEF, %) | 0 | 0 |
| 12. Затраты времени | **42 мин. 39 с.** | 45 мин. 42 с. |

* *жирным шрифтом выделены лучшие оценки*

В результате сравнительного анализа, представленного в таблице 4, множество решений, полученных алгоритмом AGE-MOEA, расположено ближе как к истинному, так и к объединенному Парето-оптимальному множеству в сравнении с множеством решений NSGA-II, так как показатели GD, GD+ и IGD имеют наименьшие значения, за исключением показателя IGD+. В то же время множество решений NSGA-II имеет более высокое качество, так как показатели Spacing, ASpacing и HRS имеют меньшие значения по сравнению со значениями алгоритма AGE-MOEA. Количество найденных решений (Cardinality) у NSGA-II и AGE-MOEA одинаково и соответствует предельному значению, заданному при оптимизации – 100. Также алгоритм NSGA-II нашел решения с наименьшим значением LCOE и расходом топлива за меньший промежуток времени, чем алгоритм AGE-MOEA.

Таким образом, для оптимизации состава оборудования ГЭК на верхнем уровне двухуровневого подхода следует выбрать алгоритм NSGA-II, так как данный алгоритм позволяет получить множество Парето высокого качества, а также найти минимальные значения критериев при решении многокритериальной оптимизационной задачи, направленной на поиск минимальных значений целевых функций. Также необходимо отметить и эффективность AGE-MOEA для использования в задачах оптимизации состава оборудования ГЭК. Возможным подходом является использование этих двух алгоритмов для формирования объединенных Парето-оптимальных конфигураций ГЭК на верхнем уровне, что обеспечит хорошую равномерность и однородность решений в пространстве, близость к истинному множеству Парето, достижение минимальных оценок по критериям. Недостатком такого подхода являются более высокие затраты времени, однако для задач планирования этот фактор не будет иметь решающего значения.

**Заключение.** В выполненном исследовании рассмотрен двухуровневый подход, который применяется для решения задачи определения оптимального состава оборудования ГЭК в условиях многокритериальности. Представлен обзор методов и алгоритмов, применяемых на верхнем и нижнем уровнях двухуровневого подхода. Рассмотрены показатели для оценки качества Парето-множеств, отражающие как близость к истинному множеству Парето, так и равномерность распределения решений в пространстве. Проведен расчет показателей для алгоритмов NSGA-II, NSGA-III, AGE-MOEA и MOEA/D. По результатам оценки сделан вывод, что алгоритм NSGA-II обеспечивает получение более равномерного множества Парето, определение альтернатив с самыми низкими оценками по критериям. В то же время NSGA-II несколько уступает алгоритму AGE-MOEA в отношении близости к истинному множеству Парето. В целом, применение этих двух алгоритмов

является более предпочтительным в сравнении с другими, рассмотренными в ходе исследования. В дальнейшем планируется выполнить исследования по оценке эффективности комбинации эвристических алгоритмов, а также исследование по сравнению эффективности моделей функционирования ГЭК на нижнем уровне двухуровневого подхода при выборе состава оборудования.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ИСЭМ СО РАН (№ FWEU-2021-0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

## Список источников

1. Холкин Д. Новые бизнес-модели развития локальной энергетики / Д. Холкин, И. Чаусов, М. Губанов, и др. // Энергетическая политика, 2024. – URL: https://energypolicy.ru/novye-biznes-modeli-razvitiya-lokalnoj-energetiki-2/energetika/2024/13/18
2. Akvile G., Sigitas R., Mantas M., et al. Hybrid renewable energy systems – a review of optimization approaches and future challenges. Applied sciences, 2025, vol. 15, DOI:10.3390/app15041744.
3. Ren X., Li L., Ji B., et al. Design and analysis of solar hybrid combined cooling, heating and power system: A bi-level optimization model. Energy, 2024, vol. 292, DOI:10.1016/j.energy.2024.130362.
4. Alberizzi J., Frigola J.M., Rossi M., et al. Optimal sizing of a Hybrid renewable energy system: importance of data selection with highly variable renewable energy sources. Energy conversion and management, 2020, vol. 223, DOI:10.1016/j.enconman.2020.113303.
5. Alberizzi J., Frigola J.M., Rossi M. A MILP algorithm for the optimal sizing of an off-grid hybrid renewable energy system in South Tyrol. Energy reports, 2020, vol. 6, pp. 21-26, DOI:10.1016/j.egyr.2019.08.012
6. Xu Ch., Ke Yi., Li Ya., et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS. Energy conversion and management, 2020, vol. 215, DOI:10.1016/j.enconman.2020.112892.
7. Nkalo U.K., Inya O.O., Obi, et al. A modified multi-objective particle swarm optimization (M-MOPSO) for optimal sizing of a solar–wind–battery hybrid renewable energy system. Solar compass, 2024, vol. 12, DOI:10.1016/j.solcom.2024.100082.
8. Ouederni R., Bouaziz B., Bacha F. Optimization of a hybrid renewable energy system based on meta-heuristic optimization algorithms. International journal of advanced computer science and applications, 2024, vol. 15, DOI:10.14569/IJACSA.2024.0150779.
9. Mahmoudi S.M., Maleki A., Ochbelagh D.R. Multi-objective optimization of hybrid energy systems using gravitational search algorithm. Scientific reports, 2024, vol. 15, DOI:10.1038/s41598-025-86476-z.
10. Mathaba T.N.D., Abo-Al-Ez Kh. Design of hybrid renewable energy systems: integrating multi-objective optimization into a multi-criteria decision-making framework. Engineering reports, 2024, vol. 7, DOI:10.1002/eng2.13074.
11. Sarad B., Deschinkel K., Moyne L.L., at al. Optimal integration of hybrid renewable energy systems for decarbonized urban electrification and hydrogen mobility. International journal of hydrogen energy, 2024, vol. 83, DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.08.054.
12. Kusakana K., Vermaak H.J., Yuma G.P. Optimization of hybrid standalone renewable energy systems by linear programming. Advanced science letters, 2013, vol. 19, pp. 2501-2504(4) DOI:10.1166/asl.2013.4948.
13. Mahmoud F.S., Diab A., Ali Z.M., et al. Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms. Energy reports, 2022, vol. 8, pp. 4935-4956 DOI:10.1016/j.egyr.2022.03.197.
14. Akbar Maleki, Fathollah Pourfayaz, Mohammad H. Ahmadi. Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach. Solar Energy, 2016, vol 139, pp. 666-675, DOI:10.1016/j.solener.2016.09.028.
15. Adefarati T., Potgieter S., Sharma G., et al. Optimization of renewable energy based hybrid energy system using evolutionary computational techniques. Smart grids and sustainable energy, 2025, vol.10, DOI:10.1007/s40866-025-00245-5.
16. Cheraghi R., Jahangir M.H. Multi-objective optimization of a hybrid renewable energy system supplying a residential building using NSGA-II and MOPSO algorithms. Energy conversion and management, 2023, vol. 294, DOI:10.1016/j.enconman.2023.117515.
17. Roy T.K., Saha S., Than Oo A.M. Optimizing hybrid energy systems for remote Australian communities: The role of tilt angle in cost-effective green hydrogen production. Applied energy, 2025, vol. 391, DOI:10.1016/j.apenergy.2025.125921.

18. Северина Я.Д. Оптимизация конфигурации гибридного энергокомплекса с использованием генетического алгоритма / Я.Д. Северина, В.А. Шакиров // IV Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские чтения», г. Томск, 10-12 декабря 2024 г.
19. Tezer T. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy systems with green hydrogen integration and hybrid storage strategies. International journal of hydrogen energy, 2025, vol. 142, pp. 1249-1271, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.006.
20. Shakirov Vl., Popov I. Multi-criteria design of multi-energy system for remote area using NSGA-III and fuzzy TOPSIS. Journal of renewable and sustainable energy, 2024, vol. 16, DOI:10.1063/5.0215524.
21. Ming M., Wang R., Zha Y., et al. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system using an enhanced multi-objective evolutionary algorithm. Energies, 2017, vol, 10, DOI:10.3390/en10050674.
22. Deb K, Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, vol. 6(2), pp. 182-197, DOI:10.1109/4235.996017.
23. Вихтенко Э.М. Исследование алгоритмов NSGA-III и AGE-MOEA-II для решения задач многокритериальной оптимизации / Э.М. Вихтенко, Д.В. Зубков // Инженерный вестник Дона, 2024. – № 6.
24. Zhang Q., Li H. A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, vol. 11, pp. 712-731, DOI:10.1109/TEVC.2007.892759.
25. Pyomo. Multi-objective optimization in Python, available at: https://www.pyomo.org/.
26. Perfect Indicator. Multi-objective optimization in Python, Pymoo, available at: https://pymoo.org/misc/indicators.html.
27. Collette Y., Siarry P. Three new metrics to measure the convergence of towards the Pareto frontier and the aesthetic of a set of solutions in biobjective optimization. Computers & operations research, 2005, vol. 32, pp. 773-792, DOI:10.1016/j.cor.2003.08.017.
28. Ishibuchi H., Masuda H., Tanigaki Y., et al. Modified distance calculation in generational distance and inverted generational distance. Lecture notes in computer science, 2015, pp. 110-125, DOI:10.1007/978-3-319-15892-1_8.
29. Zheng K., Yang R., Xu H., et al. A new distribution metric for comparing Pareto optimal solutions. Structural and multidisciplinary optimization, 2017, vol. 55, pp. 53-62, DOI:10.1007/s00158-016-1469-3.

***Северина Яна Дмитриевна.*** *Аспирант Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 1121503, SPIN: 3075-3243, ORCID: 0009-0003-3685-7815, yan.sewerina2910@yandex.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130.*

***Шакиров Владислав Альбертович.*** *Кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, AuthorID: 534444, SPIN: 2637-8522, ORCID 0000-0001-8629-9549, shakirovva@ex.istu.edu, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83.*

---

UDC 621.311.17
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.008

# Evaluation of heuristic algorithms of multi-criteria optimization for sizing of hybrid renewable energy systems

**Yana D. Severina[1], Vladislav A. Shakirov[2]**

[1]Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *yan.sewerina2910@yandex.ru*
[2]Irkutsk national research technical university,
Russia, Irkutsk

**Abstract.** At present, the use of stand-alone hybrid renewable energy systems (HRES) combining diesel generators and renewable energy sources is an effective way to improve the efficiency of electricity supply to consumers in isolated and hard-to-teach areas. Designing of HRES associated with the need to solve an optimization problem, in which it is necessary to determine the optimal equipment configuration and their installed capacities in the context of multi-criteria. In the case of multi-criteria problem solving, a two-level approach is used in most studies: at the top level, the optimal Pareto configurations of HRES are formed using heuristic algorithms of multi-criteria

optimization, at the bottom-level, the simulation of each HRES configuration are considered for detailed evaluation of each solution by a number of criteria. There is a large number of heuristic algorithms applied at the top level for planning the development of energy systems and HRES, which have both advantages and disadvantages, which creates difficulties in choosing an algorithm. This study presents an evaluation of heuristic multi-criteria optimization algorithms based on evolutionary algorithms such as NSGA-II, NSGA-III, AGE-MOEA and MOEA/D using Python and Pymoo package. To compare the algorithms, indicators were used that evaluate the Pareto set uniformity; distance between the true Pareto set and the Pareto-set formed by the heuristic algorithm; efficiency of the algorithm to achieving the best criteria evaluations; the time required to form the Pareto set. Evaluation of optimization algorithms was carried out on the example of solving the problem of development of a hybrid renewable energy system in the remote area of Sakhalin region. According to the results of evaluation of algorithms of multi-criteria sizing of HRES at the top-level of the two-level approach should be chosen heuristic algorithm NSGA-II, as it allows to obtain the Pareto set of high quality, ensure the achievement the minimum estimates on criteria during less time than other algorithms.

**Keywords:** heuristic algorithms, multi-criteria optimization, hybrid renewable energy systems, Pareto set

**Acknowledgements.** The research was carried out under the State Assignment (FWEU-2021-0004) of the Program for Basic Research of the Russian Federation for 2021–2035 and made use of the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. 13.CKP.21.0038).

## References

1. Holkin D., Chausov I., Gubanov M., Melnikov P., et al. Novyye biznes-modeli razvitiya lokal'noy energetiki [New business models for the development of local energy]. Energeticheskaya politika [Energy policy], available at: https://energypolicy.ru/novye-biznes-modeli-razvitiya-lokalnoj-energetiki-2/energetika/2024/13/18.
2. Akvile G., Sigitas R., Mantas M., et al. Hybrid renewable energy systems – a review of optimization approaches and future challenges. Applied sciences, 2025, vol. 15, DOI:10.3390/app15041744.
3. Ren X., Li L., Ji B., et al. Design and analysis of solar hybrid combined cooling, heating and power system: A bi-level optimization model. Energy, 2024, vol. 292, DOI:10.1016/j.energy.2024.130362.
4. Alberizzi J., Frigola J.M., Rossi M., et al. Optimal sizing of a Hybrid renewable energy system: importance of data selection with highly variable renewable energy sources. Energy conversion and management, 2020, vol. 223, DOI:10.1016/j.enconman.2020.113303.
5. Alberizzi J., Frigola J.M., Rossi M. A MILP algorithm for the optimal sizing of an off-grid hybrid renewable energy system in South Tyrol. Energy reports, 2020, vol. 6, pp. 21-26, DOI:10.1016/j.egyr.2019.08.012
6. Xu Ch., Ke Yi., Li Ya., et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS. Energy conversion and management, 2020, vol. 215, DOI:10.1016/j.enconman.2020.112892.
7. Nkalo U.K., Inya O.O., Obi, et al. A modified multi-objective particle swarm optimization (M-MOPSO) for optimal sizing of a solar–wind–battery hybrid renewable energy system. Solar compass, 2024, vol. 12, DOI:10.1016/j.solcom.2024.100082.
8. Ouederni R., Bouaziz B., Bacha F. Optimization of a hybrid renewable energy system based on meta-heuristic optimization algorithms. International journal of advanced computer science and applications, 2024, vol. 15, DOI:10.14569/IJACSA.2024.0150779.
9. Mahmoudi S.M., Maleki A., Ochbelagh D.R. Multi-objective optimization of hybrid energy systems using gravitational search algorithm. Scientific reports, 2024, vol. 15, DOI:10.1038/s41598-025-86476-z.
10. Mathaba T.N.D., Abo-Al-Ez Kh. Design of hybrid renewable energy systems: integrating multi-objective optimization into a multi-criteria decision-making framework. Engineering reports, 2024, vol. 7, DOI:10.1002/eng2.13074.
11. Sarad B., Deschinkel K., Moyne L.L., at al. Optimal integration of hybrid renewable energy systems for decarbonized urban electrification and hydrogen mobility. International journal of hydrogen energy, 2024, vol. 83, DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.08.054.
12. Kusakana K., Vermaak H.J., Yuma G.P. Optimization of hybrid standalone renewable energy systems by linear programming. Advanced science letters, 2013, vol. 19, pp. 2501-2504(4) DOI:10.1166/asl.2013.4948.
13. Mahmoud F.S., Diab A., Ali Z.M., et al. Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms. Energy reports, 2022, vol. 8, pp. 4935-4956 DOI:10.1016/j.egyr.2022.03.197.
14. Akbar Maleki, Fathollah Pourfayaz, Mohammad H. Ahmadi. Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach. Solar Energy, 2016, vol 139, pp. 666-675, DOI:10.1016/j.solener.2016.09.028.

15. Adefarati T., Potgieter S., Sharma G., et al. Optimization of renewable energy based hybrid energy system using evolutionary computational techniques. Smart grids and sustainable energy, 2025, vol.10, DOI:10.1007/s40866-025-00245-5.
16. Cheraghi R., Jahangir M.H. Multi-objective optimization of a hybrid renewable energy system supplying a residential building using NSGA-II and MOPSO algorithms. Energy conversion and management, 2023, vol. 294, DOI:10.1016/j.enconman.2023.117515.
17. Roy T.K., Saha S., Than Oo A.M. Optimizing hybrid energy systems for remote Australian communities: The role of tilt angle in cost-effective green hydrogen production. Applied energy, 2025, vol. 391, DOI:10.1016/j.apenergy.2025.125921.
18. Severina Y.D., Shakirov V.A. Optimizatsiya konfiguratsii gibridnogo energokompleksa s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Optimization of the configuration of a hybrid energy complex using a genetic algorithm]. IV Vserossiyskaya s mezhdunarodnym uchastiem molodezhnaya konferentsiya “Butakovskie chteniya”, g. Tomsk, 10-12 dekabrya 2024 g. [IV All-Russian youth conference with international participation "Butakov Readings", Tomsk, December 10-12, 2024].
19. Tezer T. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy systems with green hydrogen integration and hybrid storage strategies. International journal of hydrogen energy, 2025, vol. 142, pp. 1249-1271, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.006.
20. Shakirov Vl., Popov I. Multi-criteria design of multi-energy system for remote area using NSGA-III and fuzzy TOPSIS. Journal of renewable and sustainable energy, 2024, vol. 16, DOI:10.1063/5.0215524.
21. Ming M., Wang R., Zha Y., et al. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system using an enhanced multi-objective evolutionary algorithm. Energies, 2017, vol, 10, DOI:10.3390/en10050674.
22. Deb K, Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, vol. 6(2), pp. 182-197, DOI:10.1109/4235.996017.
23. Vikhtenko E.M., Zubkov D.V. Issledovanie algoritmov NSGA-III i AGE-MOEA-II dlya resheniya zadach mnogokriterial'noy optimizatsii [Study of NSGA-III and AGE-MOEA-II algorithms for solving multicriteria optimization problems]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering journal of Don], 2024, no. 6.
24. Zhang Q., Li H. A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, vol. 11, pp. 712-731, DOI:10.1109/TEVC.2007.892759.
25. Pyomo. Multi-objective optimization in Python, available at: https://www.pyomo.org/.
26. Perfect Indicator. Multi-objective optimization in Python, Pymoo, available at: https://pymoo.org/misc/indicators.html.
27. Collette Y., Siarry P. Three new metrics to measure the convergence of towards the Pareto frontier and the aesthetic of a set of solutions in biobjective optimization. Computers & operations research, 2005, vol. 32, pp. 773-792, DOI:10.1016/j.cor.2003.08.017.
28. Ishibuchi H., Masuda H., Tanigaki Y., et al. Modified distance calculation in generational distance and inverted generational distance. Lecture notes in computer science, 2015, pp. 110-125, DOI:10.1007/978-3-319-15892-1_8.
29. Zheng K., Yang R., Xu H., et al. A new distribution metric for comparing Pareto optimal solutions. Structural and multidisciplinary optimization, 2017, vol. 55, pp. 53-62, DOI:10.1007/s00158-016-1469-3.

***Severina Yana Dmitrievna.*** *PhD student, Melentiev energy systems institute SB RAS. AuthorID: 1121503, SPIN: 3075-3243, ORCID: 0009-0003-3685-7815, yan.sewerina2910@yandex.ru, 664043, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

***Shakirov Vladislav Albertovich.*** *Ph.D., head of the department of power supply and electrical engineering, Irkutsk National research technical university. AuthorID: 534444, SPIN: 2637-8522, ORCID: 0000-0001-8629-9549 shakirovva@ex.istu.edu, 664074, Irkutsk, Lermontov St., 83.*

*Статья поступила в редакцию 13.05.2025; одобрена после рецензирования 19.06.2025; принята к публикации 02.08.2025.*

*The article was submitted 05/13/2025; approved after reviewing 06/19/2025; accepted for publication 08/02/2025.*

УДК 621.039.51
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.009

# Одномерная модель теплогидравлики в канале с водой при сверхкритических параметрах

**Суджян Артавазд Манукович[1], Берберова Мария Александровна[2], Железняков Родион Алексеевич[2], Хачатрян Артур Алексеевич[2], Лазарев Алексей Юрьевич[2], Магомедов Раджаб Ибрагимович[2], Юдин Владимир Михайлович[2]**

[1]Курчатовский институт, Россия, Москва, *artavazd1994@gmail.com*
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, Москва

**Аннотация.** В работе представлен подход, использованный для создания одномерной модели теплогидравлики в одиночном нагреваемом канале с водой при сверхкритических параметрах. Такая модель может быть использована при решении задачи поиска границ теплогидравлической устойчивости. Подход основан на принципах, заложенных в полунеявном алгоритме SIMPLE. Модель включает в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии, учитывающие сжимаемость среды. Реализация модели выполнена с помощью программного кода собственной разработки на языке C++. Для определения теплофизических свойств воды использована библиотека IAPWS-IF97, реализованная в высокопроизводительном пакете seuif97. Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в программе имеется несколько корреляций, для тестирования модели выбрана формула Блазиуса. Представленный подход предполагает решение основных уравнений теплогидравлики с проверкой неразрывности потока четыре раза на одном шаге по времени. Цикл неразрывности завершается при достижении разбаланса массы, равного $10^{-6}$, либо при достижении 10 итераций. Продемонстрированы результаты тестирования модели.

**Ключевые слова:** модель теплогидравлики, сверхкритические параметры, нагреваемый канал, алгоритм SIMPLE, сжимаемость среды, теплогидравлическая устойчивость

**Цитирование:** Суджян А.М. Одномерная модель теплогидравлики в канале с водой при сверхкритических параметрах / А.М. Суджян, М.А. Берберова, Р.А. Железняков, А.А. Хачатрян, А.Ю. Лазарев, Р.И. Магомедов, В.М. Юдин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 104-113. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.009.

**Введение.** Разработка моделей процессов, протекающих в нагреваемых каналах с водой при сверхкритических параметрах, в особенности для условий, близких к границам теплогидравлической устойчивости, требует значительного количества расчетных и экспериментальных работ. Такие модели необходимы, в том числе, на этапе проектирования ядерных энергетических установок с легководным теплоносителем сверхкритического давления [1], в активных зонах которых теплофизические параметры могут подвергаться значительным изменениям [2].

Основные существующие результаты численного и экспериментального исследования теплогидравлической устойчивости в каналах с водой при сверхкритических параметрах представлены в работах [3] и [4].

Авторы [3] обобщили существующие критерии устойчивости, математические модели и экспериментальные данные, подчеркнув ключевые факторы, влияющие на развитие колебательных процессов в высокотемпературных теплообменных системах. Были рассмотрены также эффекты геометрии каналов, способов нагрева, режимов теплообмена и свойств воды в окрестности критической точки, а также подходы к обеспечению устойчивости при проектировании теплогидравлических систем, включая реакторные установки и теплообменники. Отмечено, что ограниченность экспериментальных данных и существующих моделей делает невозможным точное прогнозирование момента потери теплогидравлической устойчивости, необходимы дальнейшие экспериментальные и численные исследования в широком диапазоне условий.

В работе [4] показано, что предсказание момента потери теплогидравлической устойчивости требует более точных данных о теплообменных процессах и развитии возмущений в условиях сверхкритических параметров. Это указывает на необходимость дальнейших исследований, как в части совершенствования моделей и расчетных методов, так и в проведении экспериментальной валидации полученных результатов.

Резкое изменение свойств теплоносителя наблюдается вблизи области псевдофазового перехода [5], определяемого температурами, при которых удельная теплоемкость достигает резкого максимума при заданном значении давления, превышающего критическое. Поведение свойств вокруг псевдокритической точки показано на рисунке 1.

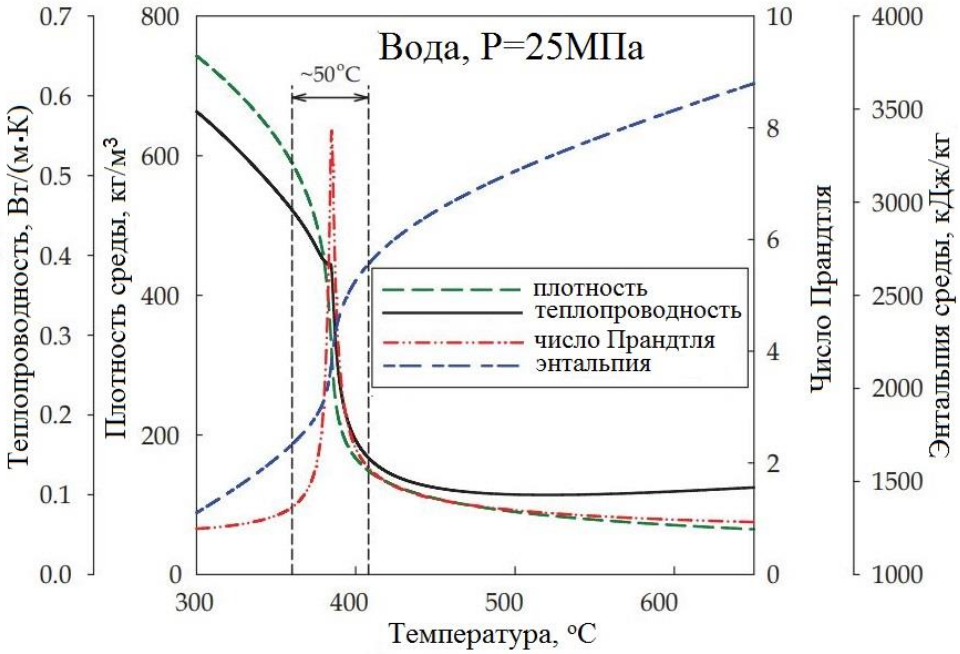



**Рис. 1.** Изменение некоторых теплофизических свойств воды вблизи псевдокритической точки: псевдокритическая область при 25 МПа составляет около ±25°C вокруг псевдокритической точки

Картина изменения плотности подобна той, которая наблюдается в кипящих системах вследствие образования пустот. Это основная причина предположения о том, что эффекты неустойчивости, аналогичные наблюдаемым в кипящих системах, также могут возникнуть при сверхкритических давлениях.

Возникновение многозначности гидродинамической характеристики канала в статических условиях, а также различные возмущения массового расхода на входе в канал приводят к отклонениям или самоподдерживающимся колебаниям, которые, соответственно, считаются классическими примерами неустойчивости Лединегга или колебаниями «волн плотности» [6].

Таким образом, с целью дальнейшего построения карты устойчивости для определения параметров, соответствующих устойчивым режимам работы, на данном этапе был определен подход к созданию простой одномерной модели, представленной одиночным нагреваемым каналом.

**2. Исходная математическая модель.** Исходная математическая модель включает в себя три одномерных уравнения сохранения: массы (1), импульса (2) и энергии (3). В них учитывается сжимаемость, характерная для воды при сверхкритических параметрах.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{G^2}{\rho}\right) - \left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{K_{l\,in}}{\partial z} + \frac{K_{l\,out}}{\partial z}\right)\frac{G^2}{2\cdot\rho} - \rho\cdot g\cdot\sin\theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\cdot h)}{\partial t} = -\frac{\partial(G\cdot h)}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial t} + u\frac{\partial p}{\partial z} + |u|\left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{K_{l\,in}}{\partial z} + \frac{K_{l\,out}}{\partial z}\right)\frac{G^2}{2\cdot\rho} - \rho\cdot u\cdot g\cdot\sin\theta + \frac{q_l}{A}, \quad (3)$$

где ρ и $G$ – плотность и массовая скорость теплоносителя соответственно, $t$ – время, $z$ – пространственная координата, $p$ – давление, $D_h$ – гидравлический диаметр канала, λ – коэффициент гидравлического сопротивления, $K_l$ – коэффициент местного сопротивления, $g$ – ускорение свободного падения, θ – угол направления движения потока по отношению к горизонтали, $h$ – энтальпия, $u$ – скорость теплоносителя, $A$ – площадь проходного сечения, $q_l$ – линейное энерговыделение. Индексы «*in*» и «*out*» относятся ко входу и выходу канала соответственно и указывают на то, что переменная определена для этих точек, а в остальных она равна нулю. В данной постановке использовано предположение непосредственной добавки энергии к теплоносителю без явного вычисления теплопередачи.

Для замыкания системы (1) – (3) используется уравнение состояния (4):

$$\rho = f(p,h). \quad (4)$$

Функция $f(p, h)$ определена в высокопроизводительном пакете стандартных свойств воды и водяного пара IAPWS-IF97 seuif97 [7], который находится в открытом доступе и позволяет значительно ускорить расчет.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления использованы следующие соотношения в зависимости от режима течения [8]. Число Рейнольдса Re = 2300, было использовано в качестве границы между ламинарным и турбулентным режимами. Для ламинарного потока (Re < 2300) использовалась формула Пуазейля (5):

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}} \quad (5)$$

Для турбулентного потока (Re ≥ 2300) предусмотрены две формулы, в зависимости от учета шероховатости канала. В случае пренебрежения шероховатостью ε, используется формула Блазиуса (6), в противном случае – формула Свами-Джейна (7):

$$\lambda = \frac{0,3164}{\mathrm{Re}^{0,25}} \quad (6)$$

$$\lambda = 0,25\cdot\left[\log\left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_h}}{3,7} + \frac{5,74}{\mathrm{Re}^{0,9}}\right)\right]^{-2}, \quad (7)$$

для тестирования модели использовалась формула Блазиуса.

**3. Подход к моделированию.** Подход, использованный для создания рассматриваемой модели, основан на принципах алгоритма SIMPLE [9], широко применяемого для расчета полей скорости и давления потока несжимаемого теплоносителя. Алгоритм SIMPLE представляет собой полунеявную численную процедуру для решения уравнений Навье-Стокса. Основные принципы алгоритма SIMPLE заключаются в использовании шахматной сетки и использовании схемы «против потока» для конвективных членов в уравнениях. Шахматная сетка предполагает, что компоненты скорости определены не в центрах контрольных объемов, где определены давления, а на их гранях с разницей в полшага, что напоминает шахматный порядок. Использование такой сетки повышает удобство и точность определения скорости.

Схема с разностями против потока является одношаговой явной схемой, обеспечивающей статическую устойчивость для конвективных членов [10]. В ее основе лежит использование односторонних, а не центральных разностей по пространственным переменным. При положительных значениях скорости используются разности назад и наоборот. Конвективные члены для уравнений (2) и (3) относительно точки *j* записываются в форме (8) и (9), соответственно:

$$\left(\frac{G_j+G_{j+1}}{2\rho_{j+1}}\right)\times\begin{cases}G_j, \left(\dfrac{G_j+G_{j+1}}{2\rho_{j+1}}\right)>0\\ G_{j+1}, \left(\dfrac{G_j+G_{j+1}}{2\rho_{j+1}}\right)<0\end{cases}-\left(\frac{G_j+G_{j-1}}{2\rho_j}\right)\times\begin{cases}G_{j-1}, \left(\dfrac{G_j+G_{j-1}}{2\rho_j}\right)>0\\ G_j, \left(\dfrac{G_j+G_{j-1}}{2\rho_j}\right)<0\end{cases} \tag{8}$$

$$G_j\times\begin{cases}h_j, G_j>0\\ h_{j+1}, G_j<0\end{cases}-G_{j-1}\times\begin{cases}h_{j-1}, G_{j-1}>0\\ h_j, G_{j-1}<0\end{cases} \tag{9}$$

Решение уравнений включает в себя их дискретизацию с приведением к конечно-разностному виду, линеаризацию, группировку слагаемых с объединением групп в коэффициенты и последующую подстановку полученных коэффициентов в трехдиагональную матрицу. Матрица представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, которая просто решается методом прогонки трехдиагональной матрицы.

Особенностью алгоритма SIMPLE является изменение в форме записи уравнения сохранения массы – оно записывается не относительно плотности теплоносителя, а относительно коррекции давления, которую необходимо провести для получения полей скорости и давления, удовлетворяющих условию неразрывности. Значение плотности теплоносителя заменяется на неизвестное значение коррекции давления. С учетом того, что вода при сверхкритических параметрах сжимаема, уравнения сохранения и подход к их решению несколько отличаются от классического SIMPLE, представляя собой его расширенную версию. Для получения уравнения коррекции давления необходимо учесть:

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)=\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_h\cdot\left(\frac{\delta p}{\partial t}\right)+\left(\frac{\partial\rho}{\partial h}\right)_p\cdot\left(\frac{\delta h}{\partial t}\right), \tag{10}$$

где $\delta p$ и $\delta h$ – возмущения по давлению и энтальпии, соответственно, по отношению к начальным, либо взятым с предыдущего шага по времени значениям. Причем, $\delta p$, фактически, является искомой коррекцией давления, а частные производные плотности по давлению при постоянной энтальпии и плотности по энтальпии при постоянном давлении – это простые термодинамические производные. Принимая во внимание соотношения (11) и (12) для узла под номером *j*:

$$G_j=G_j^*+G_j^{'} \tag{11}$$

$$G_j^{'}=\frac{p_j^{'}-p_{j+1}^{'}}{a_j}, \tag{12}$$

исходное уравнение сохранения массы (1) можно записать в следующем виде (1'):

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_{hj}\cdot p_j^{'}\cdot\frac{\Delta z}{\Delta t}+\left(\frac{\partial\rho}{\partial h}\right)_{pj}\cdot\delta h_j\cdot\frac{\Delta z}{\Delta t}+\rho_j^*\cdot\frac{\Delta z}{\Delta t}-\rho_j^0\cdot\frac{\Delta z}{\Delta t}+\left(G_j^*+\frac{p_j^{'}-p_{j+1}^{'}}{a_j}\right)-\left(G_{j-1}^*+\frac{p_{j-1}^{'}-p_j^{'}}{a_{j-1}}\right)=0, \tag{1'}$$

где индексы «0», «'» и «*» указывают на значение переменной, взятое с предыдущего шага по времени, значение коррекции и текущее известное значение переменной, соответственно.

Основные пункты модифицированной версии алгоритма можно представить в следующем виде:

1) описание начальных условий (начальные распределения полей массовой скорости, давления, энтальпии и других свойств), граничных условий, а также определение необходимых для расчета вспомогательных параметров (числа Рейнольдса, гидравлические сопротивления и т. д.);
2) решение уравнения сохранения энергии для уточнения поля энтальпий (а значит, и температур) при заданных начальных условиях, обновление свойств;
3) цикл неразрывности, то есть итерации до достижения значений массовых скоростей и давлений, соответствующих условию неразрывности, обновление свойств, на итерациях происходит последовательное решение системы уравнений сохранения импульса и системы уравнений коррекций давления.

Проверка неразрывности выполнялась либо до достижения конечного числа итераций, либо до получения порогового значения невязки в уравнении массы $10^{-6}$. Максимальное число итераций неразрывности, требовавшихся для расчета, равнялось 10. В зависимости от сложности решаемой задачи алгоритм можно применять несколько раз на одном шаге по времени. На рисунке 2 показана блок-схема описанного алгоритма.

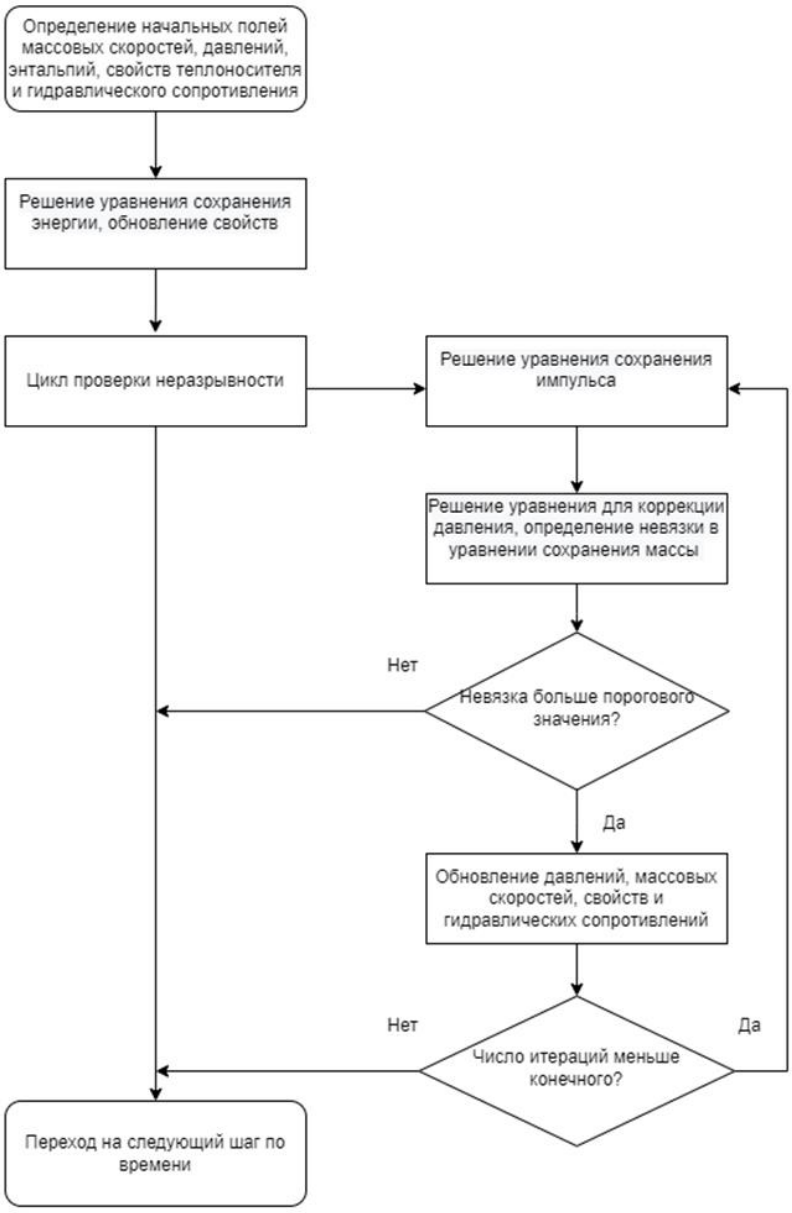



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма, использованного при моделировании

**4. Тестирование модели.** Протестировать модель было решено с помощью тестового задания по сравнительной валидации «устойчивость расхода» [11]. Объектом исследования являлась трубка длиной 4,2672 м, с внутренним диаметром $8{,}36 \times 10^{-3}$ м. Условия задания предполагают, что трубка подвергается равномерному нагреву, расчет предлагается проводить для вертикального и горизонтального положения. На входе в трубку и выходе из нее задаются значения местных сопротивлений, равных 20 и 2, 5, 10, 20 (для разных расчетов) соответственно. Целью задания является проведение серии расчетов переходных процессов, происходящих при увеличении мощности нагрева трубки для разных энтальпий недогрева до псевдокритической точки при заданном давлении 25 МПа на входе в трубку и с различными значениями местного сопротивления на выходе из трубки [12]. По итогу расчета из графиков массового расхода необходимо определить точку начала теплогидравлической неустойчивости, оценить безразмерный параметр изменения состояния потока сверхкритического теплоносителя в результате нагрева $N_{tpc}$ (13):

$$N_{tpc} = \frac{\beta_{pc}}{C_{p,pc}} \frac{Q}{G \cdot A}, \tag{13}$$

где $Q$ – полная подведенная мощность, β – коэффициент температурного расширения, $C_p$ – удельная изобарная теплоемкость, индекс «*pc*» указывает на значение параметра в псевдокритической точке. Для каждого безразмерного параметра недогрева до псевдокритической температуры $N_{spc}$ (14):

$$N_{spc} = \frac{\beta_{pc}}{C_{p\,pc}} (h_{pc} - h_{in}), \tag{14}$$

рассчитываются соответствующие значения $N_{tpc}$, после чего полученные значения накладываются на графики с абсциссой $N_{tpc}$ и ординатой $N_{spc}$. Полученная таким образом картина называется картой устойчивости.

В качестве тестового варианта для расчета был выбран вариант с горизонтальным положением трубки. Серия тестовых расчетов была проведена для параметра недогрева до псевдокритической точки, равного 3. Это значение было использовано в качестве модельного примера, для которого предполагалось получить картину неколебательной неустойчивости. С учетом рекомендаций по выполнению расчета на границах трубки были заданы давления 25 МПа и 24,9 МПа соответственно, начальное давление в остальных точках равно давлению на выходе. Энтальпия входа, соответствующая заданному числу недогрева, равна 309,71 кДж/кг, это же значение является начальным по всей длине трубки. Стартовый массовый расход равен нулю. Нагрев производился с самого начала расчета с темпом 200 Вт/с, по примеру, представленному в работе [13]. Также, в работе [13] было определено, что количество контрольных объемов, равное 25, является оптимальным, в следствие чего для текущего исследования было использовано аналогичное пространственное разбиение. Шаг по времени был установлен равным $10^{-4}$ с.

В качестве результатов приведены зависимости массового расхода от времени, полученные для местных сопротивлений на выходе из канала, равных 5 (рисунок 3) и 10 (рисунок 4).

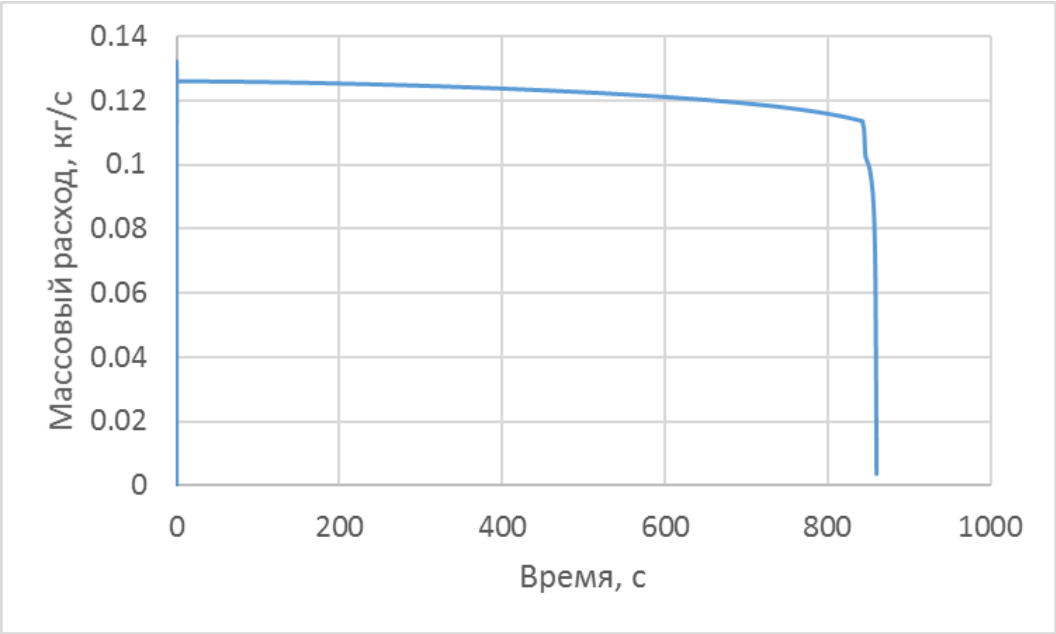



**Рис. 3.** Изменение массового расхода через горизонтальный канал в процессе нагрева $N_{spc} = 3$, $K_{l\ out} = 5$

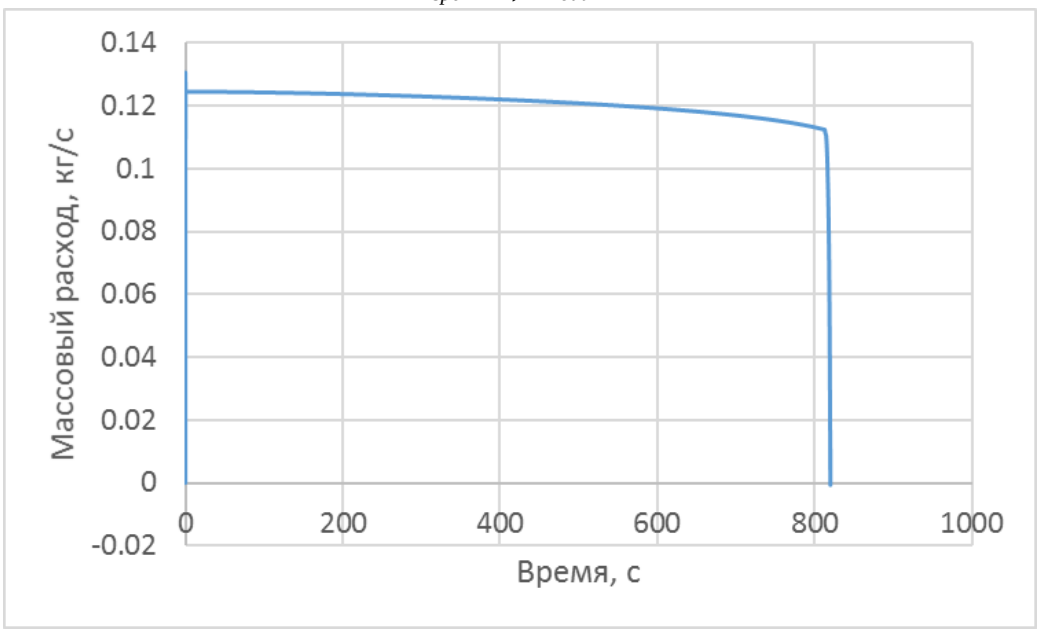



**Рис. 4.** Изменение массового расхода через горизонтальный канал в процессе нагрева $N_{spc} = 3$, $K_{l\ out} = 10$

На рисунках видно резкое падение массового расхода теплоносителя к нулю при заданных параметрах, вместе с этим, отсутствуют колебания массового расхода. На карте устойчивости, приведенной в работе [11], точки, соответствующие этим параметрам также помечены как неколебательные. Авторами работы [13] было высказано предположение о том, что подобная картина могла быть вызвана повышением давления в контрольном объеме, прилегающем к граничному на входе в канал, до такой степени, что перепада давления было недостаточно для преодоления потерь от сил трения и гидравлического сопротивления. Проблема избыточного давления по своей природе аналогична нестабильности Лединегга в том смысле, что система требует большего давления, чем доступно. Однако, второго ненулевого решения уравнения сохранения импульса не существует. Гораздо чаще такое наблюдается в случаях, когда энтальпия на входе в канал близка к псевдокритической точке.

Значения безразмерного параметра $N_{tpc}$ при значении безразмерного параметра недогрева до псевдокритической температуры $N_{spc}$ = 3 для коэффициентов местного сопротивления на выходе из трубки, равных 5 и 10, составили соответственно 2,58 и 2,50. Из полученных результатов тестирования можно сделать заключение о том, что в целом, предложенный подход применим для неколебательных переходных процессов. В дальнейшем необходима его проверка на колебательных переходных процессах, для чего нужно охватить широкий диапазон параметров недогрева до псевдокритической температуры.

**Заключение.** Предложен подход для создания одномерной модели теплогидравлики в одиночном нагреваемом канале с водой при сверхкритических параметрах. Представлена блок-схема модифицированного полунеявного алгоритма на основе SIMPLE, лежащего в основе предложенного подхода и позволяющего проводить расчеты для сжимаемых теплоносителей.

Тестирование модели, построенной с использованием данного подхода, было выполнено по примеру расчетного задания по сравнительной валидации «устойчивость расхода». В качестве модельного примера расчет был выполнен для горизонтального канала с параметром недогрева до псевдокритической температуры, равного 3. При значениях местных сопротивлений на выходе из канала, равных 5 и 10, безразмерный параметр изменения состояния потока сверхкритического теплоносителя в результате нагрева соответственно равен 2,58 и 2,50. Это качественно соответствует теоретическим представлениям о том, что, чем меньше коэффициент местного сопротивления на выходе из канала, тем данный безразмерный параметр выше.

Зависимость массового расхода от времени в процессе нагрева продемонстрировала резкий крен в сторону нуля, что, по-видимому, вызвано эффектом избыточного давления (что по природе аналогично неустойчивости Лединегга, о чем сказано в работе [13]).

Несмотря на приемлемые результаты тестирования на неколебательных переходных процессах, необходимо продолжать тестирование с захватом более широкого диапазона параметров недогрева до псевдокритической точки.

**Благодарности.** Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

## Список источников

1. Махин В.М. Концептуальные предложения по водоохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR) / В.М. Махин, А.Н. Чуркин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2017. – № 1. – С. 48-65.
2. Ambrosini W. Assessment of flow stability boundaries in a heated channel with different fluids at supercritical pressure. Annals of nuclear energy, 2011, vol. 38, no. 2-3, pp. 615-627.
3. Shitsi E. et al. Flow instability in parallel channels with water at supercritical pressure: a review. World journal of engineering and technology, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 128-160, DOI:10.4236/wjet.2018.61008.
4. Суджян А.М. Анализ расчетных исследований теплогидравлической и нейтронно-теплогидравлической устойчивости реакторов с водой сверхкритического давления / А.М. Суджян, В.И. Деев, В.С. Харитонов, // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2021. – № 3. – С. 29-43.
5. Pioro I., Mokry S. Thermophysical properties at critical and supercritical conditions. Heat transfer-theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems, 2011, no. 22, DOI:10.5772/13790.
6. Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета): учебное пособие / В. И. Деев, А. Б. Круглов и др. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 156 с.
7. SEUIF97, available at: https://github.com/thermalogic/SEUIF97, (accessed:03/21/2024).
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Рипол Классик, 2013. – 456 с.
9. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Boca Raton, CRC Press, 2018, 241 p., DOI:10.1201/9781482234213.

10. Куштанова Г.Г. Математическое моделирование геофизических процессов: учебное пособие / Г.Г. Куштанова. – Казань, 2015. – 20 с.
11. Ambrosini W. Specifications for a benchmark exercise on flow stability in heated channels with supercritical fluids for the IAEA coordinated research programme on heat transfer behaviour and thermo-hydraulics codes testing for SCWRs. University of Pisa, Italy, DIMNP RL 1214(2009) Rev. 2, Pisa, November 14th, 2009.
12. Heat transfer behaviour and thermohydraulics code testing for supercritical water cooled reactors (SCWRs). Vienna (Austria): International atomic energy agency; 2014, 508 p.
13. Leung K.H. et al. Modelling of flow instabilities under supercritical conditions. Proc. 5th Int. Sym. SCWR (ISSCWR-5). Vancouver, British Columbia, Canada, March 13–16, 2011, 15 p.

***Суджян Артавазд Манукович.*** *Научный сотрудник НИЦ КИ. AuthorID: 1133311, SPIN: 2947-4122, ORCID: 0000-0001-6943-9220, artavazd1994@gmail.com, 123098, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1.*

***Берберова Мария Александровна.*** *Кандидат технических наук. Доцент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. Основные направления исследований: Анализ надежности, вероятностный анализ безопасности, оценка рисков. AuthorID: 878433, SPIN: 7288-2530, ORCID: 0000-0002-6357-7929, maria.berberova@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.*

***Железняков Родион Алексеевич.*** *Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0005-2536-3208, ro517zh@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.*

***Хачатрян Артур Алексеевич.*** *Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0002-4489-2365, artur251373@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.*

***Лазарев Алексей Юрьевич.*** *Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0000-6610-5866, lexa03168@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.*

***Магомедов Раджаб Ибрагимович.*** *Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0002-9636-0942, radzhab._.magomedov@icloud.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.*

***Юдин Владимир Михайлович.*** *Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0005-2764-4169, yudin_v_m@mail.ru. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.*

---

UDC 621.039.51
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.009

# One-dimensional thermal-hydraulic model in a channel with water at supercritical parameters

**Artavazd M. Sujyan[1], Maria A. Berberova[2], Rodion A. Zheleznyakov[2], Artur A. Khachatryan[2], Aleksei Yu. Lazarev[2], Radzhab I. Magomedov[2], Vladimir M. Yudin[2]**

[1]Kurchatov institute, Russia, Moscow, *artavazd1994@gmail.com*
[2]MIREA – Russian Technological University, Russia, Moscow

**Abstract.** The paper presents a methodology used to create a one-dimensional model of thermal-hydraulics in a single heated channel with supercritical water. This model can be used to solve the problem of determining the boundaries of thermal-hydraulic stability. The technique is based on the principles laid down in the semi-implicit SIMPLE algorithm. The model includes equations of mass, momentum and energy conservation, taking into account the compressibility of the fluid. The model is implemented using in-house C++ program code. The IAPWS-IF97 library, implemented in the high-speed seuif97 package, was used to determine thermophysical properties of water. There are several correlations in the program to calculate the coefficient of hydraulic resistance, but the Blasius formula is selected for testing the model. The presented methodology involves solution of the basic thermal hydraulics equations with checking the continuity of the flow four times per one time step. The continuity cycle ends when a mass imbalance of 10-6 is reached, or when 10 iterations are reached. The results of testing the model are demonstrated.

**Keywords:** thermal-hydraulic model, supercritical parameters, heated channel, SIMPLE algorithm, compressibility of fluid, thermal-hydraulic stability

**Acknowledgements.** The work was carried out within the state assignment of NRC "Kurchatov institute".

## References

1. Makhin V.M., Churkin A.N. Kontseptual'nyye predlozheniya po vodookhlazhdayemomu reaktoru so sverkhkriticheskimi parametrami (obzor zarubezhnykh i rossiyskikh razrabotok SCWR) [Conceptual Proposals for a Supercritical Water-Cooled Reactor (Review of Foreign and Russian SCWR Developments)]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2017, no. 1, pp. 48-65.
2. Ambrosini W. Assessment of flow stability boundaries in a heated channel with different fluids at supercritical pressure. Annals of nuclear energy, 2011, vol. 38, no. 2-3, pp. 615-627.
3. Shitsi E. et al. Flow instability in parallel channels with water at supercritical pressure: a review. World journal of engineering and technology, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 128-160, DOI:10.4236/wjet.2018.61008.
4. Sudzhan A.M., Deev V.I., Kharitonov V.S. Analiz raschetnykh issledovaniy teplogidravlicheskoy i neytronno-teplogidravlicheskoy ustoychivosti reaktorov s vodoy sverkhkriticheskogo davleniya [Analysis of Calculated Studies of Thermal-Hydraulic and Neutron-Thermal-Hydraulic Stability of Supercritical Pressure Water Reactors]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika [Proceedings of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering], 2021, no. 3, pp. 29-43.
5. Pioro I., Mokry S. Thermophysical properties at critical and supercritical conditions. Heat transfer-theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems, 2011, no. 22, DOI:10.5772/13790.
6. Deev V.I., Kruglov A.B., et al. Yadernye reaktory s vodoy sverkhkriticheskogo davleniya (osnovy teplovogo rascheta) [Nuclear Reactors with Supercritical Pressure Water (Fundamentals of Thermal Calculation)]: uchebnoye posobiye. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2015, 156 p.
7. SEUIF97, available at: https://github.com/thermalogic/SEUIF97, (accessed:03/21/2024).
8. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of Hydraulic Resistance]. Moscow, Ripol Klassik Publ., 2013, 456 p.
9. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Boca Raton, CRC Press, 2018, 241 p., DOI:10.1201/9781482234213.
10. Kushtanova G.G. Matematicheskoye modelirovaniye geofizicheskikh protsessov [Mathematical Modeling of Geophysical Processes]. Kazan, 2015, 20 p.
11. Ambrosini W. Specifications for a benchmark exercise on flow stability in heated channels with supercritical fluids for the IAEA coordinated research programme on heat transfer behaviour and thermo-hydraulics codes testing for SCWRs. University of Pisa, Italy, DIMNP RL 1214(2009) Rev. 2, Pisa, November 14th, 2009.
12. Heat transfer behaviour and thermohydraulics code testing for supercritical water cooled reactors (SCWRs). Vienna (Austria): International atomic energy agency; 2014, 508 p.
13. Leung K.H. et al. Modelling of flow instabilities under supercritical conditions. Proc. 5th Int. Sym. SCWR (ISSCWR-5). Vancouver, British Columbia, Canada, March 13–16, 2011, 15 p.

***Sujyan Artavazd Manukovich.*** *Researcher at SRC KI. AuthorID: 1133311, SPIN: 2947-4122, ORCID: 0000 0001-6943-9220, artavazd1994@gmail.com, 123098, Moscow, square. Academician Kurchatov, 1.*

***Berberova Maria Aleksandrovna.*** *Candidate of technical sciences. Associate professor of the industrial informatics department of RTU MIREA. Main research areas: Reliability analysis, probabilistic safety analysis, risk assessment. AuthorID: 878433, SPIN: 7288-2530, ORCID: 0000-0002-6357-7929, maria.berberova@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.*

***Zheleznyakov Rodion Alekseevich.*** *Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0005-2536-3208, ro517zh@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.*

***Khachatryan Artur Alekseevich.*** *Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0002-4489-2365, artur251373@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.*

***Lazarev Aleksei Yurievich.*** *Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0000-6610-5866, lexa03168@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.*

***Magomedov Radzhab Ibragimovich.*** *Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0002-9636-0942, radzhab._.magomedov@icloud.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.*

***Yudin Vladimir Mikhailovich.*** *Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0005-2764-4169, yudin_v_m@mail.ru. 119454. Moscow, Vernadsky Avenue, 78.*

*Статья поступила в редакцию 23.02.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025; принята к публикации 18.08.2025.*

*The article was submitted 02/23/2025; approved after reviewing 06/27/2025; accepted for publication 08/18/2025.*

УДК 004.896
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.010

# Внедрение нейросетевого регулятора в систему управления орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе

**Корнюшкин Дмитрий Александрович**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Россия, Санкт-Петербург, *kornyushkin_98@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность внедрения нейросетевого регулятора в систему управления процессом орошения конденсаторов холодильных установок, используемых на хоккейных стадионах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и надежности работы систем охлаждения, обеспечивающих поддержание оптимальных температурных условий льда на арене. Традиционные методы регулирования процесса орошения обладают рядом недостатков, таких как сложность настройки параметров системы и низкая адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации. Целью работы является разработка и внедрение нейросетевой модели, способной автоматически регулировать процесс орошения конденсаторов в зависимости от текущих внешних факторов, включая температуру окружающей среды, влажность воздуха и нагрузку на холодильную установку. Для достижения этой цели были проведены теоретические исследования, направленные на анализ существующих методов регулирования, а также экспериментальные испытания разработанной нейросети на реальном объекте. В ходе исследования была разработана архитектура нейронной сети, включающая несколько слоев перцептронов, обученных на данных о работе холодильной установки за определенный период времени. Были рассмотрены различные подходы к обучению нейросети, включая использование алгоритмов обратного распространения ошибки и метода градиентного спуска. Экспериментальная часть работы показала высокую точность предсказания оптимальной стратегии орошения при различных условиях эксплуатации. Нейросеть LSTM была выбрана благодаря ее способности учитывать временные зависимости и адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Модель обучалась на исторических данных о работе холодильной установки, включая параметры температуры окружающей среды, нагрузки на установку и характеристики теплоносителя. В ходе обучения нейросети были использованы методы градиентного спуска и регуляризации для предотвращения переобучения. Результаты экспериментов показали, что внедрение нейросетевого регулятора позволило значительно улучшить точность поддержания заданных параметров системы охлаждения, а также снизить энергопотребление холодильной установки. Кроме того, было отмечено уменьшение времени отклика системы на изменения внешних условий, что особенно важно при проведении спортивных мероприятий на хоккейном стадионе.

**Ключевые слова:** обучение нейросетевого регулятора, система орошения, холодильные системы, архитектура нейросетевого регулятора

**Цитирование:** Корнюшкин Д.А. Внедрение нейросетевого регулятора в систему управления орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе / Д.А.Корнюшкин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025, – № 3 (39). – С. 114-123. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.010.

**Введение.** В реализованной модели информационного обеспечения комплекса разнородных систем управления спортивного сооружения подсистема орошения конденсатора предназначена для снижения температуры воздуха перед теплообменником. Качество и стабильность процесса орошения конденсатора напрямую влияют на эффективность охлаждения теплообменной поверхности, что особенно важно в условиях высоких температур и влажности, характерных для многих регионов России.

В основу работы системы орошения, расположенной на хоккейной арене положен физический принцип понижения температуры воздуха при адиабатическом увлажнении. При адиабатическом увлажнении температура воздуха может быть понижена примерно на 10°С, а это, в свою очередь, позволяет увеличить энергоэффективность холодильной машины примерно на 30%. Суть испарительного охлаждения заключается в способности потока

воздуха абсорбировать воду, распыляемую под высоким давлением (рисунок 1). При этом испаряющаяся вода поглощает теплоту из наружного воздуха, и тем самым снижает его температуру [1].

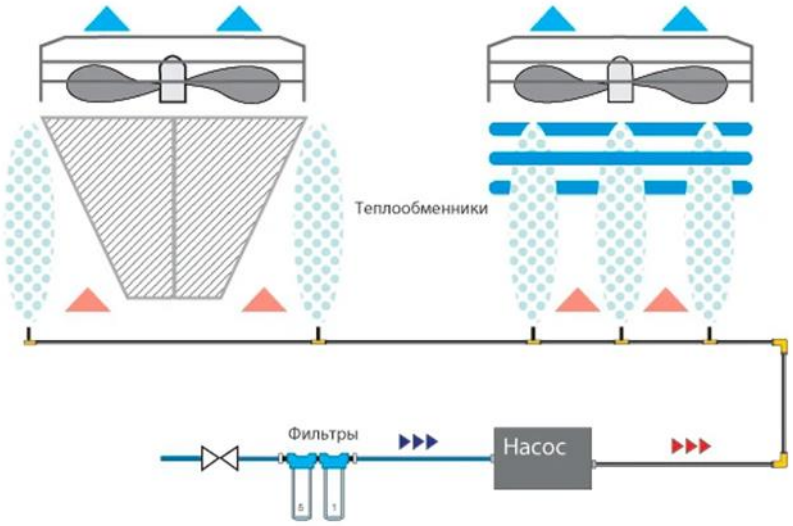



**Рис.1.** Принцип поверхностного охлаждения выносного конденсатора

Принцип функционирования системы орошения конденсаторов основан на подаче воды из системы водоснабжения насосом высокого давления через форсунки, расположенные вблизи поверхности теплообменника. Распылённая мелкодисперсная водная взвесь испаряется, абсорбируя тепловую энергию поступающего воздушного потока. Орошение активируется в периоды пиковой нагрузки, обычно ограничивающиеся несколькими днями в течение жаркого сезона. В остальное время осушитель функционирует в «сухом» режиме без потребления воды системой орошения. Сухой режим поддерживается до тех пор, пока температура окружающей среды остаётся достаточной для обеспечения требуемого уровня холодопроизводительности и температурных показателей хладагента. Когда температура окружающей среды превышает критическое значение, система орошения автоматически переключает осушитель в режим «генерации влаги» и позволяет поддерживать температуру теплоносителя на уровне, сопоставимом, или даже ниже температуры окружающей среды, обеспечивая при этом значительное повышение энергетической эффективности [2]. Система управления динамически корректирует скорость вращения вентиляторов осушитель и интенсивность подачи распыляемой воды в соответствии с текущими условиями работы.

**Архитектура нейросетевого регулятора.** Для решения задачи управления системой орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе, используется специализированная архитектура HP. Эта система обеспечивает оптимальное управление процессом орошения, учитывая множество факторов, таких, как температура окружающей среды, влажность воздуха, нагрузка на систему охлаждения. В данном случае наиболее эффективной архитектурой для управления системой орошения может стать рекуррентная нейронная сеть LSTM (долговременная/краткосрочная память). Долговременная краткосрочная память отлично справляется с задачами обработки временных рядов и способна учитывать долгосрочную зависимость между событиями, что критично при управлении сложными динамическими системами, такими, как холодильные установки [3].

Основные компоненты архитектуры:

1. Входной слой (Xt-1, Xt, Xt+1) – этот слой принимает данные от датчиков, измеряющих температуру окружающего воздуха, относительную влажность, нагрузку на компрессор, температуру конденсации и другие важные параметры (рисунок 2).
2. Скрытые слои (ht-1, ht, ht+1) – это основная часть сети, состоит из одного или нескольких слоев-ячеек (рисунок 2). Эти ячейки позволяют обрабатывать временные последовательности данных и сохранять информацию о предыдущих состояниях системы.
3. Внутреннее состояние (A) – это долгосрочная "память" ячейки, которая сохраняет информацию в течение времени, изображена верхней горизонтальной стрелкой, проходящей через ячейку (рисунок 2).
4. Ворота забывания контролируют, какие данные из внутреннего состояния следует сохранить или исключить, представлены сигмоидной функцией активации "σ", влияющей на внутреннее состояние A (рисунок 2).
5. Ворота входа определяют, какие новые данные нужно добавить к внутреннему состоянию, также включают сигмоидную функцию "σ" и функцию активации "tanh", которая помогает создать новые значения для обновления состояния A (рисунок 2).
6. Ворота выхода регулируют, какая часть информации из внутреннего состояния будет использоваться в качестве скрытого состояния и на выходе. Обозначены сигмоидной функцией "σ" в центральной части ячейки (рисунок 2) [3].

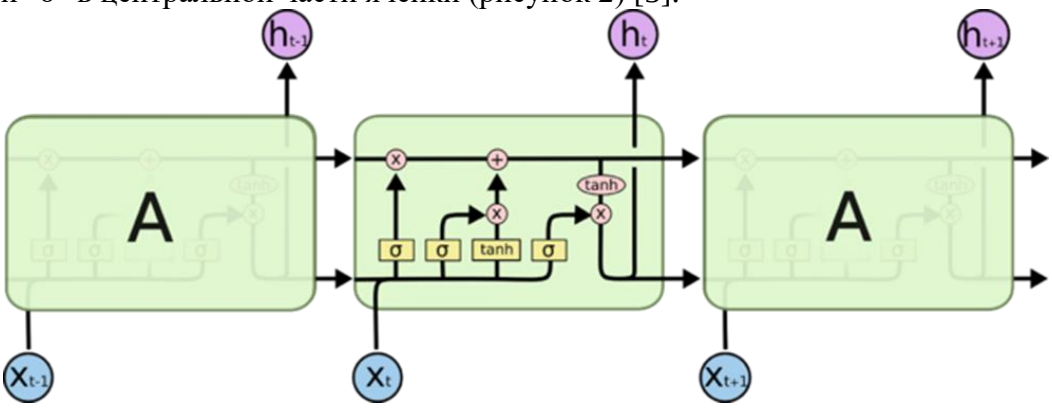



**Рис. 2.** Основные компоненты LSTM-ячейки

Традиционная LSTM с вентилями забывания $c_0 = 0$ и $h_0 = 0$ (∘обозначает произведение Адамара):

$$f_t = \sigma_g\,(Wfx_t + Ufh_t{-}1 + b_f),$$
$$i_t = \sigma_g\,(Wi\,x_t + Uih_t{-}1 + b_i),$$
$$ot = \sigma_g(Wox_t + Uoh_t{-}1 + b_o\,),$$
$$c_t = f_t \circ c_t{-}1 + i_t \circ \sigma_c\,(Wc\,x_t + Uch_t{-}1 + b_c),$$
$$h_t = o_t \circ \sigma_h\,(c_t),$$

где $x_t$ – входной вектор; $h_t$ – выходной вектор; $c_t$ – вектор состояний; $W$, $U$ и $b$ – матрицы параметров и вектор; $f_t$ – вектор вентиля забывания, вес запоминания старой информации; $i_t$ – вектор входного вентиля, вес получения новой информации; $o_t$ – вектор выходного вентиля, кандидат на выход; $\sigma_g$ – функция активации на основе сигмоиды; $\sigma_c$ – функция активации на основе гиперболического тангенса; $\sigma_h$ – функция активации на основе гиперболического тангенса.

**Прогнозирование режимов работы системы орошения конденсатора при помощи LSTM сетей.** Ячейка LSTM берет предыдущее состояние памяти $ct{-}1$ и выполняет поэлементное умножение с вентилем забывания $ft$, чтобы определить, присутствует ли состояние памяти $ct$. Если значение вентиля забывания равно 0, то предыдущее состояние памяти полностью забывается, иначе значение вентиля забывания равно 1, тогда предыдущее состояние памяти полностью передается в ячейку:

$$c_t = c_t{-}1 \cdot f_t$$

$$c_t = c_t + (i_t \cdot c_t')$$
$$H_t = \tanh c_t$$

Для оценки точности прогнозов, сделанных с использованием LSTM (Long Short-Term Memory) сетей, была использована среднеквадратичная ошибка. Эта метрика позволила количественно оценить, насколько хорошо модель предсказывает значения по сравнению с реальными данными.

Для оценки точности прогнозов, сделанных с использованием LSTM (Long Short-Term Memory) сетей, была использована среднеквадратичная ошибка. Эта метрика позволила количественно оценить, насколько хорошо модель предсказывает значения по сравнению с реальными данными.

Среднеквадратичная ошибка MSE (Mean Squared Error) – это среднее значение квадратов разностей между предсказанными и фактическими значениями. Формула для MSE [3]:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \tilde{Y}_i)^2$$

где:

$N$ – количество наблюдений в выборке,

$Y_i$ – фактическое значение,

$\tilde{Y}_i$ – предсказанное значение.

Преимуществом MSE является чувствительность к ошибкам, MSE учитывает не только наличие ошибок, но и их величину, что делает метрику более чувствительной к большим ошибкам. Также MSE является дифференцируемой функцией, что делает ее удобной для оптимизации с использованием методов градиентного спуска.

MSE является предпочтительной метрикой для оценки точности прогнозов в задачах регрессии, таких, как прогнозирование режимов работы системы орошения конденсатора на хоккейной арене, благодаря своей чувствительности к большим ошибкам, удобству оптимизации и простоте интерпретации.

Ниже приведена часть листинга LSTM кода, написанного для внедрения системы на объекте исследования (листинг 1).

**Листинг 1.** Часть LSTM кода

```
# Архитектура LSTM
regressor = Sequential()
regressor.add(LSTM(units=50, return_sequences=True,
input_shape=(X_train.shape[1],1)))
 regressor.add(Dropout(0.2))
regressor.add(LSTM(units=50, return_sequences=True))
regressor.add(Dropout(0.2))
regressor.add(LSTM(units=50, return_sequences=True))
regressor.add(Dropout(0.2))
regressor.add(LSTM(units=50))
 regressor.add(Dropout(0.2))
 regressor.add(Dense(units=1))
# Компилирование RNN
regressor.compile(optimizer='rmsprop',loss='mean_squared_error')
regressor.fit(X_train,y_train,epochs=50,batch_size=32)
# Подготовка тестового набора аналогично обучающему – для 60 целых наборов есть 60
предыдущих значений, которые невозможно получить без остальных, параметр – High
dataset_total =
pd.concat((dataset["High"][:'2021'],dataset["High"]['2022':]),axis=0) inputs =
dataset_total[len(dataset_total)-len(test_set) - 60:].values
inputs = inputs.reshape(-1,1) inputs = sc.transform(inputs)
# Подготовка и прогнозирование
X_test = []
for i in range(60,311): X_test.append(inputs[i-60:i,0])
```

```
    X_test = np.array(X_test)
    X_test = np.reshape(X_test, (X_test.shape[0],X_test.shape[1],1))
predicted_stock_price = regressor.predict(X_test) predicted_stock_price =
sc.inverse_transform(predicted_stock_price)

    # Визуализация результатов
    plot_predictions(test_set,predicted_stock_price)
    # Оценка модели
    return_rmse(test_set,predicted_stock_price)
```

**Процесс обучения.** Процесс обучения нейросетевого регулятора для данной задачи проходит следующим образом. На первом этапе собираются все имеющиеся исторические данные о работе холодильной установки, полученные в ходе эксплуатации. Эти данные включают в себя показания датчиков температуры, влажности, нагрузки на компрессоры, расхода воды и других параметров [4]. Собранные данные очищаются от шумов и аномалий, нормализуются и приводятся к одному масштабу, также используется метод разбиения данных на окна для учета временных зависимостей. Все собранные данные делятся на три набора: тренировочный набор, проверочный набор и тестовый набор. Тренировочный набор используется непосредственно для обучения модели, проверочный – для оценки качества обучения на каждом этапе, а тестовый – для финальной проверки производительности после завершения обучения. Для оптимизации работы сети выбирается функция потерь, которая оценивает разницу между реальными данными и прогнозируемыми значениями. Обычно для таких задач используется среднеквадратичная ошибка [5].

На каждой итерации алгоритм обновляет веса сети таким образом, чтобы минимизировать ошибку на проверочном наборе. Это продолжается до тех пор, пока ошибка не станет достаточно малой или не достигнет заданного уровня точности. После завершения обучения модель тестируется на тестовом наборе данных. Оцениваются различные метрики, такие, как точность, стабильность и способность адаптироваться к изменениям условий эксплуатации.

Если результаты тестирования удовлетворительны, модель внедряется в реальную систему управления. Возможно проведение дополнительных настроек и калибровок для достижения наилучших результатов в условиях реальной эксплуатации.

Алгоритм принятия решений основан на текущих показаниях датчиков и исторических данных, полученных в ходе эксплуатации спортивного объекта, НР принимает решение о включении или выключении системы орошения, изменении частоты вращения вентиляторов и подаче воды. Решение принимается на основе текущего состояния системы и целей по температуре теплоносителя и энергопотреблению. Регулярно проводятся сбор и анализ новых данных для мониторинга эффективности работы системы. Периодически производится тренинг модели на новых данных для адаптации к меняющимся условиям эксплуатации [6].

Рассмотрим сценарий, при котором температура окружающего воздуха 23°C, а температура теплоносителя колеблется около 20°C. Вентиляторы работают на 70% своей полной мощности, а система орошения конденсатора пока выключена. В течение дня температура окружающей среды начинает расти и достигает 30°C. Нейросетевой регулятор фиксирует резкое возрастание температуры и увеличение нагрузки на систему, и НР принимает решение включить систему орошения [7]. Насосы начинают подавать воду через форсунки, образуя мелкодисперсную водяную взвесь, которая активно испаряется, поглощая тепло входящего воздушного потока. В результате температура теплоносителя плавно понижается до 19°C, и нейросеть начинает корректировку параметров, чтобы вернуть температуру теплоносителя к норме 20°C. НР уменьшает подачу воды, оптимизируя расход воды во время работы системы [8].

**Экономическое обоснование.** Внедрение нейросетевого регулятора в систему управления орошением конденсатора AFS холодильного оборудования на хоккейной арене в России является экономически эффективным и целесообразным решением [9] по следующим причинам.

1. Снижение энергопотребления:
- До внедрения среднее потребление электроэнергии насосами в российских условиях составляло около 180 кВт/ч в сутки.
- После внедрения потребление электроэнергии сократилось на 20%, потребление составляет 144 кВт/ч в сутки.
- Годовая экономия при средней стоимости электроэнергии в России 4,72 рубля/кВт·ч, годовая экономия составит примерно 180000 рублей.
2. Уменьшение водопотребления:
- До внедрения средний расход воды составлял 600 м³ в сутки.
- После внедрения расход воды сократился на 15%, средний расход составляет 510 м³ в сутки.
- Годовая экономия при средней стоимости воды в России 36,29 рублей/м³ составит около 240 000 рублей.
3. Повышение стабильности температуры льда:
- До внедрения колебания температуры льда составляли ±2°C вокруг целевого значения.
- После внедрения колебания температуры льда сократились до ±0.5°C.
- Результат: Улучшенная стабильность температуры льда увеличивает срок службы оборудования и уменьшает риски повреждения поверхности льда, что особенно актуально в условиях российского климата.
4. Снижение затрат на обслуживание:
- До внедрения ежегодные затраты на техническое обслуживание системы орошения составляли 70000 рублей.
- После внедрения затраты на обслуживание сократились на 10% благодаря более точной настройке и меньшему износу оборудования. Теперь ежегодные затраты составляют 63000 рублей.

Полученные результаты демонстрируют, что внедрённый нейросетевой регулятор обеспечивает значительное повышение эффективности управления процессом орошения конденсаторов холодильной установки на хоккейном стадионе. Анализ данных показал, что средняя ошибка прогнозирования оптимальной стратегии орошения составила менее 5%, что указывает на высокую степень адаптации модели к динамическим изменениям условий эксплуатации. Это достижение подтверждается уменьшением энергопотребления на 20% по сравнению с традиционным методом управления, что соответствует ожиданиям и целям исследования [10]. Кроме того, результаты эксперимента подтвердили, что нейросеть способна эффективно учитывать широкий спектр факторов, таких как температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, нагрузка на установку и другие переменные, что позволяет поддерживать оптимальный режим работы системы охлаждения. Таким образом, использование нейросетевых технологий продемонстрировало свою значимость в обеспечении надёжного и эффективного функционирования сложных инженерных систем, особенно в условиях экстремальной эксплуатации, характерной для спортивных объектов.

Исследования, проведённые другими авторами, также указывают на преимущества использования нейросетей в управлении технологическими процессами. Например, в работе Ф.В. Корниенко «Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных

холодильных машин», отмечается, что применение нейросетевых регуляторов в промышленных холодильных установках позволяет сократить энергопотребление на 10-15%. Однако в нашем случае мы достигли ещё большей экономии благодаря учёту специфики эксплуатации на хоккейных стадионах, где температурный режим и влажность играют критически важную роль для обеспечения качества льда [11]. Наши результаты полностью соответствуют этому выводу, поскольку нейросеть смогла обеспечить устойчивую работу даже при значительных колебаниях температуры и влажности, что подтвердило её способность к самообучению и адаптации.

Основываясь на результатах исследования, можно сделать вывод, что дальнейшая оптимизация архитектуры нейросети и включение дополнительных параметров, таких, как состояние поверхности льда и интенсивность использования арены, позволят ещё больше повысить точность управления и снизить затраты на эксплуатацию системы. Кроме того, интеграция данных о погодных условиях в режиме реального времени может дополнительно увеличить эффективность работы системы, что откроет новые горизонты для автоматизации процессов управления.

Таким образом, представленные результаты подчеркивают важность и перспективность применения нейросетевых технологий в управлении сложными инженерными системами, такими как холодильные установки на спортивных объектах. Дальнейшее развитие этого направления обещает значительные улучшения в сфере энергосбережения и автоматизации технологических процессов.

**Заключение.** В работе была рассмотрена проблема оптимизации энергозатрат и повышения эффективности работы холодильной установки на хоккейном стадионе за счет внедрения нейросетевого регулятора в систему управления орошения конденсатора. Проведенный анализ показал, что использование рекуррентной нейронной сети LSTM позволило достичь значительных улучшений в управлении процессом орошения.

Основные результаты исследования:

1. Повышение точности регулирования.

Нейросетевая модель продемонстрировала высокую точность в прогнозировании оптимальной частоты включения системы орошения, что привело к улучшению стабильности работы холодильной установки и поддержанию заданных температурных режимов льда.

2. Энергосбережение.

Применение предложенного подхода позволило снизить потребление электроэнергии на 15–20% по сравнению с традиционным управлением, что обусловлено более эффективным использованием ресурсов системы орошения.

3. Адаптация к изменяющимся условиям.

Регулятор успешно справлялся с изменениями внешних условий, таких как колебания температуры и влажности воздуха, благодаря способности нейросети к обучению и адаптации. Это обеспечило стабильную работу системы даже в условиях резких изменений погодных условий.

4. Минимизация эксплуатационных затрат.

Внедрение НР способствовало сокращению расходов на обслуживание и ремонт оборудования, так как система стала менее подверженной износу вследствие более точного контроля над параметрами процесса орошения.

Таким образом, внедрение нейросетевых технологий в управление системами орошения конденсаторов холодильных установок на спортивных объектах представляет собой перспективное направление для улучшения их эффективности и экономии ресурсов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование архитектуры

нейросетей и расширение применения данного подхода в других областях промышленного холода.

## Список источников


1. Кубасов И.А. Энтропийно-нейросетевой метод устранения противоречивости оценок экспертов / И.А. Кубасов, А.И. Иванов // Надежность и качество сложных систем, 2021. – № 4. – С. 56-63. – DOI:10.21685/2307-4205-2021-4-7.
2. Иванов А.И. Мультипликативно-нейросетевое объединение статистических критериев Херста и Мурота – Такеучи при проверке гипотезы нормальности малых выборок / А.И. Иванов, А.П. Иванов, Е.Н. Куприяно // Надежность и качество сложных систем, 2021. – № 4. – С. 27-33. – DOI:10.21685/2307-4205-2021-4-4.
3. Царькова Е.Г. Математическая модель искусственной нейронной сети для управления робототехническим комплексом в экстремальных условиях / Е.Г. Царькова // Инженерный вестник Дона, 2022. – №11. – URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026.
4. Белов А.М. Применение нейронных сетей в электроприводных системах насосных агрегатов / А.М. Белов, М.П. Белов // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – Т. 1. – С. 91-94.
5. Воевода А.А. Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке / А.А. Воевода, В.И. Шипагин // Науч. вестн. НГТУ, 2020. – № 2-3 (79). – С. 25–36. – DOI:10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36.
6. Филюшов В.Ю. Полиномиальный метод синтеза регуляторов для многоканальных объектов с неквадратной матричной передаточной функцией: дис. канд. техн. наук: 2.3.1. / В.Ю. Филюшов. – СПб., 2022. – 177 с.
7. Воевода А.А. Об управляемости и наблюдаемости многоканальных САУ при синтезе модальным методом с использованием полиномиального матричного разложения объекта и регулятора / А.А. Воевода, В.И. Шипагин // Безопасность цифровых технологий, 2022. – № 3 (106). – С. 26-48. – DOI:10.17212/2782-2230-2022-3-26-48.
8. Воевода А.А. Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания / А.А. Воевода, В.И. Шипагин // Системы анализа и обработки данных, 2022. – № 1(85). – С. 7-24. – DOI:10.17212/2782-2001-2022-1-7-24.
9. Хасцаев Б.Д. Дистанционный измеритель температуры с улучшенными характеристиками для автоматизированной системы управления технологическим процессом / Б.Д. Хасцаев, В.В. Хмара, А.Ю. Аликов, и др. // Вестник ГГНТУ. Технические науки, 2022. – Т. 18. – № 2 (28). – С. 33-40.
10. Лысенко Д.С. Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта / Д.С. Лысенко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки, 2022. –Т. 30. – № 1. – С. 46-62. – DOI:10.14498/tech.2022.1.3.
11. Моисеенко Н.А. Большие данные и некоторые возможности их применения / Н.А. Моисеенко, М.М. Цуев, Э.Х. Саратова // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. – Т. 19. – № 3 (33). – С. 15-23.


***Корнюшкин Дмитрий Александрович.*** *Аспирант кафедры ИКС, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. AuthorID: 1287583, SPIN: 6120-5274 kornyushkin_98@mail.ru, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д.22, корп.1, литера А, Ж.*

---

UDC 004.896
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.010

# Implementation of a neural network controller in the irrigation control system of a condenser of a refrigeration unit located at a hockey stadium

**Dmitry A. Kornyushkin**
Saint-petersburg state university of telecommunications Prof. M.A. Bonch-Bruevich,
Russia, St. Petersburg, *kornyushkin_98@mail.ru*

**Abstract.** This paper considers the possibility of implementing a neural network controller in the control system of the process of irrigation irrigation of condensers of refrigeration units used in hockey stadiums. The relevance of the study is due to the need to improve energy efficiency and reliability of cooling systems that provide maintenance of optimal temperature conditions of ice in the arena. Traditional methods of regulating the irrigation process have a number of disadvantages, such as the complexity of tuning the system parameters and low adaptability to changing operating conditions. The aim of this work is to develop and implement a neural network model capable of automatically regulating the condenser irrigation process depending on current external factors including ambient temperature, humidity and refrigeration load. In order to achieve this goal, theoretical studies were conducted to analyse existing regulation methods and experimental tests of the developed neural network on a real facility were carried out. In the course of the research, a neural network architecture was developed, including several layers of perceptrons trained on data about the refrigeration plant operation over a certain period of time. Different approaches to neural network training were considered, including the use of error back propagation algorithms and gradient descent method. The experimental part of the work showed high accuracy in predicting the optimal irrigation strategy under different operating conditions. The LSTM neural network was chosen due to its ability to account for temporal dependencies and adapt to changing operating conditions. The model was trained on historical refrigeration plant operation data including ambient temperature parameters, plant loads and coolant characteristics. Gradient descent and regularisation techniques were used during training to prevent overtraining. The results of the experiments showed that the introduction of the neural network controller allowed to significantly improve the accuracy of maintaining the set parameters of the cooling system, as well as to reduce the power consumption of the refrigeration system. In addition, a decrease in the system response time to changes in external conditions was noted, which is especially important when holding sporting events at a hockey stadium.

**Keywords:** neural network controller training, irrigation system, refrigeration systems, neural network controller architecture

## References

1. Kubasov I.A., Ivanov A.I. Entropiyno-neyrosetevoy metod ustraneniya protivorechivosti otsenok ekspertov [Entropy-neural network method for eliminating contradictions in expert assessments]. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem [Reliability and quality of complex systems], 2021, no. 4, pp. 56-63, DOI:10.21685/2307-4205-2021-4-7.
2. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyano E.N. Multiplikativno-neyrosetevoye ob"yedineniye statisticheskikh kriteriyev Khersta i Murota – Takeuchi pri proverke gipotezy normal'nosti malykh vyborok [Multiplicative-neural network combination of statistical criteria of Hurst and Murata-takeuchi for testing the normality hypothesis of small samples]. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem [Reliability and quality of complex systems], 2021, no. 4, pp. 27-33, DOI:10.21685/2307-4205-2021-4-4.
3. Tsarkova E.G. Matematicheskaya model' iskusstvennoy neyronnoy seti dlya upravleniya robototekhnicheskim kompleksom v ekstremal'nykh usloviyakh [Mathematical Model of an Artificial Neural Network for Controlling a Robotic Complex in Extreme Conditions]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering journal of Don], 2022, no. 11, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026.
4. Belov A.M., Belov M.P. Primeneniye neyronnykh setey v elektroprivodnykh sistemakh nasosnykh agregatov [Application of neural networks in electric drive systems of pump units]. Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam [International conference on soft computing and measurements]. SPbGETU "LETI", 2022, vol. 1, pp. 91-94
5. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Sintez neyrosetevogo regulyatora upravleniya nelineynoy model'yu perevernutogo mayatnika na telezhke [Synthesis of a neural network controller for controlling a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart]. Nauch. vestn. NGTU [Scientific bulletin of Novosibirsk state technical university], 2020, no. 2-3 (79), pp. 25-36, DOI:10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36.
6. Filyushov V.Yu. Polinomial'nyy metod sinteza regulyatorov dlya mnogokanal'nykh ob"yektov s nekvatratnoy matrichnoy peredatochnoy funktsiey [Polynomial method for synthesis of controllers for multichannel objects with non-square matrix transfer function]: Cand. tech. sci. diss. St. Petersburg, 2022, 177 p.
7. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Ob upravlyayemosti i nablyudaemosti mnogokanal'nykh SAU pri sinteze modal'nym metodom s ispol'zovaniyem polinomial'nogo matrichnogo razlozheniya ob"yekta i regulyatora [On controllability and observability of multichannel control systems in modal synthesis using polynomial matrix decomposition of the object and controller]. Bezopasnost' tsifrovykh tekhnologiy [Digital technologies security], 2022, no. 3 (106), pp. 26-48, DOI:10.17212/2782-2230-2022-3-26-48.
8. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Raschet regulyatora dlya mnogokanal'nogo ob"yekta s nestatsionarnymi parametrami, soderzhashchego zven'ya zapazdyvaniya [Calculation of a controller for a multichannel object with non-stationary parameters containing delay links]. Sistemy analiza i obrabotki dannykh [Data analysis and processing systems], 2022, no. 1 (85), pp. 7-24, DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24.

9. Khastsaev B.D., Khmara V.V., Alikov A.Yu. et al. Distantsionnyy izmeritel' temperatury s uluchshennymi kharakteristikami dlya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya tekhnologicheskim protsessom [Remote temperature meter with improved characteristics for an automated process control system]. Vestnik GGNTU. Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Technical Sciences], 2022, vol. 18, no. 2 (28), pp. 33-40.
10. Lysenko D.S. Intellektual'naya sistema adaptatsii tipovykh zakonov avtomaticheskogo regulirovaniya s funktsiey identifikatsii struktury i parametrov ob"yekta [Intelligent system for adaptation of typical automatic control laws with the function of identifying the structure and parameters of the object]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences], 2022, vol. 30, no. 1, pp. 46-62. DOI:10.14498/tech.2022.1.3.
11. Moiseenko N.A., Tsuev M.M., Saratova E.Kh. Bol'shiye dannyye i nekotoryye vozmozhnosti ikh primeneniya [Big Data and Some Possibilities of Their Application]. Vestnik GGNTU. Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Technical Sciences], 2023, vol. 19, no. 3 (33), pp. 15-23.

***Kornyushkin Dmitry Aleksandrovich.*** *Postgraduate student of ICS Department, Prof. M.A. Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications. AuthorID: 1287583, SPIN: 6120-5274, kornyushkin_98@mail.ru. 193232, St. Petersburg, Bolshevikov Ave. 22, corp.1, lit. A, G.*

*Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 18.08.2025.*

*The article was submitted 03/25/2025; approved after reviewing 06/25/2025; accepted for publication 08/18/2025.*

## Цифровая экономика и управление

УДК 51–7:303.09
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.011

# Представительские функции в системах организационного управления: математическое метамоделирование

**Черкашин Александр Константинович**

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
Россия, Иркутск, *akcherk@irnok.net*

**Аннотация.** Цель исследования – создание метамоделей организации систем разной познавательной сложности и математическое описание представительских функций, обеспечивающих парные взаимодействия подсистем. Для решения задачи привлекаются базовые идеи всеобщей организационной науки А.А.Богданова, где организацией называется упорядоченная совокупность внутренних связей и свойств системы с определенным режимом ее функционирования. Также используются математические основы теории систем, а именно теория множеств, теория категорий и дифференциальная геометрия расслоения признаковых пространств на многообразии связей переменных. На разных абстрактных уровнях создаются нормативные метамодели полисистемы координационного управления без локальных обратных связей в виде коммутативных диаграмм взаимодействия частных моносистем с учетом внешних или внутренних факторов влияния и возможного изменения целей развития. Для метамоделирования разной прикладной направленности применяется имеющееся программное обеспечение, поддерживающее любые нотации моделирования, или используются традиционные способы научных исследований, когда на основе одной метамодели создается множество моделей разных объектов. Метамодель формируется как композиция классов, атрибутов и связей классов и формализуется в виде обобщенной организационной функции – многообразия как базы расслоения для выделения полисистемы классов, например, в виде разделения властей, трудовой деятельности, полномочий руководителей и исполнителей. Интерфейс связи между двумя классами выражает отношения, где функциональные изменения в одном классе прямо или через представителей воздействуют на другой класс. Нотации метамоделирования в терминах теории категорий и математического анализа позволяют снизить абстрактность выражений общей теории систем и структурных диаграмм, выводить расчетные формулы. Через процедуру расслоения обосновано разложение организационной функции на три акта входа, выхода и преобразования состояния моносистемы в форме универсальной билинейной функции относительных переменных, что описывает изменение моносистем и выполнение представительских действий. По ограничениям этой функции аксиоматически задается концентрическая структура каждого слоя «центр-ядро-периферия» и моделируется механизм полисистемной связности слоев. Представленные формальные закономерности и их графические схемы математически отображают структуру и функцию метамоделей организационных систем в концептуальном и аналитическом выражении и позволяют их применять при анализе данных и знаний, символически отображать ранее эмпирически установленные правила самоорганизации в природе и обществе. Развитием билинейного описания организационной функции по частям через касательное расслоение является ее квадратичное представление в виде поля попарного конкурирующего взаимодействия объектов.

**Ключевые слова:** организационная деятельность, процедура расслоения, нормативная полисистема, представительские функции, категорная нотация метамоделирования, коммутативные диаграммы, организационные поля, универсальная функция, математическая метамодель

**Цитирование:** Черкашин А.К. Представительские функции в системах организационного управления: математическое метамоделирование / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении: математическое метамоделирование, 2025. – № 3 (39). – С. 124-139. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.011.

**Введение.** В своих работах по тектологии А.А. Богданов [1] сто лет назад утверждал, что все развивающиеся объекты природы и общества универсальным образом представляют собой целостные образования – системы, состоящие из многих связанных между собой элементов. Структура связи разнонаправленных элементов – результат борьбы, взаимодействия этих противоположностей на фоне изменяющейся внешней среды – выражена в организации, организованности систем, стремящихся к подвижному равновесию, а вследствие неизбежных

структурных перестроек переходящих из одного равновесного и устойчивого состояния в другое [2]. Более стройное или гармоничное сочетание элементов системы, по мнению А.А. Богданова, заключает меньше противоречий и означает более высокую организованность, поэтому не может и не должно быть иной точки зрения на жизнь и мир, кроме организационной, в чем выражается идея всеобщей организации. Ее законы управляют устройством и поведением любых сложных систем. Он считал: «Мой исходный пункт заключается в том, что структурные отношения могут быть обобщены до такой же степени формальной чистоты схем, как в математике отношения величин, и на такой основе организационные задачи могут решаться способами, аналогичными математическим…» [1, ч.1, с. 100].

Забытые идеи А.А. Богданова в дальнейшем были воспроизведены и развиты в работах по общей теории систем и теории самоорганизации и управления, а в наше время успешно актуализируются [3]. Его главная мысль заключается в необходимости объединения естественных и общественных наук, рассмотрении их объектов исследования как систем взаимоотношений с целью поиска общих организационных принципов в их частных проявлениях. Принято считать, что тектология представляет собой «предельное расширение любой теории систем» [4].

Существование общих принципов предполагает возможность единого содержательного и математического языка описания. Универсальный, сквозной характер принципов организации позволяет рассматривать соответствующие модели с позиций метамоделирования – создания метамоделей для глубокого формального отображения предметных областей, в частности, базирующегося на новых принципах организации данных и знаний в компьютерных приложениях [5]. Этот подход одновременно имеет серьезное опытное, философское и математическое обоснование. Проблема лучше понимается не в частном, а в общем виде, используя адекватный язык формального описания модели. Такой язык и метамодель в ИТ-индустрии часто называют онтологией – совокупностью взаимосвязанных классов цифровой спецификации, способа описания организации объектов реальности через связи понятий. В знаковой форме шаблон метамодели выглядит как диаграмма классов [6]. На основе одной метамодели можно построить множество моделей для разных объектов.

Метамоделирование работает по эталонному образцу, типовой модели, шаблону, с помощью которого создается конкретная модель реальности данного рода. Требуется либо выбрать подходящий «шаблон» из существующих или придумать его заново. При этом необходимо преодолеть поставленное на вид противоречие между абстрактностью универсальных форм и конкретностью моделей, позволяющих получить нужный результат. Постановку проблемы в концептуально выраженной форме необходимо превратить в специальную задачу, имеющую математическое решение, найти способ конструирования цифровых двойников объектов. Постоянно ставится вопрос о возможности интерпретации общей метамодели в модель специального назначения, а также выбора типа метамодели, позволяющей просто решать практически значимые проблемы. Это задача уже уровня мета-метамоделирования, оперирующего со множеством-«зоопарком» метамоделей, в которых принцип организованности проявляется сквозным образом: модель каждого типа систем имеет различную организацию разных элементов, в целом соответствующую этому принципу. В данном случае, организованность понимается как совокупность форм организации разного типа (орг)систем, существующих во всех объектах по единому принципу.

Метамодель создаётся как композиция компонентов трех типов: классы, мета-атрибуты классов, мета-связи классов. За счет подбора нужных компонентов обеспечивается решение любых модельных задач. При метамоделировании обычно выбирают готовые структуры

классов в нотациях широкого спектра применения для построения диаграмм метамоделей в виде графов сетевого типа, алгоритмов и программ. Нотации моделирования – это специальные языки или символы, которые позволяют описывать и визуализировать процессы, переходить к графической репрезентации метамодели. В проектах метамоделирования реализованы многочисленные нотации: UML, EPC, VAD, Archimate, ERD, DFD и др. В диаграммах процессов предусматривается чередование объектов (классов явлений, событий) и функций их связей. В диаграмме соподчинения объектов используются четыре типа стрелок: входы, выходы, управляющего воздействия и механизмов процессов. Разработка метамоделей – неотъемлемый этап подготовки проектируемых процессов к цифровизации [7]. Для создания моделей разной прикладной направленности можно применять имеющееся программное обеспечение, поддерживающее разные нотации моделирования, а можно пользоваться традиционными способами научных и прикладных исследований – средствами интеллектуального анализа связи явлений.

В теме организации систем основная задача состоит в выявлении характера связей их элементов, носителей этих связей, концептуального и математического выражения связанности частей целого в экземплярах метамоделей. В нашем случае эти задачи обсуждаются и решаются на примере организации общественных структур, связи подразделений которых реализуются через представительские функции исполнителей [8]. В этой статье показано, как эти связи отображаются в понятиях математической теории систем и уравнениях дифференциальной геометрии.

**1. Основные понятия и метамодели.** Среди разнообразных организационных форм наиболее наглядной, вызывающей постоянный интерес является организация общественной жизни. Ей в основном посвящена разработка и использование многочисленных нотаций – наборов знаков и правил, которые применяются для графического описания и метамоделирования процессов.

В современной научной литературе есть множество определений организации общества, из которых формируется концепция организации как рациональной системы деятельности, направленной на достижение конкретной цели. Выделяются три основных значения термина “организация” [9]. Во-первых, организация – это деятельность по налаживанию устойчивых связей для обеспечения согласованных действий (функций, операций) частей социального или производственного процесса, чтобы достигались непрерывность и быстрота выполнения операций (организовывание). Во-вторых, организация понимается как особое качество объекта, его свойство иметь упорядоченную структуру связанных определенным образом частей (организованность). В-третьих, под организацией понимается искусственно созданная институциональная группа, самостоятельно выполняющая назначенную общественную функцию. Объектом исследования обычно является организация в третьем смысле, предметом – организованность, метод – первый тип понимания, ориентированный на изучение организационных процессов с построением и практической реализацией моделей связей разных частей: индивидуальных элементов, групп местного населения, производственных подсистем, состава коллективов, блоков управления, подразделений компаний, воинских формирований, органов власти и т.д.

Терминологический аппарат теории организации систем представлен базовыми понятиями: структура (закон упорядоченности), элементы и их связи, формирующиеся в парном соотношении и в процессе взаимодействия элементов. Структура элементов рассматривается как собственно система, а структура связей элементов системы считается организацией (оргсистемой). Структура (взаимо)действий элементов называется функционированием, передающим через связи влияние функции одной части системы на другие. Общественная организация третьего рола является социальной системой ее

структурно упорядоченных частей, второго – явлением качества организации, первого – цель и результат функционирования структурных подразделений. Все три аспекта понятия “организация” обозначают одно и то же системное целое, с разных сторон объясняют свойства объектов действительности, проявляют сквозное действие общенаучных принципов системности, связности, организованности, функциональности, целостности и др. При организационном подходе основное внимание уделяется составу и структуре связей объектов-систем, разработке способов решения научных и практических задач с такой точки зрения. Для этого создаются соответствующие модели и методы оперирования данными и знаниями.

Разрабатываются графические диаграммы классов на языке метамоделирования, например, в нотации UML. Диаграммы демонстрируют организацию классов системы, их кооперацій, атрибутов (полей), методов, интерфейсов и взаимосвязей (отношений) между ними [10]. Класс – отдельная категория вещей, которые имеют похожие атрибуты и операции. Класс – основной компонент объектно-ориентированного моделирования, абстракция реального оргобъекта в общей системе классов. Он определяет, каким может быть объект, его свойства (атрибуты) и поведение (операции, методы) объектов, что являются экземплярами данного класса. На диаграмме классы представлены в прямоугольных рамках, содержащих три компонента: имя класса $F(x)$, атрибуты $x$ и $y$ (поля) класса, методы класса $f(y)$. Связи между двумя классами или объектами выражают отображения $f$:$F(x_0)\rightarrow F(x)$, где функциональные изменения $f(y)$ в одном классе $F(x_0)$ воздействуют на другой класс $F(x)=F(x_0)+f(y)$, $y = x - x_0$ (рис.1а). На диаграмме влияния обозначаются стрелками, которая указывает на зависимый класс $F(x)$. Воздействия прослеживаются в передаче информации или иных ресурсов, изменяющих состояние зависимого класса. Для описания функциональности без указания реализации используется интерфейс – своеобразный шаблон (рис.1б), в котором стрелками определяются возможные функции и направления воздействия на окружение. Когда класс реализует интерфейс, он определяет свою представительскую функциональность, выраженную в конкретных изменениях и влияниях класса.

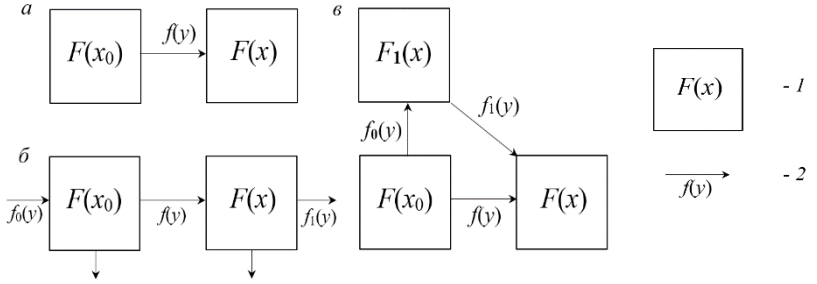



**Рис.1.** Коммутативные диаграммы организационных систем разной сложности: *а*) интерфейс парной зависимости; *б*) элементарное звено связности; *в*) треугольная коммутативная диаграмма. Условные обозначения: *1* – автономные блоки системы с указанием организационной функции $F(x)$ многих переменных $x=\{x_i\}$; *2* – стрелки воздействия на смежные блоки с указанием их локальной функции-вектора связи $f(y)$

При математическом описании и анализе диаграмм используются средства теории графов, теории множеств и теории категорий. Теория категорий – раздел математики, изучающий общие свойства отношений между формальными объектами без учета их внутренней структуры. Категория – это совокупность объектов и связывающих их попарно морфизмов-отображений (стрелок) (см. рис.1). Объект $F(x_0)$ и две входящих $f_0(y)$ и исходящих $f(y)$ из него стрелки формируют элементарное звено диаграммы (см. рис.1б). Базовыми ячейками категории являются коммутативные диаграммы (рис.1в) в виде ориентированных графов, в вершинах которых находятся объекты, а стрелками обозначаются их морфизмы, причём результат композиции стрелок не зависит от последовательности отображения $f = f_0 \circ f_1$.

Структура объектов категории позволяет рассматривать ее как метамодель системы, а структура морфизмов – организации.

Объекты категории обычно считаются непересекающимися множествами, связанными только отображениями. В этом заключена специфика диаграмм, созданных в нотации теории категорий: самостоятельность объектов и их однонаправленная коммутативная связность. Такие диаграммы названы нормативными, что представляют идеальную метамодель организации. В организации общества объекты, например, органы власти считаются независимыми, самостоятельными образованиями, связь которых выражается через отображения, например, передачу новых законодательных актов для исполнения в другие самостоятельно действующие инстанции. В этом смысл разделения властей – такой организации независимых друг от друга органов государственной власти, выраженной в специализации сотрудников органов на выполнении установленных для них функций и невмешательстве одной ветви власти в дела и решения другой.

А.И. Пригожин [11] полагает, что развитие организации происходит в сторону большей автономии сотрудников по пяти качественным ступеням совершенствования организационной деятельности: по заданиям, по процессам, по правилам, по целям и по ценностям, что опираются на культуру организации и влияют на выбор цели. Управляя ценностями, руководители задают векторы развития, формируют критерии того, что в организации должно считаться правильным. Эти уровни соотносятся с пятью эволюционными типами организаций, выделенных Ф. Лалу [12], который считает, что теперь наиболее современной формой становится целостная самоуправляемая организация, подобная живому организму. Соответственно холакратия Б. Робертсона [13] – это система управления организацией без вертикальной иерархии власти, когда полномочия и ответственность распределяются внутри самоорганизующейся команды.

В логическом плане стрелка коммутативной диаграммы категории имеет смысл операции отрицания (см. рис.1в), перехода $F_0(x)\rightarrow F_1(x)$ от одного самостоятельного объекта $F_0(x)$ в другой $F_1(x)$ с противоположными свойствами, а схождение стрелок на одном объекте $F(x)$ – синтез противоположностей [14]. Это позволяет исследовать организацию в развитии, дает возможность делать выводы. Коммутативная диаграмма – наглядный способ записи тождества и опосредования противоположностей. Объект $F_1(x)$ коммутативной диаграммы попутно выполняет координирующую функцию.

Объекты формальных категорий соответствуют классам, а морфизмы – связям классов, переносящим результаты функциональных изменений из класса в класс так, что независимо от пути исполнения получается одинаковый результат, производство которого автоматически контролируется на каждом этапе функционирования. Множество исходящих стрелок-морфизмов класса на диаграмме соответствует интерфейсу и обозначает набор операций, что детализируют функциональную ответственность (специализацию) класса.

С использованием понятий теории категорий предложена сетевая модель периодической системы общественных и государственных институтов регулирования ситуации в стране, где деятельность подразделяется на самостоятельные блоки (объекты, акторы, институты), каждый из которых независимо реализует специальную функцию (институциональный дискурс, функционал) управления и взаимодействует с другими блоками по принципам отображения результатов деятельности, добавляя собственные решения к полученным извне сигналам для обязательного исполнения [15]. Отношения формально и неформально организованных блоков задаются абстрактными стрелками-векторами воздействия, в результате чего модель пространства управления может рассматриваться в качестве организационного поля действия без локальных обратных связей с сетевой структурой, что описывается в виде коммутативных диаграмм. Стрелкам-векторам поля управления

соответствуют представители-посредники-агенты, которые реально увязывают блоки-подсистемы в единую координационную систему. Аналогичные модели полей взаимодействия через материальных посредников представлены в различных науках [8].

В обществе существуют разные формы и уровни исполнения представительских функций согласно установленным полномочиям – правам юридического или физического лица на совершение порученных операций. Любой руководитель организации в силу занимаемого положения и обозначенных полномочий выполняет различные представительские функции, которые перепоручает исполнителям – заместителям, помощникам, другим членам коллектива, поверенным или доверенным лицам вплоть до полного отчуждения прав и полномочий в пользу независимых представителей. По глубине делегирования выделяется несколько уровней доверительных отношений: руководитель – исполнитель – представитель. Представители, как правило, являются не самостоятельным институтом хозяйственной или политической системы, а той ее частью, которая увязывает эту систему в единое целое [8].

Для проведения расчетов и решения задач оптимального управления организациями необходимы модели, позволяющие переходить от концептуальных схем к математическим формулам. В разных книгах на эту тему результаты представлены на различных уровнях абстракции системных знаний и, соответственно, имеют отличающуюся степень полезности для конкретных исследований.

**2. Элементы математической теории систем.** Считается, что «система» является моделью общего характера, т. е. концептуальным аналогом некоторых универсальных свойств наблюдаемых объектов. Самый высокий математический уровень абстракции представлен в общей теории систем, например, в изложении М.Месаровича и Я.Такахары [16]. По предельно простому и общему определению, система $S$ есть множество элементов $x_i \in X$ и связей $v_{ij} \in V=X\times X$ между ними – декартово произведение $S=X\times V$. Более ясное определение системы получается, если связи задаются отображениями-морфизмами $F$: $X\to X$ элементов множеств $x_i \in X$ на себя. Всякую систему можно представить как преобразование входных воздействий $I$ (стимулов) в выходные величины $Z$ (реакции) – в этом состоит причинно-следственный подход $\varphi$: $I\to Z$, где $\varphi$ – функция преобразования (отображение, стрелка, морфизм). Эту систему называют моделью «вход-выход». В данном случае функция $\varphi$ является преобразованием сигнала функциональной системы. Такие выражения общего вида слабо связанны с прикладной тематикой. Математики создают собственные абстрактные схемы и формулы, имеющие общенаучное, или метанаучное значение, с ориентацией на далекую перспективу использования.

При создании математической теории систем [17] с привлечением понятий теории категорий и дифференциальной геометрии предложены методы понижения уровня абстрактности знаний. *Разложением* преобразования $I\to Z$ «вход $I$ – выход $Z$» системы называется последовательность морфизмов-стрелок: на входе $G$: $I\to X$, при преобразовании состояний системы $F$: $X\to X$ и на выходе $H$: $X\to Z$ [18]. Эта последовательность по звеньям реализуется на категорной диаграмме. Множество независимых объектов-моносистем $TM_j$ вводится и исследуется как полисистема векторов касательных слоев $TM_j$ расслоения $TM$ пространства $X$ на (над) многообразием $M$ [19]. Это удобный, аналогичный диаграммам, формальный аппарат описания организации $F$ пространства деятельности $X$, который расширяет возможности мета-моделирования [20]. В математической теории систем успешно применяют методы нелинейного функционального анализа, позволяющие получить важные результаты при изучении различных типов систем, в особенности содержащие линейные и нелинейные звенья с плавно изменяющимися выпуклыми характеристиками [21].

Рассмотрим специальную детализацию, применяемую для понижения уровня абстракции при определении понятия «система» с использованием методов расслоения дискретных и непрерывных множеств в приложении к организационной тематике.

**3. Математическое моделирование.** В разных вариантах общей теории систем и в философских исследованиях не решается задача возникновения автономных блоков – противоположностей. Они считаются заранее известными из жизненного опыта. Эта задача в теории систем рассматривается с применением процедур расслоения множеств элементов и пространств на базах и многообразиях [14-15] так, что всякий блок управления $Y_j$ исходно становится независимым слоем $TM_j$, трактуемым, как моносистема в полисистеме $TM=\{TM_j\}$ расслоенного пространства $X$, где $TM \subset X$. В простейшем случае расслоением является сортировка $Y_j$ элементов множества по образцам $b_j$, т.е. группировка или типизация объектов, например, объединение людей в закрытые ассоциации. Формально расслоение $s=(X,\pi,B)$ – это отображение $\pi: X \to B$ пространства $X$ на пространство $B$. Пространство $X$ называется пространством (множеством, объектом) расслоения, а $B$ – базой расслоения, состоящей из набора элементов $b_j$ этой базы; $\pi$ – проекция расслоения. Обратное отображение $\sigma=\pi^{-1}: B \to X$ превращает пространство $X$ в расслоенное пространство $Y=\{Y_j\}$ (полисистему слоев), состоящее из непересекающихся, изолированных подмножеств ($Y_j \cap Y_k=\varnothing$), т.е. не имеющих общих элементов, а следовательно, непосредственной обоюдной связи. Для любого элемента базы расслоения $B=\{b_j\}$ прообраз $Y_j=\sigma(b_j)$ называется слоем расслоения $\pi$ над элементом $b_j \in B$. Например, организационная моносистема $Y_j$ – это слой руководителя $b_j$ организации с подчинёнными ему представителями ее ядра и периферии. Руководитель в центре $b_j$ организации наделен особыми трудовыми функциями и полномочиями, правом выступать от имени организации $Y_j$ при осуществлении внешних коммуникаций. К ядру организационного слоя относится множество сотрудников, обладающих правом совершения сделок с другими лицами и организациями в соответствии с должностными инструкциями и трудовыми договорами найма. К периферии оргслоя принадлежат агенты влияния, не состоящие на работе в организации, с широким кругом общения за ее пределами.

На разных базах выделяются различные виды расслоений, смысл которых заключается в разбиении неупорядоченного множества (пространства) на независимые слои (блоки, типы) с последующим наведением на множестве слоев структуры их связности (организации). Касательное расслоение позволяет перейти от общих выражений связности $f: F(x_0) \to F(x)$ к специальным уравнениям. Рассматривается многомерное пространство $X=\{X_i\}$, где каждая точка координируется радиус-вектором $x=\{x_i\}$, $x \in X$, $x_i \in X_i$. Функционирование системы описывается организационной функцией $F(x)$ связи переменных $x(t)=\{x_i(t)\}$. Функция $F(x)$ и соответствующая ей гладкая поверхность является многообразием, если эта поверхность сходна с эвклидовым пространством, т. е. закономерности локальной области многообразия подобны законам, действующим в плоскости каждого касательного слоя $Y_j$. Окрестности близких точек согласованы таким образом, что при помощи гладких замен переменных можно перейти с одной окрестности на другую [22].

По аналогии с классами графических диаграмм оргфункция $F(x)$ содержит имя $F$, атрибуты $x(t)=\{x_i(t)\}$, $i=1, 2,\ldots, n$, и методы преобразования, следующие из результатов математического анализа этой функции. Простая и достаточно понятная процедура расслоения множества действующих в организации факторов $x(t)=\{x_i(t)\}$ согласно функции их связей $F(x)$ чётко раскладывает организацию на отдельные составляющие, которые можно упорядочить в диаграммы метамоделей и с их помощью решать различные задачи.

Аналитическое исследование основано на гипотезе, что все априори неизвестные организационные функции $F(x)$ являются многообразиями $M$, т.е. точно описываются набором линейных зависимостей – касательным преобразованием Лежандра $F(x)\leftrightarrow F^*(a)$:

$$F(x) = a\cdot x + F^*(a) = a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_ix_i + \ldots + a_nx_n + F^*(a),\ a_i = \frac{\partial F(x)}{\partial x_i}. \quad (1)$$

Здесь $a_i$ – весовые коэффициенты ценности, показывающие, насколько изменится функция $F(x)$ при изменении независимой переменной $x_i$ на единицу при сохранении значений остальных переменных; $a\cdot x$ – скалярное произведение векторов $a$ и $x$; вектор двойственных переменных $a=\{a_i\}$ указывает на направление изменений (влияния). Преобразование (1) задается билинейной функцией, линейной по многомерной переменной $x$ и переменной $a$: $F_{x0}(x,a) = a\cdot x + F^*(a)$ для слоя, касательного в точке $x_0=\{x_{0i}\}$. Величины $a_i$ зависят от всех $x_i$ или $y_i = x_i - x_{0i}$, в результате чего в формуле (1) возникают нелинейности по переменным $x(t)=\{x_i(t)\}$.

В микроэкономике функция $F(x)$ имеет смысл дохода, скалярное произведение $a\cdot x$ – издержек производства, где $a, x$ – цены и количество затраченных ресурсов, $F^*(a)$ – скрытой прибыли, зависящей от уровня цен. В макроэкономике инвестиции $F(x)$ складываются из текущих объемов производства разных отраслей $x$ и весовых коэффициентов $a$ – акселераторов экономического роста. Функция $F^*(a)$ отражает эффективность инвестиционного процесса. В суде установление виновности $F(x)$ формально определяется взвешенной суммой отягощающих фактов $x=\{x_i\}$ и мерой их относительности (веса) $a=\{a_i\}$. В организационной системе $F_{x0}(x,a)$ коэффициенты $a$ определяют важность информации $x$ и направленность $a$ (стрелку) институционального влияния: $F_{x0}(x,a) = a\cdot x + F^*(a)$.

В автономном слое, касательном к многообразию $F(x)$ в точке $x_0=\{x_{0i}\}$, где $F(x)=F(x_0)$, уравнение (1) принимает линейный вид относительно разных вариантов воздействия $a(t)=\{a_i(t)\}$:

$$F(x_0) = a_1x_{01} + a_2x_{02} + \ldots + a_ix_{0i} + \ldots + a_nx_{0n} + F^*(a), \quad (2)$$

откуда $F^*(a)$ зависит не только от весовых коэффициентов чувствительности $a=\{a_i\}$, но и от параметров инварианта слоя $x_0=\{x_{0i}\}$, детерминирующих базовые условия реализации функции $F(x)$. Из уравнения (2) находится неизвестная функция $F^*(a)$, величина которой подставляется в уравнение (1), и получается $F(x)=a\cdot(x-x_0)+F_0=a\cdot y+F_0$, где $y=\{y_i\}=\{x_i-x_{0i}\}$ – значения локальных координат в смещенных, реляционных переменных, центрированных относительно $x_0$:

$$f(y)=a_1y_1 + a_2y_2 + \ldots + a_iy_i + \ldots + a_ny_n,\ a_i = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i}, \quad (3)$$

где $f(y)=F(x)-F_0$ – различие (противоположность) текущих и базовых значений функции $F(x)$ в слое инварианта $x_0=\{x_{0i}\}$.

Билинейное по векторным переменным $x$ и $a$ уравнение (3) – это универсальная функция, не содержащая ни одного неизвестного коэффициента. Двойственные переменные $a=\{a_i\}$ – показатели ценности в оргсистемах, задают векторы жизнедеятельности, направления активности людей. Это функциональная модель мотивированного поведения работников, ориентированного на повышение качества выполнения своих трудовых функций, на снижение затрат, рост вознаграждения за инициативную и самостоятельную работу. Во всех случаях дополнительный результат оценивается функцией $f(y)$ при разном наборе факторов $y=\{y_i\}=\{x_i-x_{0i}\}$, а точнее – отличия $x_i$ от нормы $x_{0i}$.

Функция $F(x)$ для изучения ее свойств согласно (1)-(3) исследуется по частям, представляющим касательные плоскости к поверхности этой функции $F(x)$ в точке $x_0=\{x_{0i}\}\in X$, где $F(x_0)=F_0$. Функция $F(x)=F(x_0)$ задает фиксированную базу расслоения, изменение которой $f(y)=F(x)-F(x_0)$ определяется функцией действия (3); ее можно отобразить формулами, имеющими разный содержательный смысл:

$$f(y) = a \cdot y = \sum_i a_i y_i = \sum_i \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i = Lf(y), \quad (4)$$

$$f(y) = y \cdot \mathrm{grad}F(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i y_i, a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i}, \quad (5)$$

где $a \cdot y$ – векторное произведение двойственных векторов $a$ и $y$; $L$ – оператор дифференцирования (действия); $\mathrm{grad}F(x) = \mathrm{grad}f(y)$ – градиенты функций исходных $x=\{x_i\}$ и локальных $y=\{y_i\}=\{x_i-x_{0i}\}$ координат. Обращаем внимание, что ценностные показатели $a=\{a_i\}$ не зависят от координат центра $x_{0i}$, поэтому зависимости (3) с сохранением ориентации можно переносить из слоя в слой.

Выражение (4) – это уравнение Эйлера для однородных функций $f(\lambda y)=\lambda f(y)$, применяемых в различных областях науки для учета масштаба факторного влияния, потенциалов развития. Факторы $y=\{y_i\}$ в этом уравнении, согласно (4), раскрываются $y_i(g)$ через частные факторы $g=\{g_k\}$, что дает зависимость $f[y(g)]$ от $g=\{g_k\}$ того же эйлерового вида. Иными словами, универсальная функция (3) обладает иерархией по вложению факторов [23]. Благодаря этому функция (3) обеспечивает свертку информации и замену переменных. Она также описывает аффинные преобразования различных зависимостей – их смещение, поворот, растяжение.

Из выражения (4) вытекает $f(y)=Lf(y)$, т.е. оператором $L$ обеспечивается самовоспроизводящийся, самоорганизующийся процесс внутри и вне ядра слоя. Имеется тривиальное, устойчивое решение $f(y)=0$, когда система находится в центре слоя $F(x)=F(x_0)$, а решение $f(y)\neq 0$ вида (3) означает меру отклонения от центра – своеобразную «патологию» в организации. В организации общества и производства эти качества знаменуют управляющие полномочия руководителя, самостоятельность деятельности коллектива, его иерархическое устройство, когда схема организации устойчиво повторяется на разных уровнях.

Организационная функция $F(x)$ в каждом слое $F_{x0}(x,a)$, привязанном к идентификационной точке $x_0$, разлагается на составляющие:

$$F(x) = f(y)+F(x_0) \quad (6)$$

поступления сигнала $F(x_0)$ в системный блок на входе с получением результата $F(x)$ на выходе с учетом переработки $f(y)$ входного сигнала согласно (3). Это соотношение реализует сетевые связи диаграмм разной сложности (см. рис.1) $f(y)$: $F(x_0)\rightarrow F(x)$, где функция $f(y)$ соответствует вектору-стрелке на схеме. Иными словами, функциональный переход $F(x_0)\rightarrow F(x)$ от одной моносистемы к другой обеспечивается добавлением к входной функции $F(x_0)$ локального действия слоя $f(y)$ в относительных переменных $y=\{y_i\}$, $y_i=x_i - x_{0i}$ (рис.2). Переход из слоя в слой осуществляется последовательным прибавлением представительской функции $f(y)$ разного вида, зависящего от направления и веса $a=\{a_i\}$ каждого локального (диагностического) признака $y=\{y_i\}$ и показателя $x_0=\{x_{0i}\}$, что определяет специфику слоя $F_{x0}(x,a)$, его организационный функционал.

Переход по общей схеме $f(y)$: $F(x_0)\rightarrow F(x)$ поэтапно происходит следующим образом. Начальное состояние слоя $F(x_0)$ самостоятельно или через представителей изменяется на величину $f(y)=F(x) - F(x_0)$. Эти изменения $f(y)$ переносятся в другой слой $F(x)=F_{01}(x)+f(y)$ согласно соотношению (6) (см. рис.1б). Его новое состояние $F_1(x)$ перерабатывается, и результат $f(y_1)$ фиксируется $F_1(x)=F_{01}(x)+f(y)+f(y_1)$ и передается в следующий слой $F_2(x)=F_{02}(x)+f(y_1)$ и т.д. Такая процедура напоминает работу сети абстрактных автоматов, имеющих один вход, один выход и находящихся в одном из состояний множества возможных состояний в каждый момент времени. Изменения $f(y)$, сделанные организацией или ее полномочным представителем, одновременно идут в зачет этой организации и влияют на изменение зависимой оргструктуры.

Разложение (6) имеет широкую трактовку, где, например, разность $f(y)=F(x) - F(x_0)$ можно понимать как добавленную стоимость или добавленный продукт производственной деятельности. Величина $f(y)$ исчисляет чистые издержки на функционирование, оплату услуг представителей. Можно считать $F(x)$ целью развития предприятия, начиная с текущего, стартового состояния – организующего начала $F(x_0)$ – по направлению движения $f(y)$ компании. Целеполагание $f(y)$ становится одной из основных функций управления, где цели $F(x)$ проистекают из ценностной ориентации $f(y)=a \cdot y$.

В соотношении (6) слагаемое $F(x_0)$ также трактуется, как среда реализации деятельности $f(y)$ с получением итогового результата $F(x)$. Например, считается [24], что специфика деятельности политических институтов в процессе стратегического управления территорией зависит от региональных особенностей $x_0$: транспортной удаленности, природно-климатических и экономико-географических условий, этнической и конфессиональной принадлежности населения. В каждом регионе страны реализуются единые законы жизни общества $f(y)$, согласно (6), своеобразно $F(x_0)$ понимаемые по месту и времени. Такой средообусловленный дифференцированный подход обеспечивает равные возможности $f(y)$ развития различных регионов и каждого человека.

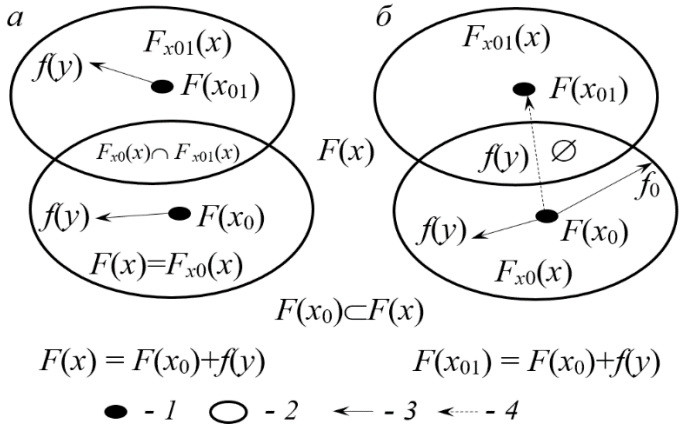



**Рис.2.** Схема расслоения системной функции $F(x)$ на многообразии $F(x_0)$ с выделением представительской функции $f(y)=F(x)-F(x_0)$: *а*) с пересечением слоев на поверхности $F(x)$; *б*) без пересечения слоев в расслоенном пространстве. *Условные обозначения*: *1* – центр слоя; *2* – граница ядра слоя; *3* – внутреннее действие слоя (отчуждение); *4* – внешнее действие слоя (представительская функция, передача сигнала)

В реальной жизни деятельностные слои взаимосвязаны – пересекаются между собой $F_{x0}(x) \cap F_{x01}(x)$, когда коллективы и их посредники непосредственно общаются между собой, проникая в сообщества (рис. 2*а*). В нормативной полисистеме слои $F_{x0}(x)=F(x)$ независимы, упорядочены функциональными действиями $f$: $F_{x0}(x) \rightarrow F_{x01}(x)$ в организационные образования (полисистемы) напрямую или с участием представителей, передающих итоги внутренней работы в другие оргструктуры (моносистемные блоки управления) для достижения общего, командного результата (рис.2*б*).

Добровольная передача своих прав и полномочий $f(y)$ для достижения новизны результатов деятельности есть выражение свободы поведения, реализации своих полномочий, учета собственных интересов. Права и свободы ограничиваются $f(y)<C$ в той мере, в которой это необходимо для достижения социально и юридически значимых целей, когда при определенных обстоятельствах вводятся дополнительные ограничения полномочий. С формальной точки зрения это понятно, поскольку разные функции $f(y)$ являются мерами (метриками) локального пространства слоя, по-своему определяющими расстояние от центра слоя $x_0$ до точки $x$: $y=x-x_0$. Расслоенные пространства с такой локальной метрикой называются

финслеровыми [25] и находят применение в различных областях знаний. Решением уравнения (3) является, в частности, евклидова метрика двух переменных

$$f(y) = \pm\sqrt{y_1^2 + y_2^2}\ . \qquad (7)$$

Функция представительства $f(y)$ зависит от масштаба величин $y=\{y_i\}$ – размера влияния организации $\lambda$ ($f(\lambda y)=\lambda f(y)$), что отражает степень свободы деятельности агента (отчуждения полномочий): при $\lambda=0$ будет $f(y)=0$ и $F(x)=F(x_0)$ – функции руководителя не передаются доверенным лицам. При $\lambda>0$ согласно (3) полномочия не отчуждаются $f(y)=0$, если 1) $a=0$, когда система функционирует в нормальном режиме, не реагирует на возмущения и 2) $y=0$, когда нет отклонения параметров системы $x$ от нормы $x_0$ (см. формулу (7)), отсутствуют юридически обеспеченные действия согласно агентскому договору. Функцию $f(y)$ желательно рассматривать как транзакцию – минимальную операцию, которая имеет смысл и совершается только полностью $f(y)=C$, например, банковская транзакция перевода денежных средств $f(y)$ с одного счёта на другой или аналогичная сделка купли-продажи, связанная с отчуждением собственности $f(y)$.

Схема рис. 2 увязывается с формулой (3), что описывает широкий круг процессов и явлений, которые можно трактовать как выполнение представительских функций $f(y)$, для чего требуется профессиональный набор данных, знаний и умений. Существуют реальные $F(x)$ и номинальные $F(x_0)$ функции, связь которых обеспечивается проявлением одного в другом $F(x_0)\rightarrow F(x)$ посредством третьего $f(y)$, основанного на документированных руководствах к доверенному действию с учетом существующих правил и ограничений. Правовые документы $F(x_0)$ всегда присутствуют в нормативных документах поручения $F(x)=F(x_0)+f(y)$.

В правовой информатике исследуется и моделируется документооборот [26] – один из инструментов управления организацией, служащих для обмена электронной и иной информацией как внутри предприятия между сотрудниками, так и с внешними контрагентами. Документооборот – система создания, интерпретации, передачи, приема и архивирования документов в организации с момента их получения $F(x_0)$, создания или исполнения $f(y)$ до отправления их учреждениям смежников и в архив $F(x)$ в процессе делопроизводства. В централизованном документообороте системы «вход-выход» рассматривают три основных типа документов: входящие $F(x_0)$ (от внешних контрагентов), исходящие $F(x)$ (из подразделений) и внутренние $f(y)$ – процесс, включающий получение, творческую разработку, составление, обработку документов, их систематизацию. Делопроизводство активно развивается как составная часть аппарата управления любой организации или органа государственной власти и местного самоуправления, поскольку в документах информационно фиксируются все основные и текущие вопросы их деятельности, что можно использовать для структурной и параметрической идентификации моделей управления.

**4. Обсуждение результатов.** Представленные формальные закономерности и их графические схемы математически отображают структуру и функцию метамоделей организационных систем в концептуальном и аналитическом выражении. Это позволяет формализовать, символически описать ранее эмпирически установленные законы организации в природе и обществе. Так, указанные особенности линейного «вход-выход» и концентрического «центр-периферия» архетипов каждого слоя отображены в организационных принципах А.А.Богданова [1]. Им сформулированы основные положения системного подхода и теории самоорганизации систем, не потерявшие своей актуальности, в частности, касающиеся явлений ингрессии, эгрессии и дегрессии.

*Ингрессия* рассматривалась А.А.Богдановым как универсальный метод, выражающий «принцип всеобщей связи явлений». *Эгрессия* – принцип централизма, координации процессов в системах всякой природы, ответственный за целостность любого уровня.

*Дегрессия* – принцип ограничения разнообразия состояний системы. Эти методические положения соответствуют свойствам постоянства и устойчивости каждого слоя $F_{x0}(x)$ и организационной функции $F(x)$ в целом. Отсюда, по свойствам универсальной функции (3), определяются различие и подобие частей целого – однородных слоев полисистемы. Появляется возможность обосновать другие средства исследования систем, например, заложенные в методе анализа иерархий [23]. Образование организационных форм подчиняется общим законам на всех уровнях организации.

В каждой оргструктуре выделяется центр $f(y)=f(0)=0$, когда $F(x)=F(x_0)=F_0$, ядро $f(y)\le f_0$ и периферия $f(y)>f_0$, неограниченно распространяющаяся в пространстве слоя (см. рис. 2б). Функция $f(y)$ определяется значениями $y=\{y_i\}$ локальных координат $Y=\{Y_i\}$ и представлена вектором положения в слое или линиями $f(y)=a\cdot y$ (в общем случае гиперплоскостями) сечения слоя через центр. Положения о существовании нормы $F_0=F(x_0)$, норматива отклонения от нормы $f(y)=f_0$ и согласно (2) универсальной связи $f(y)=Lf(y)$ оценки локального состояния системы $f(y)$ с порождающим его действием $Lf(y)$ можно считать аксиомами, задающими оргструктуру любого слоя в различной содержательной интерпретации.

Развитием билинейного описания оргфункции $F(x)$ по частям через касательное расслоение может быть ее представление квадратичными зависимостями в виде поля парного конкурирующего взаимодействия объектов [27] (см. рис. 2а). Такой подход реализуется в метамоделях квадратичной бинарной оптимизации QUBO – комбинаторной оптимизационной задачи с широким спектром приложений [28], в частности, для кластеризации, группировки объектов в классы по их сходству. Это основная задача анализа данных, статистическая форма расслоения пространства признаков.

Благодаря своей связи с моделями Э. Изинга, QUBO демонстрирует центральный набор задач для квантовых вычислений. Модель Изинга описывает решетку попарно взаимодействующих элементов, которые могут находиться в одном из двух дискретных состояний (+1 или -1), что создает возможность моделирования различных организационных полей [29]. В перспективе такая модель может быть использована для описания распределенных организаций $F(x)$ взаимодействия независимых слоев деятельности напрямую или через посредников при условии центрирования переменных по $F(x_0)$ и нормирования по $f_0$.

**Заключение.** А.А. Богданов был первым, кто комплексно рассматривал структуру и динамику организаций с учетом внешних или внутренних факторов влияния, а также изменения целей ее функционирования. Он выявил общие законы механизмов формирования и трансформации организационных структур различной природы, поставил задачу математического описания существующих закономерностей. Такие проблемы решаются на самом высоком метанаучном уровне с использованием средств метамоделирования с построением структурных и динамических диаграмм и их формальном воплощении в формулах и алгоритмах с поэтапным понижением степени абстрагирования описаний и повышения глубины обработки исходных данных.

Интересные результаты получены в области содержательной и математической теории систем с использованием формальных категорий и полисистемного расслоения пространств на многообразиях, отображающих организационную основу объединения частных моносистем-слоев в целостные образования. В обобщенном смысле организация представляет собой структуру связей элементов любой системы, поэтому различные формы связей являются предметом изучения и моделирования в сквозной теории организации. Особенно это касается механизмов связности в обществе и на производстве. Математической метамоделью межкомпонентных взаимодействий становится универсальное билинейное уравнение

касательной плоскости-слоя в локальных переменных, заданных относительно положения центра слоя. Уравнение описывает скрытое изменение моносистемы внутри слоя в границах ядра и прямой или опосредованный через представителей перенос воздействий (интефейс) на соседние моносистемы в ориентированной полисистемной сети организации. Уравнение по частям отображает поведение систем в каждом звене этой сети, графически представленной диаграммой классов объектов. Это уравнение, как часть разложения организационной функции (многообразия), допускает широкую содержательную интерпретацию по схемам «вход-выход» и объединение (свертку) характеристик элементов внутри слоя с учетом условий среды. Предполагается, что основные положения теории организации, полученные опытным путем, могут быть сформулированы в терминах моделей расслоения, в частности, формализованы аксиомы – организационные принципы А.А.Богданова, задающие архетип строения каждого слоя управления. Это позволяет подойти к созданию доказательной теории организации, получать выводимое знание. Пока еще до конца неясны причины сквозного характера действия принципа организованности и других научных принципов, проявляющихся в разных и во всех науках.

Потенциально в математических формулах есть все, что позволяет объяснить и понять наблюдаемые закономерности, но только на соответствующем уровне обобщения и абстракции. Применяемые в данном исследовании билинейные касательные аппроксимации организационных функций целостности дают удовлетворительную трактовку дифференциации объектов и их зависимостей. Вместе с тем аналитический подход предполагает возможность использования нелинейных приближений многообразий связей большего порядка для отображения свойств организационных полей, например, при метамоделировании квадратичной бинарной организации.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет средств государственного задания (номер госрегистрации темы АААА-А21-121012190056-4).

**Список источников**

1. Богданов А.А. Всеобщая организационная наука (тектология) / А.А. Богданов. – М. – Л.: Книга. – Ч. 1. – 1925. – 300 с. – Ч. 2. – 1927. – 268 с.
2. Локтионов М.В. Богданов как основоположник общей теории систем / М.В. Локтионов // Философия науки и техники, 2016. – Т. 21. – № 2. – С. 80-96.
3. Александр Александрович Богданов. Сборник / под ред. М. В. Локтионова // Институт философии РАН, Некоммерческий научный фонд «Институт развития им. Г.П. Щедровицкого». – М.: РОССПЭН, 2021. – 472 с.
4. Gorelik G. Bogdanov’s tektologia, general system theory, and cybernetics. Cybernetics and Systems: An International Journal, 1987, v.18, no.2, pp. 157-175.
5. Дородных Н.О. Разработка и использование метамоделей для синтеза спецификаций и кодов баз знаний / Н.О. Дородных, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин, и др // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 2 (14). – С. 26-39.
6. Метамоделирование // Бизнес-Моделирование. – URL: https://bm-symma.ru/metamodelling.html?ysclid=m87im7rkv4604030407 (дата обращения: 18.04.2024).
7. Нотации моделирования бизнес-процессов. – URL: https://leanvector.ru/blog-eksperta/notatsii-modelirovaniya-biznes-protsessov/ (дата обращения: 18.04.2024).
8. Черкашин А.К. Представительские функции в системах организационного управления: концептуальная метамодель / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 140-157. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.012.
9. Пригожин А.И. Методы развития организаций / А.И. Пригожин. 2-е изд. – М.: URSS, Ленанд, 2017. – 863 с.
10. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г.Буч, Д.Рамбо, И.Якобсон. – 2-е. изд. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
11. Пригожин А.И. Дезорганизация. Причины, виды, преодоление / А.И. Пригожин. – 2-е изд. – М.: URSS, 2025. – 400 с.
12. Лалу Ф. Открывая организации будущего / Ф. Лалу. – М: Изд-во «Манн, Иванов и Фербер», 2016. – 422 с.

13. Робертсон Б.Дж. Холакратия. Революционный подход в менеджменте / Б.Дж. Робертсон. – М: Изд-во «Бомбора», 2020. – 256 с.
14. Черкашин А.К. Математическое объяснение устойчивого политического развития общества / А.К.Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 2 (22). – С. 5-20. – DOI:10.38028/ESI.2021.22.2.001.
15. Черкашин А.К. Научная информация и правовая система в организации территориального управления обществом / А.К. Черкашин // Правовая информатика, 2021. – № 4. – С. 57-69.
16. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М.Месарович, Я.Такахара. – М.: Мир, 1978. – 312 с.
17. Калман Р. Очерки по математической теории систем / Р.Калман, П.Фалб, М. Арбиб. – М.: Эдиториал УРСС. – 2010. – 400 с.
18. Арбиб М. Основания теории систем: разложимые системы / М.Арбиб, Э.Дж. Мейнс // Математические методы в теории систем. – М.: Мир, 1979. – С.7-49.
19. Лобри К. Динамические полисистемы и теория управления / К. Лобри // Математические методы в теории систем. – М.: Мир, 1979. – С.134-173.
20. Черкашин А. К. Полисистемный анализ и синтез / А.К. Черкашин. – Новосибирск: Наука, 1997. – 502 с.
21. Покровский А.В. Системы с сильными нелинейностями / А.В. Покровский // Математическая теория систем. – М.: Наука, 1986. – С.96-111.
22. Андреев Ю.Н. Дифференциально-геометрические методы в теории управления / Ю.Н.Андреев // Автоматика и телемеханика, 1982. – № 10. – С. 5-46.
23. Черкашин А.К. Математические аспекты реализации метода анализа иерархий / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 1 (17). – С. 5-24. – DOI:10.38028/ESI.2020.17.1.001.
24. Пещеров Ю.Г. Роль политических институтов в стратегическом управлении регионами в зависимости от климатических условий / Ю.Г.Пещеров, Г.И.Пещеров // Власть, 2023. – № 3. – С. 57-60.
25. Antonelli P.L. Handbook of Finsler Geometry. Springer, 2003, 1437 p.
26. Тали Д.И. Принципы целостности и интегративности в формировании электронного документа / Д.И.Тали // Правовая информатика, 2022. – № 3. – С. 72-83.
27. Черкашин А.К. Политическая география и географическая политология: герменевтические исследования и математическое моделирование электоральных явлений / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – №2. – С. 5-18. – DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.001.
28. Kochenberger G., Hao J.-K., Glover F., et al. The unconstrained binary quadratic programming problem: a survey. Journal of Combinatorial Optimization, 2014, v. 28, pp. 58-81.
29. Gallavotti G. Statistical mechanics: a short treatise. Berlin: Springer-Verlag, 1999, 339 p.

***Черкашин Александр Константинович.*** *Доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории теоретической географии Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. AuthorID: 58425, SPIN: 5266-0499, ORCID: 0000-0002-7596-7780, WOS: K-2418-2017, akcherk@irnok.net, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1.*

---

UDC 51–7:303.09
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.011

# Representative capacity in organizational management systems: mathematical metamodeling

**Aleksander K. Cherkashin**

V.B. Sochava institute of geography SB RAS,
Russia, Irkutsk, *akcherk@irnok.net*

**Abstract.** This study aims are to create meta-models of the system organization with different complexity and a mathematical description of representative capacities that ensure paired subsystems interactions. To solve the problem, the basic ideas of A.A.Bogdanov' general organizational science are involved, where an organization is an ordered set of internal relationships and system properties with a certain functioning mode. The mathematical

foundations of systems theory are also used, namely, set theory, category theory, and differential geometry of the fiber bundle of spaces on a manifold of connections of variables. At various abstract levels, normative meta-models as polysystem without local feedback of coordination management are created in the form of commutative diagrams of the interaction of monosystems, taking into account external or internal factors of influence and possible changes in development goals. For metamodeling of various applications, existing software is used that supports any modeling notation, or traditional methods of scientific research are used, when many models of different objects are made based on a single meta-model. A meta–model is formed as a composition of classes, attributes and class relationships, and is formalized as a generalized organizational function – a manifold as bundle base for distinguishing a polysystem of classes, for example, in the form of separation of powers, work, and the powers of managers and executors. The communication interface between two classes expresses a relationship where functional changes in one class directly or through representatives affect the other class. Metamodeling notation in terms of category theory and mathematical analysis make it possible to reduce the abstraction of expressions in the general theory of systems and structural diagrams, and to derive calculation formulas. Through the fiber bundle procedure, the decomposition of the organizational function into three acts of entry, exit and monosystem state transformation in the form of a universal bilinear function of relative variables is justified, which describes the change of monosystems and the performance of representative actions. According to the limitations on this function, the concentric structure of each layer (fiber) "center-core-periphery" is axiomatically defined and the mechanism of polysystem connectivity of the fibers is modeled. The presented formal patterns and their graphical schemes mathematically display the structure and function of metamodels of organizational systems in conceptual and analytical terms and allow them to be applied in the analysis of data and knowledge, symbolically describe previously empirically established rules of self-organization in nature and society. The development of a bilinear description of an organizational function in parts through a tangent bundle is its quadratic representation in the form of a field of pairwise competitive interaction of objects.

**Keywords:** organizational activity, fiber bundle procedure, normative polysystem, representative functions, categorical notation of metamodeling, commutative diagrams, organizational fields, universal function, mathematical meta-model

**Acknowledgments.** The study was carried out using funds from a state assignment (state registration number of the topic AAAA-A21-121012190056-4).

## References

1. Bogdanov A.A. Vseobshchaya organizatsionnaya nauka (tektologiya) [General organizational science (tectology)]. Moscow - Leningrad: Kniga, ch. 1, 1925, 300 p., ch. 2, 1927, 268 p.
2. Loktionov M.V. Bogdanov kak osnovopolozhnik obshchey teorii system [Bogdanov as the founder of the general theory of systems]. Filosofiya nauki i tekhniki [Philosophy of science and technology], 2016, vol. 21, no. 2, pp. 80-96.
3. Aleksandr Aleksandrovich Bogdanov. Sbornik [Alexander Alexandrovich Bogdanov. Collection] M.V. Loktionov ed. Institute of Philosophy of the Russian Academy of Sciences, Non-profit Scientific Foundation "Shchedrovitsky Institute of Development", Moscow: ROSSPEN, 2021, 472 p.
4. Gorelik G. Bogdanov's tektologia, general system theory, and cybernetics. Cybernetics and systems: an international journal, 1987, vol.18, no.2, pp. 157-175.
5. Dorodnykh N.O. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., et al. Razrabotka i ispol'zovanie metamodeley dlya sinteza spetsifikatsiy i kodov baz znaniy [Development and use of meta-models for synthesis of specifications and codes of knowledge bases]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 2 (14). pp. 26-39.
6. Metamodelirovanie. Biznes-Modelirovanie [Metamodeling. Business Modeling]. Available at: https://bm-symma.ru/metamodelling.html?ysclid=m87im7rkv4604030407 (accessed: 04/18/2024).
7. Notatsii modelirovaniya biznes-protsessov [Business process modeling notations]. Available at: https://leanvector.ru/blog-eksperta/notatsii-modelirovaniya-biznes-protsessov/ (accessed: 04/28/2024).
8. Cherkashin A.K. Predstavitel'skie funktsii v sistemakh organizatsionnogo upravleniya: kontseptual'nye metamodeli [Representative capacity in organizational management systems: a conceptual metamodel]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2025, no.2 (38), pp. 140-157, DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.012.
9. Prigozhin A.I. Metody razvitiya organizatsiy [Methods of organization development]. Second edition. Moscow: URSS, Lenand, 2017, 863 p.
10. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. Yazyk UML. Rukovodstvo pol'zovatelya [The Unified Modeling Language User Guide]. 2nd ed. Moscow, DMK Press., 2006, 496 p.

11. Prigozhin A.I. Dezorganizatsiya. Prichiny, vidy, preodolenie [Disorganization. Causes, types, overcoming]. Second edition. Moscow: URSS, 2025, 400 p.
12. Laloux F. Otkryvaya organizatsii budushchego [Reinventing Organizations]. Moscow, Mann, Ivanov i Ferber, 2016, 422 p.
13. Robertson B.J. Kholakratiya. Revolyutsionnyy podkhod v menedzhmente [Holacracy: The Revolutionary Management System]. Moscow, Bombora, 2020, 256 p.
14. Cherkashin A.K. Matematicheskoe obyasnenie ustoychivogo politicheskogo razvitiya obshchestva. [Mathematical explanation of sustainable political development of the society]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 2 (22), pp. 5-20, DOI:10.38028/ESI.2021.22.2.001.
15. Cherkashin A.K. Nauchnaya informaciya i pravovaya sistema v organizacii territorial`nogo upravleniya obshestvom [Scientific information and the legal system in the organization of territorial management of the society]. Pravovaya informatika [Legal informatics], 2021, no. 4, pp. 57-69.16.
16. Mesarovic M.D., Takahara Y. Obshchaya teoriya sistem: matematicheskiye osnovy [General systems theory: mathematical foundations]. Moscow, Mir, 1978, 312 p.
17. Kalman R.E., Falb R.L., Arbib M.A. Ocherki po matematicheskoy teorii sistem [Topics in mathematical system theory]. Moscow, Editorial URSS, 2010, 400 p.
18. Arbib M.A., Manes E.G. Osnovaniya teorii sistem: razlozhimyye sistemy [Foundations of system theory: decomposable systems]. Matematicheskiye metody v teorii sistem [Mathematical methods in systems theory], Moscow, Mir, 1979, pp. 7-49.
19. Lobry C. Dinamicheskiye polisistemy i teoriya upravleniya [Dynamic polysystems and control theory]. Matematicheskiye metody v teorii sistem [Mathematical methods in systems theory], Moscow, Mir, 1979, pp. 134-173.
20. Cherkashin A. K. Polisistemnyy analiz i sintez [Polysystem analysis and synthesis]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1997, 502 p.
21. Pokrovskiy A.V. Sistemy s sil'nymi nelineynostyami. Matematicheskaya teoriya system [Systems with strong nonlinearities.]. Matematicheskaya teoriya sistem [Mathematical theory of systems], Moscow: Nauka, 1986, pp. 96-111.
22. Andreev Yu.N. Differentsial'no-geometricheskie metody v teorii upravleniya [Differential geometric methods in control theory]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics], 1982, no. 10, pp. 5-46.
23. Cherkashin A.K. Matematicheskie aspekty realizatsii metoda analiza ierarkhiy [Mathematical aspects of the implementation of the hierarchy analysis method]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no.1 (17), pp. 5-24, DOI:10.38028/ESI.2020.17.1.001.
24. Peshcherov Yu.G., Peshcherov G.I. Rol' politicheskikh institutov v strategicheskom upravlenii regionami v zavisimosti ot klimaticheskikh usloviy [The role of political institutions in the strategic management of regions depending on climatic conditions]. Vlast' [Power], 2023, no. 3, pp. 57-60.
25. Antonelli P.L. Handbook of Finsler Geometry, Springer, 2003, 1437 p.
26. Tali D.I. Printsipy tselostnosti i integrativnosti v formirovanii elektronnogo dokumenta [Principles of integrity and integrativity in the electronic document formation]. Pravovaya informatika [Legal informatics], 2022, no. 3, pp. 72-83.
27. Cherkashin A.K. Politicheskaya geografiya i geograficheskaya politologiya: germenevticheskie issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie elektoral'nykh yavleniy [Political geography and geographical political science: hermeneutic research and mathematical modeling of electoral phenomena]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 2, pp. 5-18, DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.001.
28. Kochenberger G., Hao J.-K., Glover F., et al. The unconstrained binary quadratic programming problem: a survey. Journal of Combinatorial Optimization, 2014, v. 28, pp. 58-81.
29. Gallavotti G. Statistical mechanics: a short treatise. Berlin: Springer-Verlag, 1999, 339 p.

***Cherkashin Aleksander Konstantinovich.*** *Doctor of geographical sciences, professor, chief researcher of the laboratory of Theoretical geography of V.B. Sochava institute of geography SB RAS, AuthorID: 58425, SPIN: 5266-0499, ORCID: 0000-0002-7596-7780, WOS: K-2418-2017, akcherk@irnok.net, 664033, Irkutsk, Ulaanbaatar st. 1.*

*Статья поступила в редакцию 21.07.2024; одобрена после рецензирования 01.04.2025; принята к публикации 25.06.2025.*

*The article was submitted 07/21/2024; approved after reviewing 04/01/2025; accepted for publication 06/25/2025.*

УДК 51-77, 519.868, 322
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.012

# Ситуационное моделирование возможностей достижения стратегических целей сельским хозяйством России: анализ на уровне страны и отдельных регионов

**Рябов Иван Юрьевич[1,2], Понькина Елена Владимировна[1], Строков Антон Сергеевич[2]**

[1]Алтайский государственный университет,
Россия, Барнаул, *ivan.ryabov.y@mail.ru*
[2]Центр агропродовольственной политики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС),
Россия, Москва

**Аннотация.** Ситуационное моделирование позволяет анализировать и прогнозировать «поведение» организационных систем в различных условиях. Одним из ключевых инструментов в данной области являются модели динамики социально-экономических систем. Модели, описывающие процессы изменения землепользования (Land Use Change – LUC), позволяют исследовать не только динамику регионального развития в определенных климатических и социально-экономических сценарных условиях, но и оценить перспективы и возможные последствия достижения долгосрочных стратегических целей. В работе использована рекурсивная модель динамики аграрного землепользования GLOBIOM для ситуационного моделирования достижения цели углеродной нейтральности аграрной отрасли России в случае двух сценариев – инерционное социально-экономическое развитие согласно сценарию SSP2 без учета специальных налогов на выброс парниковых газов (ПГ) и с учетом введения налога на единицу выбросов ПГ. Результаты моделирования представляют информационную основу для понимания перспектив достижения углеродной нейтральности для рассмотренных вариантов воздействия на агропроизводственную систему, что актуально для реализации политики устойчивого развития аграрного комплекса России и социально-экономического развития территорий. Также моделирование на уровне регионов позволяет оценить возможные последствия для их развития в виде изменения объемов производства продукции сельского хозяйства и перераспределения земельных ресурсов. Среди регионов России фокус исследования направлен на регионы Большого Алтая (Алтайский край, Республики Алтай и Тыва), где Алтайский край представляет крупный агропромышленный регион с наибольшим в стране углеродным следом в сельскохозяйственном производстве, а Республики Алтай и Тыва – этнические республики с менее выраженным аграрным потенциалом и выраженным уклоном на развитие животноводства. Период моделирования охватывает 2030-2050 гг.

**Ключевые слова:** ситуационное моделирование, сценарный анализ, аграрное развитие, GLOBIOM, углеродный налог, землепользование

**Цитирование:** Рябов И.Ю. Ситуационное моделирование возможностей достижения стратегических целей сельским хозяйством России: анализ на уровне страны и отдельных регионов / И.Ю. Рябов, Е.В. Понькина, А.С. Строков // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 140-153. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.012.

**Введение.** Сельское хозяйство является одной из ключевых отраслей экономики, играющих важнейшую роль не только в обеспечении продовольственной безопасности, но и в общем социально-экономическом развитии государства. В последние годы повестка устойчивого развития, в частности, снижения негативного влияния отраслей экономики на климат посредством снижения выбросов парниковых газов (ПГ), влияет на формирование национальной аграрной политики многих стран и ключевые стратегические цели развития аграрного комплекса. Так, в России помимо ряда новых законопроектов [1-3], в 2023 г. принята климатическая доктрина [4], согласно которой в качестве ключевой долгосрочной цели рассматривается – «достижение, с учётом национальных интересов и приоритетов социально-экономического развития, не позднее 2060 года баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением». В связи с этим активизировались научные исследования и разработки, касающиеся как учета и оценки выбросов ПГ по отраслям

экономики на различных уровнях территориального управления, так и в области моделирования баланса ПГ от хозяйственной деятельности для различных социально-экономических условий и вариантов снижения «углеродного следа» [5-7].

Одной из обсуждаемых практик достижения углеродной нейтральности является введение налога на выбросы ПГ. На сегодняшний день подобные практики применяются в развитых государствах, например, таких, как Дания и Новая Зеландия и закреплены на законодательном уровне [8]. В России нет однозначного мнения о внедрении подобного механизма регулирования, а также отсутствуют и оценки возможных последствий и рисков его реализации для сельского хозяйства, влиянию на продовольственную безопасность и экспортный потенциал страны [9, 10]. Эти вызовы дают широкий простор для дискуссий и исследований по данным направлениям. В этих условиях ситуационное моделирование является неотъемлемым инструментом для понимания, анализа и прогноза поведения подобных систем в различных социально-экономических условиях. Одним из инструментов выступают различные модели динамики землепользования [11-13], позволяющие оценить не только динамику регионального развития в определенных климатических и социально-экономических условиях, но и перспективы и возможные последствия достижения долгосрочных стратегических целей на уровне отдельных регионов по отраслям экономики.

Несмотря на многочисленные научные результаты в этой области в мировой науке [14, 15], в России исследование данного вопроса вызывает определенные сложности ввиду больших масштабов территории, разнообразия почвенно-климатических условий сельскохозяйственного производства и используемых технологий, наличия региональной специфики сельскохозяйственного производства и социально-экономического развития. Поэтому использование детальных экономико-математических моделей, описывающих динамику развития агропроизводственной системы в разрезе не только регионов, но и некоторого зонального деления территории, позволит в большей мере учесть локальные особенности сельскохозяйственного производства. Рекурсивная модель динамики аграрного землепользования GLOBIOM учитывает вышеобозначенные аспекты и опирается на детальные пространственные данные моделирования продуктивности сельскохозяйственных культур для различных социально-климатических сценариев (SSP).

В работе использована рекурсивная модель динамики аграрного землепользования GLOBIOM для ситуационного моделирования достижения цели углеродной нейтральности аграрной отрасли России с учетом двух сценариев, приведенных ниже.

Целью исследования является сравнительный анализ достижимости цели углеродной нейтральности сельскохозяйственным производством России в случае двух сценариев – инерционное социально-экономическое развитие согласно сценарию SSP2 без учета специальных налогов на выброс парниковых газов и с учетом введения налога на единицу выбросов ПГ. Анализ на уровне отдельных регионов сфокусирован на регионах Большого Алтая [16], включающих Алтайский край, Республику Алтай и Республику Тыва.

Алтайский край является стратегически важным агропромышленным регионом России, обрабатывающим наибольшие площади пашни среди регионов России, именуемый «Житницей Сибири». Регион занимает одну из ключевых позиций в стране по объемам производства зерна, гречихи, льноволокна и подсолнечника. Предварительные исследования углеродного следа от производства продукции растениеводства показали, что растениеводство в Алтайском крае не является углеродно нейтральным и характеризуется наибольшими выбросами ПГ среди других регионов России, что делает этот регион интересным для исследования с точки зрения введения ограничительной меры на выбросы парниковых газов, такой, как углеродный налог [5]. Республики и Алтай и Тыва, наравне с

Алтайским краем, входят в группу трансграничных регионов Большого Алтая. Эти этнические республики, с одной стороны, обладают схожим территориальным и культурным наследием, а с другой, экономика этих регионов не имеет выраженной аграрной специализации, характеризуется малыми площадями посева сельскохозяйственных культур, но развивающимся сектором животноводства. Доля сельского населения в данных регионах значительна, поэтому сельское хозяйство выступает как фактор основной занятости сельского населения.

Анализ аграрного потенциала отрасли, как в целом на уровне России, так и в выделенных периферийных трансграничных регионах, в изменяющихся климатических условиях до 2050 года в контексте исследования влияния углеродного налога представляется важным для формирования адекватной аграрной политики, учета и предупреждения возможных негативных последствий.

**1. Методы.** В качестве инструмента ситуационного моделирования для решения данной задачи использована рекурсивная модель частичного равновесия *Global Biosphere Management Model* (GLOBIOM) [11, 17] и ее региональный российский модуль [18, 5]. Модель разработана и используется Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA, Люксембург).

Модель GLOBIOM описывает динамику аграрного землепользования в пространстве на глобальном уровне по следующим слоям:

- земельные ресурсы (land cover), включает детальные пространственные данные земельного покрова и растительности в виде гридов с размером ячейки 1о (111 кв км);
- землепользование (land use) представляет распределение земельных ресурсов по видам землепользования (возделываемые земли – пашня, сенокосы, пастбища, неиспользуемые земли, леса), включая сценарно-заданные параметры используемых технологий в производстве (low input, high input, irrigation, tillage, fertilizer), управление земельными ресурсами осуществляется на уровне ячеек грида;
- производство (production), оценка объемов производства продукции, исходя из распределения земельных ресурсов по видам использования и по секторам растениеводства и животноводства на уровне ячеек грида с последующим агрегированием на уровень регионов и страны;
- формирование спроса на продукцию по секторам экономики (demand), исходя из энергетических потребностей населения и животных для обеспечения жизнедеятельности согласно сценариям SSP на национальном уровне;
- рынки и цены (markets), определяющие баланс спроса и предложения на товарных рынках, а также экспорт излишков товаров; баланс товарных рынков моделируется на национальном уровне на основе максимизации функции общественного благосостояния.

Структурные блоки модели, отвечающие за оценку объемов производства продукции, включают: модель динамики производства продукции растениеводства (*Crop model*), в частности, модель урожайности культур EPIC; модель динамики производства продукции животноводства (RUMINANT, *Digestibility model*); модель биоэнергетического баланса (BIOENERGY, *Processing model*); и модели динамики лесной растительности (G4M, *Global Forest Model*). Более детально описание моделей можно найти в документации [11]. Исходный вариант GLOBIOM ориентирован на оценку оптимального режима землепользования в мире с точки зрения общественного благосостояния производителей и потребителей продукции сельского и лесного хозяйства для заданных сценарных условий SSP на перспективу до 2100 года. При этом временной лаг моделирования составляет 10 лет. Модель является рекурсивной динамической моделью, когда, используя решение на предшествующем периоде,

формируется система ограничений модели для оптимизации целевой функции для текущего периода. При этом ключевые параметры оптимизационной модели описаны в динамике и пересчитываются через темпы роста базовых показателей.

В работе использован российский аналог модели, представляющий модификацию глобальной модели GLOBIOM, расширенный для моделирования изменения площадей посева для 28 культур, возделываемых в России (в исходной модели – 18 культур, для России – 12), с модифицированной системой ограничений, учитывающих ограничения на величины средних темпов прироста площадей посева по регионам. Российский модуль GLOBIOM ориентирован на вычисление оптимального значения функции общественного благосостояния в целом для России в сумме по регионам. В рамках российской версии модели GLOBIOM параметры международной торговли между Российской Федерацией и другими странами полностью соответствуют показателям глобального варианта модели. Важным блоком в модели является оценка баланса ПГ и его элементов (поглощение и связывание углерода). В российском модуле модели также внедрена новая методика оценки выбросов ПГ с учетом требований российского стандарта по методике Минприроды [19].

Учитывая то, что в качестве основных входных данных выступают пространственные данные с размером ячейки 111 кв. км – $1^{o}$, в качестве пространственной единицы моделирования выступает LUID *(Land Unique Identifier).* В российском аналоге модели LUID уточнены в границах регионов. Управление землепользованием осуществляется на уровне LUID, где определяется распределение площадей земель по видам землепользования на каждый период *t*, а в растениеводстве – и по видам возделываемых культур. Кроме того, на уровне LUID содержатся пространственные данные, определяющие ключевые параметры модели – типы земельного покрова, относительные оценки затрат ресурсов при использовании различных технологий в сельском и лесном хозяйстве, сценарные оценки продуктивности сельскохозяйственных культур для различных вариантов технологий. Для моделирования объемов производства по видам продукции используются производственные функции В. Леонтьева. Нелинейные функции в модели, в частности, функции спроса, преобразуются методом пошаговой линеаризации.

Модель обеспечивает максимизацию функции общественного благосостояния по отрасли сельского и лесного хозяйства в целом за минусом налога на эмиссию ПГ за счет управления земельными ресурсами в секторах сельскохозяйственного производства, биоэнергетики и лесного хозяйства на каждый период времени ( $t = 1, \dots, T$) при условии выполнения системы ограничений:

$$W_t(x_t, y_t, z_t) = CS_t(x_t, y_t, z_t) + PS_t(x_t, y_t, z_t) - a \cdot GHG_t(x_t, y_t) \rightarrow max_{(x_t, y_t, z_t) \in \Omega_t}, \quad (1)$$

где $W_t$ – функция общественного благосостояния (*Welfare*); $CS_t$ – излишек потребителя (*Consumer Surplus*); $PS_t$ – излишек производителя или прибыль (*Producer Surplus*), определяемый как выручка от реализации продукции (*Total Revenue – TR*) минус общие производственные расходы и расходы, связанные с изменением землепользования (*Total Production Costs – TPC*) ($PS_t = TR_t - TPC_t$); $GHG_t -$ функция уплаты налога на выброс ПГ; $x_t$ – множество переменных для сектора растениеводства, устанавливаемые на уровне LUID; $y_t$ – множество переменных модели для сектора животноводства на уровне LUID; $z_t$ – множество прочих переменных, включающих переменные для лесного и биоэнергетического секторов; $a -$ параметр сценария ($a = 1$, в случае использования углеродного налога, $a = 0$ – в противном случае).

Модель (1) является оптимизационной моделью большой размерности, которая позволяет найти оптимальный, с точки зрения общественного благосостояния, режим использования земельных ресурсов $(x_t^*, y_t^*, z_t^*) \in \Omega_t, t = 1, \dots, T$. Всего на уровне России

выделено 927 LUID, в каждом из которых находится оптимальное распределение земельных ресурсов. Таким образом, количество переменных в модели составляет более 35 тысяч. Именно ввиду большой размерности глобальный вариант GLOBIOM содержит только основные наиболее востребованные товарные культуры. В работе рассматривается горизонт моделирования – 2050 г. Система ограничений, описывающая конфигурацию множества $\Omega_t$, определена оптимальным решением предшествующего периода $\Omega_t(x^*_{t-1}, y^*_{t-1}, z^*_{t-1})$ и включает уравнения баланса спроса и предложения на рынке, ограничения по площади используемых земель, ограничения на величину прироста площадей по видам землепользования и по культурам, а также по приросту поголовья скота. Использование модели GLOBIOM позволяет определить наилучший вариант развития производства в заданных сценарных условиях для страны в целом, для выбранных сценарных условий, с учетом наличия или отсутствия вмешательства в виде углеродного налога ($a = 1/0$). Решение на уровне региона соответствует оптимуму для системы в целом, как в случае централизованного управления. Более детально математическая модель описана в отдельной публикации [20]. Для управления параметрами модели и переменными разработаны скрипты на языке R. Решение оптимизационной модели выполняется в среде GAMS.

Функция выплаты налога на единицу эмиссии парниковых газов ($GHG_t$) уменьшает прибыль производителей и равна сумме затрат на выплаты за выбросы ПГ по видам производимой продукции:

$$GHG_t = Tax \cdot \mathrm{E}\,, \tag{3}$$

где $Tax$ – цена за тонну выбросов ПГ; E – объем выбросов парниковых газов, в тоннах. Объемы выбросов парниковых газов вычисляются через заложенные в модель коэффициенты выбросов на единицу площади и поголовья скота, как:

$$E = \sum_{i=1}^{N}(x^s_{t,i} \cdot Cs + y^p_{t,i} \cdot Cl),$$

где $x^s_{t,i}$ – посевные площади культур, определенные в каждом LUID $i$; $y^{\mathrm{p}}_{t,i}$ – поголовье скота в каждом $i$-ом LUID; $Cs$ и $Cl$ – коэффициенты выбросов парниковых газов на единицу площади и поголовье скота соответственно. Коэффициенты выбросов парниковых газов определены для каждой отдельной культуры и каждого вида животных.

Общий баланс ПГ в секторе растениеводства ($EMIS_{crop_t}$) определяется величиной разности между выбросами и поглощением (связыванием) углерода в почве ($\Delta C_t$), суммой эмиссий ПГ от выращивания риса ($CH_{4_{rice_t}}$) и эмиссии в результате использования удобрений ($N_2O_{crop_t}$):

$$EMIS_{crop_t} = \Delta C_t + CH_{4_{rice_t}} + N_2O_{crop_t}. \tag{4}$$

Эмиссия ПГ от деятельности сектора животноводства включает ($EMIS_{livestock_t}$) и содержит эмиссии от кишечной ферментации ($CH_{4_{Entferm_t}}$), эмиссии от использования ($CH_{4_{Manmgt_t}}$ и $NO_{2_{Manmgt_t}}$) и хранения навоза ($NO_{2_{Manprp_t}}$):

$$EMIS_{livestock_t} = CH_{4_{Entferm_t}} + CH_{4_{Manmgt_t}} + NO_{2_{Manprp_t}} + NO_{2_{Manmgt_t}}. \tag{5}$$

Общий баланс ПГ ($\Delta CO^{\ni}_{2\,t}$) и углеродный след ($CF_{crop_t}$) от производства сельхозпродукции оценивается величиной:

$$\Delta CO^{\ni}_{2\,t} = EMIS_{crop_t} + EMIS_{livestock_t}, \tag{6}$$

$$CF_{crop_t} = \frac{\Delta CO^{\ni}_{2\,t}}{V_t}, \tag{7}$$

где $V_t$ – объем продукции растениеводства в зерновых единицах, продукции животноводства – ккал.

Совокупный баланс ПГ оценивается в тоннах, положительная величина $\Delta CO^{\ni}_{2\,t}$ и $CF_{crop_t}$ характеризует эмиссию ПГ (нетто-эмиссию), а отрицательная – нетто-поглощение

(секвестрация) углекислого газа. Таким образом, использованная в модели методика (4-7) является комплексной для оценки баланса ПГ, включающей основные его элементы, учитываемые FAO, и скорректированной с учетом требований российского стандарта [19].

Для настройки качества воспроизводимости динамики аграрного землепользования российским модулем GLOBIOM выполнена калибровка основных параметров модели, основанная на использовании статистических данных по регионам по площадям посева, урожайностям культур, валовым сборам и объемам производства продукции животноводства, выполнена также коррекция трендов урожайности культур. В качестве периода моделирования по фактическому времени рассматривался условный 2010-2020 гг., калибровка модели для этого периода осуществлена по регионам России по данным Росстат 2011 и 2019 гг. Выбор именно этого периода (2011 и 2019 гг.) обусловлен тем, что за это время произошел существенный рост производства сельскохозяйственной продукции и частичная распашка заброшенных сельхозземель, которая привела к дополнительным эмиссиям ПГ. Кроме того, в 2010 году сельскохозяйственное производство столкнулось с последствиями засухи, а в 2020 году – с последствиями пандемии. Поэтому наиболее представительными с точки зрения динамики аграрного землепользования являются 2011 и 2019 гг. С учетом прошедшего времени этот подход также остается актуальным, поскольку в период 2020-2025 гг. было много внешних шоков и санкций для экономики и сельского хозяйства России, но явного снижения производства производимой продукции растениеводства и животноводства не наблюдалось, в т.ч. и в фокусных регионах. На 2030 год моделирования в качестве ограничений площадей посева и темпов прироста урожайности культур использованы данные РОССТАТ за 1990-2023 годы. На период 2040-2050 гг. использованы параметры, заложенные в сценарии SSP2. Объемы производства приведены к единым единицам измерения – по сектору растениеводства – зерновые единицы, по сектору животноводства – ккал.

Ввиду рекурсивности, процесс нахождения оптимального решения динамической модели можно представить следующим образом – для заданных экзогенных параметров модели и накладываемых общих условиях и ограничениях на основе начальных данных (или данных прошлого шага модели) находится оптимальное решение, максимизирующее общественное благосостояние для текущего периода времени, получая при этом новое решение по ключевым переменным модели. Оптимальное решение, полученное в результате моделирования, предоставляет оценку потенциала использования сельскохозяйственных угодий, а также производства, потребления и экспорта сельскохозяйственной продукции с учетом балансовых и технологических ограничений, в заданных сценарных условиях на национальном и региональном уровнях. Оптимальное решение отражает наилучшее распределение и возможное расширение или, наоборот, снижение производственных мощностей по регионам Российской Федерации, что, в свою очередь, характеризует вклад регионов в достижение максимума общего совокупного благосостояния, включая экологические последствия, такие, как выбросы ПГ. Таким образом, оптимальное решение на уровне региона демонстрирует его потенциальный вклад в общий национальный результат. Однако следует отметить, что модель не детализирует перемещение продукции между регионами Российской Федерации. Эти аспекты являются важными в понимании обнаруженных фактически-наблюдаемых тенденций от полученных в результате поиска оптимального решения.

Модифицированный российский аналог модели показал приемлемую точность моделирования объемов производства сельскохозяйственной продукции для базового SSP2 сценария как на уровне страны, так и на уровне регионов по фактическому периоду. Расчеты были выполнены на уровне регионов России с последующим обобщением на национальный

уровень. Всего задействованы 77 субъектов Российской Федерации, где возделывались используемые в модели культуры, по которым имелись полные статистические данные. Ряд регионов не участвовали в моделировании (Республика Крым, Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Чукотский автономные округа, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, а также Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика, Запорожская и Херсонская области) ввиду отсутствия в открытом доступе первичных статистических данных или отсутствия посевных площадей. Анализ результатов моделирования на уровне Алтайского края и Республик Алтай и Тыва позволяет обнаружить возможные последствия для развития некоторых регионов России, дающих контрастные результаты с общими благоприятными результатами на национальном уровне.

**2. Сценарии.** Сценарное моделирование использует параметры базового сценария SSP2, которые разработаны международной группой экспертов и широко представлены в литературе [5, 11]. Этот сценарий предполагает продолжение текущих социально-экономических тенденций, в том числе в сельском хозяйстве.

Ситуационное моделирование предполагает сравнительное исследование потенциала аграрного производства в случае инерционного развития согласно SSP2, но для двух случаев – при отсутствии взимания углеродного налога (не УН) и в случае взимания углеродного налога на единицу выбросов ПГ (УН) (таблица 1).

**Таблица 1.** Параметры ситуационного сценарного моделирования

| Стратегическая цель | Критерий достижения | Варианты вмешательства в агропроизводственную систему | Параметр модели | Социально-экономический и климатический сценарий |
|---|---|---|---|---|
| Достижение углеродной нейтральности сельским хозяйством России | Баланс ПГ – $\Delta CO_{2_t}^{э}$ <= 0 | Введение углеродного налога – “УН” | $a$=1 | SSP2 |
| | | Углеродный налог не взымается – “не УН” | $a$=0 | SSP2 |

*Источник*: составлено авторами.

**3. Результаты**

**3.1. Результаты моделирования по фактическому периоду.** Результаты моделирования по фактическому период 2011-2019 гг. преследовали цель оценить качество воспроизведения динамики изменения площадей посева и валовых сборов основных товарных культур, а также объемов производства продукции животноводства, как на национальном, так и региональном уровнях (таблица 2). Сравнение показателей с данными РОССТАТ по абсолютным и относительным отклонениям показывает приемлемую сходимость результатов моделирования. В частности, относительное отклонение по основным показателям развития аграрного сектора на национальном уровне не превышает 1%. На региональном уровне наблюдаются схожие показатели, и для крупнейших аграрных регионов страны относительное отклонение от данных РОССТАТ является близким к показателям на национальном уровне. Однако, если в относительно крупных аграрных регионах, таких, как Алтайский край, отклонение практически по всем ключевым показателям не превышает 1%, то в малых регионах, где аграрное развитие не является основной экономической деятельностью, в том числе Республике Алтай, отклонение по производству продукции превышает 2%. При этом

чем меньше объемы производства в регионе, тем отклонение выше. Так, в Республике Тыва только по площадям посева отклонение превышает показатель в 40%, т.е. с точки зрения максимизации общественного благосостояния, по отрасли наращивать или сохранять объемы производства продукции растениеводства в этом регионе нецелесообразно ввиду сложных климатических условий и низкой продуктивности сельскохозяйственных угодий. При этом фактические значения площадей посева превышают оптимальные, что свидетельствует о том, что меры государственной поддержки и программы развития сельского хозяйства в данных регионах играют важное значение. Кроме того, в секторе животноводства модель показывает большие объемы производства молока и мяса, что говорит о высокой потребности общества в данном виде продуктов.

**Таблица 2.** Результаты моделирования на 2019 г.

| | Продукция растениеводства, тыс. т зерн. ед. | Площади посева, тыс. га | Производство молока, тыс. т | Производство мяса, тыс. т |
|---|---|---|---|---|
| *Россия итого* | | | | |
| Данные РОССТАТ | 195283 | 78328 | 30411 | 10646 |
| Модельные оценки | 196647 | 78424 | 30353 | 10534 |
| Отклонение (%) | 0,7 | 0,1 | -0,2 | -1,1 |
| *Алтайский край* | | | | |
| Данные РОССТАТ | 7040 | 5119 | 1204 | 193 |
| Модельные оценки | 7057 | 5120 | 1190 | 195 |
| Отклонение (%) | 0,3 | 0,02 | -1,2 | 1,4 |
| *Республика Алтай* | | | | |
| Данные РОССТАТ | 103 | 103 | 74 | 20 |
| Модельные оценки | 105 | 102 | 85 | 19 |
| Отклонение (%) | 2,6 | 0,5 | 14,6 | -2,7 |
| *Республика Тыва* | | | | |
| Данные РОССТАТ | 58 | 51 | 65 | 12 |
| Модельные оценки | 45 | 30 | 68 | 8 |
| Отклонение (%) | 23,1 | 40,8 | 4,6 | -27,2 |

*Источник*: расчеты авторов на основе модели GLOBIOM Russia, 2025.

**3.2. Результаты ситуационного моделирования до 2050 г.** Результаты расчетов показали (таблица 3), что внедрение налога потенциально может привести к значительному снижению выбросов ПГ в аграрном секторе как на уровне страны (более чем в 6 раз к 2050 году – с 101 млн тонн до 15 млн тонн в эквиваленте CO2 относительно модельных данных для 2020 года), так и на уровне наиболее неустойчивых регионов. Однако, несмотря на существенные изменения баланса углерода в целом, регионов, переходящих из разряда нетто-эмитентов в нетто-поглотители, практически не наблюдается. Связано это прежде всего с тем, что наиболее существенные изменения произошли в наиболее неустойчивых регионах, обладающих высокими показателями выбросов парниковых газов. Для других субъектов также наблюдается снижение общего уровня баланса углерода, но оно является недостаточным для перехода.

**Таблица 3.** Баланс эмиссий парниковых газов, тыс. т CO2э

| Территория | 2020 г. | 2050 г. | | Изменение относительно уровня 2020 г. (%) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | не УН (a=0) | УН (a=1) | не УН (a=0) | УН (a=1) |
| Россия, итого по регионам | 101062 | 35015 | 14843 | -65 | -85 |
| в том числе | | | | | |
| *Алтайский край* | *10543* | *11297* | *8294* | *7* | *-21* |
| *Республика Алтай* | *324* | *405* | *227* | *25* | *-30* |
| *Республика Тыва* | *186* | *180* | *172* | *-3* | *-8* |

*Источник*: расчеты авторов на основе модели GLOBIOM Russia, 2025.

Так, наиболее существенные изменения касаются сельского хозяйства в Алтайском крае (таблица 3). Снижение общего показателя баланса эмиссий в данном регионе составляет более 2 млн тон, что в совокупности приводит к значительному снижению углеродного следа продукции (рис. 1). В близлежащих к нему регионах возможны также существенные изменения в балансе углерода, однако, ввиду малых площадей посева и валовых сборов продукции, баланс парниковых газов и углеродный след продукции изменяются либо незначительно (Республика Тыва), либо имеют значительные перепады (Республика Алтай). Объясняется это тем, что даже относительно незначительное изменение площадей посева или структуры производства в значительной мере оказывает влияние как на баланс эмиссий парниковых газов, так и на углеродный след. Тем не менее, по всем трем регионам значения показателя, рассчитанного по сценарию с налогообложением, ниже, чем для аналогичного SSP2 сценария.

Таким образом, в целом по стране достижение стратегической цели снижения выбросов парниковых газов возможно в обоих моделируемых ситуациях. По исследуемым регионам баланс ПГ устойчиво снижается при введении налога.

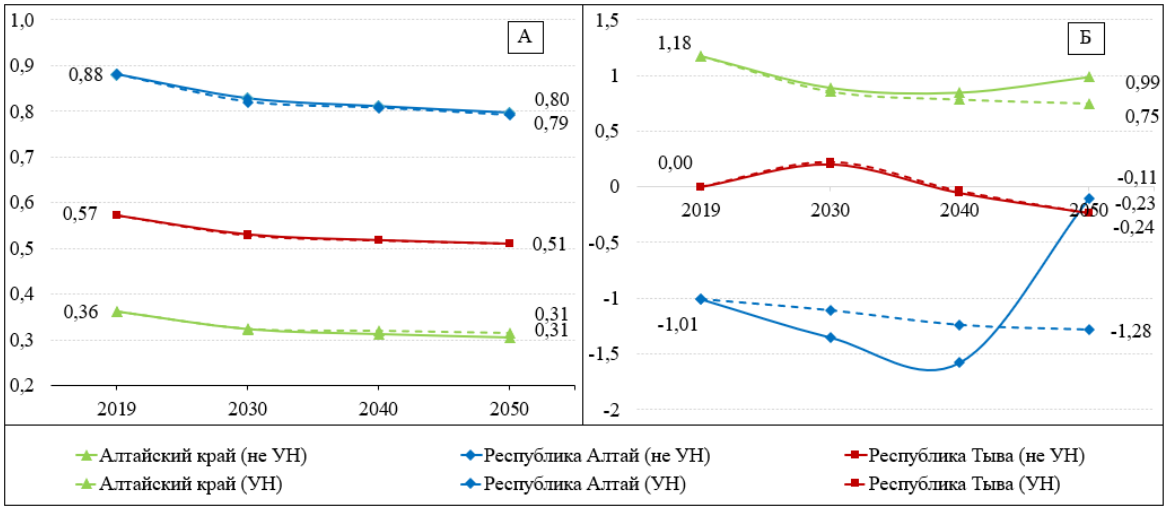



**Рис 1.** Углеродный след продукции по секторам (А) – животноводства, (Б) – растениеводства
*Источник*: расчеты авторов, 2025.

Несмотря на положительную динамику по снижению уровня выбросов парниковых газов, введение налога может оказать потенциально негативные последствия. Так, показатели производства продукции растениеводства являются значительно ниже, чем для альтернативного сценария (базового SSP2). В Алтайском крае только по площадям посевов

снижение достигает более 250 тысяч га, что оказывает влияние на общий выпуск продукции как животноводства, так и растениеводства (таблица 4). Выведение земель из оборота приводит к снижению объемов производства продукции животноводства. Последствия введения углеродного налога могут негативно сказаться на развитии региональных экономик, особенно аграрно-ориентированных регионов, и занятости сельского населения.

**Таблица 4.** Динамика показателей аграрного сектора до 2050 г.

| Территория | Сценарии | Продукция растениеводства, тыс. т зерн. ед. | Посевные площади, тыс. га | Производство молока, тыс. т | Производство мяса, тыс. т |
|---|---|---|---|---|---|
| *Россия* | | | | | |
| 2020 г. | - | 196 647 | 78 328 | 30 353 | 10 534 |
| 2050 г. | не УН (a=0) | 270 186 | 79 912 | 35 619 | 11 097 |
| | УН (a=1) | 231 419 | 73 292 | 33 884 | 9 330 |
| *Алтайский край* | | | | | |
| 2020 г. | - | 7 057 | 5 120 | 1 190 | 195 |
| 2050 г. | не УН (a=0) | 9 079 | 5 120 | 1 414 | 210 |
| | УН (a=1) | 8 226 | 4 868 | 1 342 | 181 |
| *Республика Алтай* | | | | | |
| 2020 г. | - | 105 | 102 | 74 | 19 |
| 2050 г. | не УН (a=0) | 141 | 120 | 87 | 22 |
| | УН (a=1) | 105 | 88 | 83 | 20 |
| *Республика Тыва* | | | | | |
| 2020 г. | - | 45 | 30 | 65 | 8 |
| 2050 г. | не УН (a=0) | 38 | 30 | 76 | 11 |
| | УН (a=1) | 33 | 27 | 72 | 10 |

*Источник*: расчеты авторов на основе модели GLOBIOM Russia, 2025.

Аналогичные тенденции наблюдаются и на национальном уровне. Ограничительная мера может привести к значительному снижению площадей посева сельскохозяйственных культур на более чем 5 млн га (с 78 млн га до 73 млн га), со снижением выпуска продукции порядка 39 млн тонн по сравнению со сценарием без вводимых ограничений, что, в свою очередь, приводит к сокращению поголовья скота и продукции животноводства (по производству молока и мяса порядка 2 млн тонн).

В случае сценария без введения углеродного налога, напротив, наблюдаются приросты по всем ключевым показателям, как на уровне страны, так и на уровне Алтайского края. Если на национальном уровне, несмотря на прирост посевных площадей порядка 1,5 млн га, увеличения продукции растениеводства (более 70 млн тонн) и животноводства (более 5 тыс. тонн по молоку и более 0,5 тыс. тонн по мясу), наблюдается снижение выбросов парниковых газов (со 101 до 35 млн тонн), то для Алтайского края, наоборот, общий баланс эмиссий растет, хоть и незначительно. Следует отметить, что для обоих ситуаций в Республиках Алтай и Тыва наблюдается наращивание объемов животноводческой продукции, что в целом – характерная тенденция для этих этнических регионов.

**Заключение.** Обладая широким набором параметров, гибкостью настройки и построения сценариев, модель GLOBIOM показала себя мощным инструментом для моделирования динамики агропроизводственной системы. С помощью этой модели получены оценки производства продукции сельского хозяйства на национальном и региональном уровнях и исследованы перспективы достижения углеродной нейтральности отечественным

аграрным комплексом. Результаты также позволили оценить потенциальную реакцию системы при введении налогообложения. Согласно результатам расчетов, введение углеродного налога можно рассматривать как положительную, но радикальную меру, обеспечивающую значительное снижение выбросов парниковых газов и путь к достижению поставленных целей, но при условии учета негативных последствий – снижение площадей посева и выпуска сельскохозяйственной продукции. В то же время альтернативный путь показал, что существенного снижения выбросов парниковых газов можно добиться и без внедрения налога как на уровне страны, так и отдельных регионов, за счет оптимизации посевных площадей и технологий в растениеводстве и структуры поголовья скота в животноводстве.

**Благодарности.** Российский модуль модели GLOBIOM и сценарные расчеты подготовлены в рамках Государственного задания РАНХиГС. Анализ регионального развития, региональные расчеты и статья подготовлены в рамках НИР «Алтайский вектор евразийской экономики: вызовы трансграничности, эффекты, стратегические задачи и приоритеты для Алтайского края» (FZMW-2023-0015).

## Список источников

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (дата обращения: 01.04.2025).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 14.05.2021 г. № 731. – URL: http://government.ru/docs/all/134619/ (дата обращения: 01.04.2025).
3. Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ. – URL: http://government.ru/docs/all/135381/ (дата обращения: 10.03.2025).
4. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 г. № 812. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910 (дата обращения: 01.04.2025).
5. Рябов И.Ю. Перспективы углеродной нейтральности в сельском хозяйстве России по сценариям SSP: анализ на уровне страны и региона / И.Ю. Рябов, Е.В. Понькина, А.С. Строков // Пространственная экономика, 2024. – Т. 20. – № 1. – С. 26-62. – DOI:10.14530/se.2024.1.026-062.
6. Цареградская М.М. Оценка изменения баланса парниковых газов в атмосфере на основе комплексной геоинформационной пространственно распределенной системы мониторинга / М.М. Цареградская, В.Д. Вязова // Вестник науки и образования, 2023. – №3 (134).
7. Sharkova A. Lemm E. Modeling a Structure of the Fuel and Energy Balance of a Region in the Context of Applying the Concept of Sustainable Development to Achieve Strategic Indicators of Regional Development. MIR (Modernization. Innovation. Research), 2022, no. 13, pp. 513-531, DOI: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.513-531.
8. Denmark is First Country to Tax Agriculture Emissions, Climate Adaptation, 2024, available at: https://climateadaptationplatform.com/denmark-is-first-country-to-tax-agriculture-emissions/ (accessed: 04/01/2025).
9. Сергеева Н.В. Углеродный налог: перспективы применения и вызовы для российской экономики / Н.В. Сергеева // Экономика. Налоги. Право, 2023. – №3.
10. Международные подходы к углеродному ценообразованию. Департамент многостороннего экономического сотрудничества минэкономразвития России, 2021. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf (дата обращения: 01.03.2025).
11. Global Biosphere Management Model (GLOBIOM). Integrated Biospheres Futures, International Institute for Applied Systems Analysis (IBF-IIASA). Laxenburg, 2023, 84 p., available at: https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18996/1/GLOBIOM_Documentation.pdf (accessed: 01/2025).
12. Britz W., Witzke P. CAPRI model documentation 2014, 2014, available at: https://www.capri-model.org/lib/exe/fetch.php?media=docs:capri-documentation.pdf (accessed: 04/10/2025).
13. Dietrich J., Bodirsky B., Weindl I. et al. MAgPIE – An Open Source Land-Use Modeling Framework. Version 4.6.0, 2022, DOI:0.5281/zenodo.1418752.
14. Pan J., Cross J., Zou X., et al. To tax or to trade? A Global Review of Carbon Emissions Reduction Strategies, Energy Strategy Reviews, 2024, vol. 55, 101508, DOI:10.1016/j.esr.2024.101508.
15. Kotlikoff L., Kubler F., Polbin A., et al. Can today's and Tomorrow's World Uniformly Gain From Carbon Taxation?, European Economic Review, 2024, vol. 168, 104819, DOI:10.1016/j.euroecorev.2024.104819.

16. Лобова С.В. Обзор исследований Большого Алтая: библиометрическо-картографический анализ / С.В. Лобова // Профессорский журнал. Серия: Экономические науки, 2024. – №2 (2).
17. Havl´ık P., Valin H., Herrero M., et al. Climate Change Mitigation Through Livestock System Transitions. PNAS, 2014, vol. 111, no. 10, pp. 3709-3714. DOI:10.1073/pnas.1308044111.
18. Строков А.С. Оценка запасов углерода и компонентов углеродного следа балансовым методом на пахотных землях регионов России / А.С. Строков, А.А. Романовская, В.Ю. Вертянкина, и др. // Метеорология и гидрология, 2023. – № 10. – С. 5-15. – DOI:10.52002/0130-2906-2023-10-5-15.
19. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Распоряжение от 30 июня 2017 г. N 20-р. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов.
20. Строков А.С. Моделирование регионального развития сельскохозяйственного производства в России с помощью модели GLOBIOM / А.С. Строков, В.Ю. Поташников // Национальная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения А.М. Гатаулина. Сборник статей конференции. Москва, 2021.

***Рябов Иван Юрьевич.*** *Аспирант, старший преподаватель кафедры информатики, Институт математики и информационных технологий, Алтайский государственный университет, Барнаул; младший научный сотрудник, Центр агропродовольственной политики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС). AuthorID: 1185458, ORCID: 0000-0002-9076-237X, Scopus ID: 58993009300, SPIN: 4151-5981, ivan.ryabov.y@mail.ru, Россия, Москва.*

***Понькина Елена Владимировна.*** *Кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической кибернетики и прикладной математики, Институт математики и информационных технологий, Алтайский государственный университет. AuthorID: 231357, ORCID: 0000-0001-7604-6337, Scopus ID: 57188723366, ResearcherID: Q-9488-2016, SPIN: 9474-6242, ponkina@math.asu.ru, Россия, Барнаул.*

***Строков Антон Сергеевич.*** *Кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Центр агропродовольственной политики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС). AuthorID: 624128, ORCID: 0000-0002-3784-4974, Scopus ID: 55646277400, SPIN: 8273-7409, strokov-as@ranepa.ru, Россия, Москва.*

---

UDC 51-77, 519.868, 322
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.012

# Situational modeling of opportunities for achieving strategic goals by Russian agriculture: analysis at the national and regional levels

**Ivan Yu. Ryabov[1,2], Elena V. Ponkina[1], Anton S. Strokov[2]**

[1]Altai state university, Russia, Barnaul, *ivan.ryabov.y@mail.ru*

[2]Center for agrifood policy of the Russian Presidential academy of national economy and public administration (RANEPA), Russia, Moscow

**Abstract.** Situational modelling makes it possible to analyze and predict the “behavior” of organizational systems under different conditions. One of the key tools in this area are models of the dynamics of socio-economic systems. Models describing the processes of Land Use Change (LUC) allow us to study both the dynamics of regional development under certain climatic and socio-economic scenario conditions and the prospects and possible consequences of achieving long-term strategic goals of agricultural development. We employed a recursive model of agricultural land use dynamics “GLOBIOM” for situational modelling of the achievement of carbon neutrality by Russian agriculture in the case of two scenarios: inertial socio-economic development under the SSP2 scenario without special taxes on greenhouse gas (GHG) emissions and with the introduction of a tax per unit of GHG emissions. The results of the situational modelling provide an informational basis for understanding the prospects of achieving carbon neutrality of the Russian agriculture under the considered interventions, which is relevant for the development of the national agricultural policy. In addition, modelling at the regional level allows us to reveal the possible consequences for regional agriculture, in particular changes in agricultural production, land use, and

farmland distribution. Among the Russian regions, the study focused on the Greater Altai regions (Altai Krai, Altai Republic, and Tyva Republic), where Altai Krai represents a large agro-industrial region with the largest carbon footprint from agricultural production in the country, and Altai and Tyva are ethnic republics with less pronounced agricultural potential and a greater focus on livestock development. The modelling period is 2030-2050.

**Keywords:** situational modeling, scenario analysis, agricultural development, GLOBIOM, carbon tax, land use

**Acknowledgements:** The Russian module of the GLOBIOM model and scenario calculations were carried out under the support of the State Assignment of the Russian Academy of National Economy and Public Administration. The analysis of regional development, regional calculations, and paper writing were funded by the framework of the State assignment "Altai vector of Eurasian economic integration: challenges of cross-border, effects, strategic objectives, and priorities for the Altai region" (FZMW-2023-0015).

## References

1. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2024 g. № 309 [Decree of the President of the Russian Federation. No. 309 of 07.05.2024], available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (accessed: 04/01/2025).
2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 14.05.2021 g. № 731 [Resolution of the Government of the Russian Federation. No. 731 of 14.05.2021], available at: http://government.ru/docs/all/134619/ (accessed: 04/01/2025).
3. Federal'nyj zakon "Ob ogranichenii vybrosov parnikovyh gazov" ot 02.07.2021 g. № 296-FZ. [Federal Law "On Limitation of Greenhouse Gas Emissions" dated 02.07.2021 No. 296-FZ.], available at: http://government.ru/docs/all/135381/ (accessed: 04/01/2025).
4. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 26.10.2023 g. № 812. Ob utverzhdenii Klimaticheskoj doktriny Rossijskoj Federacii [Decree of the President of the Russian Federation. No. 812 of 26.10.2023. On Approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation], available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910 (accessed: 04/01/2025).
5. Rjabov I.Ju., Pon'kina E.V., Strokov A.S. Perspektivy uglerodnoj nejtral'nosti v sel'skom hozjajstve Rossii po scenarijam SSP: analiz na urovne strany i regiona [Prospects of Carbon Neutrality in Russian Agriculture According to SSP Scenarios: Analysis at the National Level and in a Region]. Prostranstvennaja jekonomika [Spatial Economics], 2024, vol. 20, no. 1, pp. 26-62, DOI:10.14530/se.2024.1.026-062.
6. Caregradskaja M. M., Vjazova V. D. Ocenka izmenenija balansa parnikovyh gazov v atmosfere na osnove kompleksnoj geoinformacionnoj prostranstvenno raspredelennoj sistemy monitoringa [Evaluation of Change of Parnique Gas Balance in the Atmosphere on the Basis of Complex Geoinformation Space-Distributed Monitoring System]. Vestnik nauki i obrazovanija [Bulletin of Science and Education], 2023, no. 3 (134).
7. Sharkova A. Lemm E. Modeling a Structure of the Fuel and Energy Balance of a Region in the Context of Applying the Concept of Sustainable Development to Achieve Strategic Indicators of Regional Development. MIR (Modernization. Innovation. Research), 2022, no. 13, pp. 513-531, DOI: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.513-531.
8. Denmark is First Country to Tax Agriculture Emissions, Climate Adaptation, 2024, available at: https://climateadaptationplatform.com/denmark-is-first-country-to-tax-agriculture-emissions/ (accessed: 04/01/2025).
9. Sergeeva N.V. Uglerodnyy nalog: perspektivy primeneniya i vyzovy dlya rossiyskoy ekonomiki [Carbon Tax: Prospects for Application and Challenges for the Russian Economy]. Ekonomika. Nalogi. Pravo [Economics. Taxes. Law], 2023, no. 3.
10. Mezhdunarodnyye podkhody k uglerodnomu tsenoobrazovaniyu [International approaches to carbon pricing]. Departament mnogostoronnego ekonomicheskogo sotrudnichestva minékonómrazvitiya Rossii [Department of Multilateral Economic Cooperation of the Ministry of Economic Development of Russia], 2021, available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf (accessed: 04/01/2025).
11. Global Biosphere Management Model (GLOBIOM). Integrated Biospheres Futures, International Institute for Applied Systems Analysis (IBF-IIASA). Laxenburg, 2023, 84 p., available at: https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18996/1/GLOBIOM_Documentation.pdf (accessed: 01/2025).
12. Britz W., Witzke P. CAPRI Model Documentation 2014, 2014, available at: https://www.capri-model.org/lib/exe/fetch.php?media=docs:capri-documentation.pdf (accessed: 04/10/2025).
13. Dietrich J., Bodirsky B., Weindl I. et al. MAgPIE – An Open Source Land-Use Modeling Framework. Version 4.6.0, 2022, DOI:0.5281/zenodo.1418752.
14. Pan J., Cross J., Zou X., et al. To Tax or to Trade? A Global Review of Carbon Emissions Reduction Strategies, Energy Strategy Reviews, 2024, vol. 55, 101508, DOI:10.1016/j.esr.2024.101508.
15. Kotlikoff L., Kubler F., Polbin A., et al. Can Today's and Tomorrow's World Uniformly Gain from Carbon Taxation? European Economic Review, 2024, vol. 168, 104819, DOI:10.1016/j.euroecorev.2024.104819.

16. Lobova S.V. Obzor issledovaniy Bol'shogo Altaya: bibliometrichesko-kartograficheskiy analiz [Review of Studies on the Great Altai: A Bibliometric and Cartographic Analysis]. Professorskiy zhurnal. Seriya: Ekonomicheskiye nauki [Professor Journal. Series: Economic Sciences], 2024, no. 2 (2).
17. Havl´ık P., Valin H., Herrero M., et al. Climate Change Mitigation Through Livestock System Transitions. PNAS, 2014, vol. 111, no. 10, pp. 3709-3714. DOI:10.1073/pnas.1308044111.
18. Strokov A.S., Romanovskaya A.A., Vertyankina V.Yu., et al. Otsenka zapasov ugleroda i komponentov uglerodnogo sleda balansovym metodom na pakhotnykh zemlyakh regionov Rossii [Assessment of Carbon Stocks and Carbon Footprint Components by the Balance Method on Arable Lands in the Regions of Russia]. Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology], 2023, no. 10, pp. 5-15,
19. Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii. Rasporyazheniye ot 30 iyunya 2017 g. N 20-r. Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy po kolichestvennomu opredeleniyu ob"yema pogloshcheniya parnikovykh gazov [Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Order No. 20-r of June 30, 2017. On the approval of methodological guidelines for the quantitative determination of the volume of greenhouse gas absorption].
20. Strokov A.S., Potashnikov V.Yu. Modelirovaniye regional'nogo razvitiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva v Rossii s pomoshch'yu modeli GLOBIOM [Modeling the Regional Development of Agricultural Production in Russia Using the GLOBIOM Model]. Natsional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 85-letiyu so dnya rozhdeniya A.M. Gataulina. Sbornik statey konferentsii [National Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of A.M. Gataulin. Conference proceedings]. Moscow, 2021.

***Ivan Yurievich Ryabov.*** *Postgraduate, Senior Lecturer, Department of Informatics, Institute of Mathematics and Information Technologies, Altai State University, Barnaul, Russian Federation; Research Assistant, Center for Agrifood Policy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA). AuthorID: 1185458, ORCID: 0000-0002-9076-237X, Scopus ID: 58993009300, SPIN: 4151-5981, ivan.ryabov.y@mail.ru, Russia, Moscow.*

***Elena Vladimirovna Ponkina.*** *Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Department of Theoretical Cybernetics and Applied Mathematics, Institute of Mathematics and Information Technologies, Altai State University. AuthorID: 231357, ORCID: 0000-0001-7604-6337, Scopus ID: 57188723366, ResearcherID: Q-9488-2016, SPIN: 9474-6242, ponkina@math.asu.ru, Russia, Barnaul.*

***Anton Sergeevich Strokov.*** *Candidate of Sciences (Economics), Head Scientist Researcher, Center for Agrifood Policy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA). AuthorID: 624128, ORCID: 0000-0002-3784-4974, Scopus ID: 55646277400, SPIN: 8273-7409, strokov-as@ranepa.ru, Russia, Moscow.*

*Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 17.05.2025; принята к публикации 26.08.2025.*

*The article was submitted 04/15/2025; approved after reviewing 05/17/2025; accepted for publication 08/26/2025.*

## Программные системы и комплексы

УДК 004.75
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.013

# Использование технологии In-Memory Data Grid при исследовании живучести энергетических инфраструктур

**Воскобойников Михаил Леонтьевич, Феоктистов Александр Геннадьевич**

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск, *mikev1988@icc.ru*

**Аннотация.** Исследование и повышение живучести энергетических инфраструктур является актуальной проблемой, сопряженной с высокой вычислительной сложностью подготовки и проведения экспериментов. Сложность экспериментов обусловливается необходимостью учета больших наборов сценариев крупных внешних возмущений, воздействующих на исследуемую инфраструктуру, выявления ее критических элементов, отказ которых может привести к существенным сбоям в генерации, транспортировке и поставке энергоресурсов, а также в планировании мероприятий, направленных на повышение живучести данной инфраструктуры. Решение подобных задач в вычислительной среде на основе выполнения научных рабочих процессов, использующих распределенную базу данных в оперативной памяти узлов среды, позволяет существенно сократить время расчетов. Однако такой подход не поддерживается в известных системах управления рабочими процессами. В статье предложен новый подход к реализации анализа живучести энергетических инфраструктур с помощью инструментального комплекса Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows с использованием распределенных баз данных. В частности, создан научный рабочий процесс для анализа живучести энергетических инфраструктур, разработана методика прогнозирования требуемого размера оперативной памяти для его выполнения, реализован набор испытательных стендов (системных рабочих процессов) для выполнения расчетов по данной методике с учетом ключевых параметров предметной области, оказывающих существенное влияние на изменение размера данных. Проведен вычислительный эксперимент, демонстрирующий точность прогнозирования требуемого размера оперативной памяти при исследовании двух тестовых моделей энергетических инфраструктур различной сложности.

**Ключевые слова:** энергетическая инфраструктура, моделирование, распределенная вычислительная среда, вычисления в оперативной памяти, рабочие процессы, автоматизация

**Цитирование:** Воскобойников М.Л. Использование технологии In-Memory Data Grid при исследовании живучести энергетических инфраструктур / М.Л. Воскобойников, А.Г. Феоктистов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3(39) – С. 154-163. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.013.

**Введение.** В настоящее время исследование и повышение живучести энергетических инфраструктур является актуальной проблемой [1]. Решение этой проблемы, как правило, сопряжено с высокой вычислительной сложностью подготовки и проведения экспериментов. Сложность экспериментов обусловливается необходимостью учета множества сценариев крупных внешних возмущений, воздействующих на инфраструктуру, выявления ее критических элементов, отказ которых может привести к существенным сбоям в генерации, транспортировке и поставке энергоресурсов, а также в планировании мероприятий, направленных на повышение живучести исследуемой инфраструктуры.

В статье предложен новый подход к автоматизации подготовки и проведения крупномасштабных экспериментов по исследованию и повышению живучести энергетических инфраструктур в распределенной вычислительной среде (РВС) на основе разработки и выполнения научных рабочих процессов (НРП). Ключевая особенность подхода заключается в использовании технологии In-Memory Data Grid (IMDG), обеспечивающей возможность хранения и обработки расчетных данных в оперативной памяти (ОП) узлов РВС [2]. Применение IMDG позволяет существенно сократить время вычислений.

Создание НРП и управление ими в РВС осуществляется с помощью инструментального комплекса Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows (FDE-SWFs) [3].

FDE-SWFs относится к классу систем управления рабочими процессами [4]. В отличие от известных систем этого класса он поддерживает автоматизацию развертывания, хранения и обработки расчетных данных в ОП узлов среды. В рамках FDE-SWFs реализована новая методика прогнозирования требуемого размера ОП и выделения необходимого числа узлов кластера IMDG на основе знаний о структуре исходной базы данных (БД) и ключевых параметрах предметной области, влияющих на изменение размера данных.

**Средства поддержки IMDG.** Системы хранения данных на основе IMDG (In-Memory Data Grid) имеют неоспоримое преимущество в скорости обработки данных по сравнению с традиционными БД [5]. Кроме того, имеется большой спектр инструментов для поддержки технологии IMDG на ресурсах высокопроизводительных вычислений [6, 7]. Каждый инструмент представляет собой связующее программное обеспечение для поддержки распределенной обработки больших наборов данных. Hazelcast [8], Infinispan [9] и Apache Ignite [10] являются наиболее популярным свободно распространяемым связующим ПО на основе IMDG. Указанные программные системы имеют схожую функциональность и производительность. В частности, они поддерживают клиентские API на языках Java, C++ и Python. Конечные пользователи могут использовать их для создания кластеров IMDG с распределенными кэшами «ключ/значение». Однако каждая из этих программных систем может иметь свои преимущества в сравнении с другими системами относительно определенного набора данных и конкретного сценария их обработки.

Hazelcast поддерживает динамические операции с данными в режиме реального времени. Эта система объединяет высокопроизводительную потоковую обработку с быстрым хранением данных. Некоторые компоненты Hazelcast распространяются в соответствии с Лицензионным соглашением сообщества Hazelcast версии 1.0.

Infinispan обеспечивает гибкие возможности развертывания и надежные средства хранения, управления и обработки данных. Эта система поддерживает и распределяет данные типа «ключ/значение» на масштабируемых кластерах IMDG с высокой доступностью и отказоустойчивостью. Infinispan доступна по лицензии Apache 2.0.

С помощью Apache Ignite можно создавать полнофункциональные, децентрализованные транзакционные БД типа «ключ/значение» с удобным и простым в использовании интерфейсом для работы с данными большого размера в режиме реального времени, включая асинхронные вычисления в ОП. Apache Ignite поддерживает архитектуру долговременной памяти с ускорителем больших данных в памяти и на диске для данных, вычислений, сервисов и потоковых сетей. Эта система предоставляет открытый исходный код, распространяемый под лицензией Apache License 2.0. В отличие от Hazelcast, полная функциональность Apache Ignite и Infinispan бесплатна.

К преимуществам Apache Ignite относится поддержка горизонтально масштабируемой и отказоустойчивой распределенной БД SQL, которая полностью соответствует стандарту ANSI-99. Hazelcast и Infinispan поддерживают аналогичные SQL-запросы с исключениями. Apache Ignite допускает развертывания своего ПО динамически во время выполнения рабочих процессов приложения. Для Hazelcast и Infinispan это ключевое требование является трудоемким процессом. Как правило, конечные пользователи Hazelcast и Infinispan сначала создают кластер IMDG и только потом запускают задачи обработки данных на узлах развернутого кластера [11-13]. Кроме того, разработчиками Apache Ignite реализована методика определения числа узлов кластера IMDG на основе прогнозируемого размера ОП, необходимого для обработки данных [14]. Аналогичная методика была разработана и для Infinispan. Тем не менее, Apache Ignite дополнительно учитывает накладные расходы памяти при хранении данных и использование диска. Hazelcast предоставляет только примеры, которые можно экстраполировать для конкретных рабочих нагрузок.

**Методика прогнозирования требуемого объема ОП.** Для прогнозирования требуемого размера ОП $S$ при решении задач с использованием кластера Apache Ignite разработана методика, базирующаяся на расчетах по формулам (1)-(3):

$$S = D + (o_{data} + o_{index}) \sum_{i=1}^{t} r_i(x_i, x_2, \dots, x_h), \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^{t} d_i, \quad (2)$$

$$d_i = r_i(x_1, x_2, \dots, x_h) \sum_{j=1}^{c_i} s_{ij}, \quad (3)$$

где переменные интерпретируются следующим образом:

- $D > 0$ – суммарный размер данных в байтах во всех таблицах;
- $t > 0$ – число таблиц;
- $d_i > 0$ – размер данных в $i$-ой таблице в байтах, рассчитываемый на основе информации о структуре данных;
- $o_{data} > 0$ – удельные накладные расходы на хранение данных, рассчитываемые для числа записей не меньше 16000000;
- $o_{index} > 0$ – удельные накладные расходы на хранение индексов, рассчитываемые для числа записей не меньше 16000000;
- $c_i > 0$ – число столбцов в $i$-ой таблицы;
- $r_i(x_1, x_2, \dots, x_h) > 0$ – число строк в $i$-ой таблице (функция $r_i$ конкретизируется для каждой $i$-й таблицы с учетом ключевых параметров предметной области);
- $x_1, x_2, \dots, x_h$ – ключевые параметры предметной области, влияющие на изменение размера обрабатываемых данных;
- $h > 0$ – число ключевых параметров;
- $s_{ij} > 0$ – максимальный размер данных в $j$-ом столбце $i$-ой таблицы в байтах.

Значения $o_{data}$ и $o_{index}$ рассчитываются для каждой задачи предметной области при однократном занесении в распределенную БД не менее 16000000 записей. При достижении такого числа записей эти значения стабилизируется.

Расчет накладных расходов для хранения данных выполняется по формуле:

$$o_{data} = \frac{M_{data} - D}{\sum_{i=1}^{t} r_i(x_1, x_2, \dots, x_h)}, \quad (4)$$

где $M_{data}$ – это размер данных без учета индексов таблиц, который занимает БД, размещенная на вычислительных узлах.

Расчет накладных расходов для хранения индексов выполняется по формуле:

$$o_{index} = \frac{M_{index} - M_{data}}{\sum_{i=1}^{t} r_i(x_1, x_2, \dots, x_h)}, \quad (5)$$

где $M_{index}$ – это размер данных с учетом индексов таблиц, который занимает БД, размещенная на вычислительных узлах.

Расчет накладных расходов на данные проводится с помощью следующего алгоритма:

I. Модификация исходной БД, в которой отключаются индексы во всех таблицах.
II. Занесение в БД 16000000 или более записей.
III. Выполнение следующих двух запросов к Apache Ignite с помощью SQL-консоли, которая входит в его состав:
   а. Получение размера БД в ОП в байтах.
   б. Получение числа записей в БД во всех таблицах.
IV. Вычисление удельных накладных расходов на хранение одной записи в БД.

Расчет накладных расходов на индексы проводится с помощью следующего алгоритма:

I. Модификация исходной БД, в которой включаются индексы во всех таблицах.
II. Занесение в БД 16000000 или более записей.

III. Выполнение следующих двух запросов к Apache Ignite с помощью SQL-консоли, которая входит в его состав:
   а. Получение размера БД в ОП в байтах.
   б. Получение числа записей в БД во всех таблицах.

IV. Вычисление удельных накладных расходов на хранение индексов.

Функция $r_i(x_1, x_2, \dots, x_h)$ конкретизируется для каждой $i$-ой таблицы с учетом ключевых параметров предметной области $x_1, x_2, \dots, x_h$. Предложенная методика является универсальной для прогнозирования требуемого размера ОП при решении задач с использованием кластеров Apache Ignite в разных предметных областях. Специфика предметной области определяется ее ключевыми параметрами $x_1, x_2, \dots, x_h$. В отличие от методик, представленных в [14, 15], данная методика не использует субъективные оценки размера ОП, требуемой для хранения данных и индексов. Она позволяет достаточно точно рассчитать требуемый объем ОП, опираясь на знания о структуре исходных данных и ключевых параметрах предметной области, а также на результаты одного конкретного эксперимента. Число узлов, выделяемых в дальнейшем для решения задачи, определяется следующей формулой:

$$1 \le y = \left\lceil \frac{s}{p_l(1-k_l^{os})} \right\rceil \le q, \tag{6}$$

где $p_l$ – доступный объем памяти $l$-го узла в ГБ, $0 < k_l^{os} \le 1$ – коэффициент использования ОП операционной системой $l$-го узла, $q$ – квота на число узлов РВС для решения задачи пользователем, определяемая административной политикой РВС, $l \in \overline{1,e}$, $e$ – число узлов РВС. Предполагаем, что все узлы РВС являются однородными.

**Вычислительный эксперимент.** Пусть конфигурация энергетической инфраструктуры описывается сетью $G = (V, U)$, где $V$ – упорядоченное множество узлов, $U$ – упорядоченное множество дуг. Сеть $G$ является направленным графом, поэтому для каждой дуги $(i, j) \in U$ узел $i \in V$ является началом, а узел $j \in V$ – концом. Известные исследования по анализу уязвимости [16], как правило, основаны на оценке последствий множества сценариев возмущений, моделирующих отказ групп из $k$ элементов энергетической инфраструктуры. Множеством отказов $F$ размером $k \ge 1$ называется группа из $k$ номеров элементов сети $G$, отказ которых наступает одновременно: $F = \{c_l : 1 \le c_l \le |V| + |U|,\ l = (1, k)\}$, где $c_l$ – это номер элемента сети $G$. Максимальное число возмущений рассчитывается по формуле (1):

$$f(n, m, k) = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n+m)!}{((n+m-i)!\, i!)}, \tag{7}$$

где $m$ и $n$ – это число дуг и узлов соответственно, которые задаются экспертом. Переменные $m$, $n$ и $k$ являются ключевыми параметрами предметной области, влияющими на изменение размера обрабатываемых данных.

Структура исходных данных включает 6 таблиц: DISTURBANCE, MES_ELEMENTS, SOLUTION_REPORTS, FAILED_ELEMENTS, TRANSPORT_DATA и REGIONAL_DATA. На рис. 1 представлен НРП для полного перебора множеств отказов размера $k$. Он включает следующие операции: заполнение распределенной БД данными о последствиях возмущений ($o_1$); обработка распределенной БД средствами Apache Ignite для оценки критичности элементов сети ($o_2$). В операциях используются следующие параметры: $z_1$ – БД с конфигурацией исследуемой энергетической инфраструктуры; $z_2$ – результат запуска Apache Ignite; $z_3$ – размер группы отказов; $z_4$ – число сценариев возмущений; $z_5$ – адреса узлов кластера Apache Ignite; $z_6$ – результат заполнения распределенной БД; $z_7$ – результат оценки критичности элементов сети.

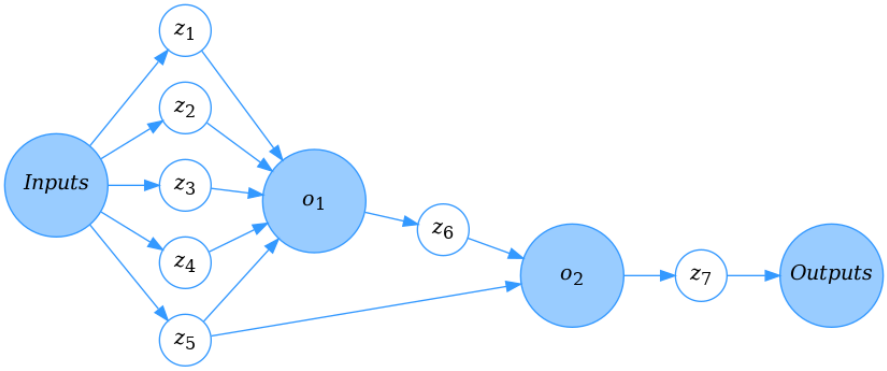



**Рис. 1.** НРП

Исходная БД включает таблицы DISTURBANCE, MES_ELEMENTS, SOLUTION_REPORTS, FAILED_ELEMENTS, TRANSPORT_DATA и REGIONAL_DATA, для каждой из которых определены соответственно функции $r_1 - r_6$. В рамках предложенной методики размеры этих таблиц рассчитываются соответственно по формулам (8)-(10), (11)-(13), (14)-(16), (17)-(19), (20)-(22) и (23)-(25), полученным путем конкретизации (2)-(3) с учетом ключевых параметров предметной области:

$$d_1 = r_1(n,m,k)\sum_{j=1}^{c_1} s_{1j}, \quad (8)$$

$$r_1(n,m,k) = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n+m)!}{((n+m-i)!i!)}, \quad (9)$$

$$s_1 = \sum_{j=1}^{c_1} s_{1j}, \quad (10)$$

$$d_2 = r_2(n,m)\sum_{j=1}^{c_2} s_{2j}, \quad (11)$$

$$r_2(n,m) = n + m, \quad (12)$$

$$s_2 = \sum_{j=1}^{c_2} s_{2j}, \quad (13)$$

$$d_3 = r_3(n,m,k)\sum_{j=1}^{c_3} s_{3j}, \quad (14)$$

$$r_3(n,m,k) = r_1(n,m,k), \quad (15)$$

$$s_3 = \sum_{j=1}^{c_3} s_{3j}, \quad (16)$$

$$d_4 = r_4(n,m,k)\sum_{j=1}^{c_4} s_{4j}, \quad (17)$$

$$r_4(n,m,k) = \sum_{i=1}^{k}[ir_1(n,m,i)], \quad (18)$$

$$s_4 = \sum_{j=1}^{c_4} s_{4j}, \quad (19)$$

$$d_5 = r_5(n,m,k)\sum_{j=1}^{c_5} s_{5j}, \quad (20)$$

$$r_5(n,m,k) = r_1(n,m,k)|U|, \quad (21)$$

$$s_5 = \sum_{j=1}^{c_5} s_{5j}, \quad (22)$$

$$d_6 = r_6(n,m,k)\sum_{j=1}^{c_6} s_{6j}, \quad (23)$$

$$r_6(n,m,k) = r_1(n,m,k)|V|, \quad (24)$$

$$s_6 = \sum_{j=1}^{c_6} s_{6j}. \quad (25)$$

В качестве примера энергетических инфраструктур рассмотрены тестовые модели системы газоснабжения, состоящей из 26 дуг и 20 узлов ($k = 8, m = 26$ и $n = 0$), и топливно-энергетического комплекса (ТЭК), включающего 2190 дуг и 1220 узлов ($k = 2, m = 2190, n = 1220$). По формулам (1)-(5) и (8)-(25) спрогнозирован требуемый размер ОП для исследования живучести указанных инфраструктур с помощью НРП на кластере Apache Ignite для двух пулов ресурсов: 8 узлов со следующими характеристиками – AMD Ryzen 9 5900X 12-Core Processor, 128 ГБ ОЗУ (пул 1); 2 узла со следующими характеристиками – AMD EPYC 9654 96-Core Processor, 768 ГБ ОЗУ (пул 2). Для модели системы газоснабжения экспериментальным путем получено, что величины накладных расходов на хранение данных

($o_{data}$) и индексов ($o_{index}$) стабилизируется на значениях 240 байт и 172 байта соответственно – рис. 2 (а) и 2 (б). Для модели ТЭК величины накладных расходов на хранение данных ($o_{data}$) и индексов ($o_{index}$) стабилизируются на значениях 20 байт и 206 байт соответственно – рис. 2 (в) и 2 (г).

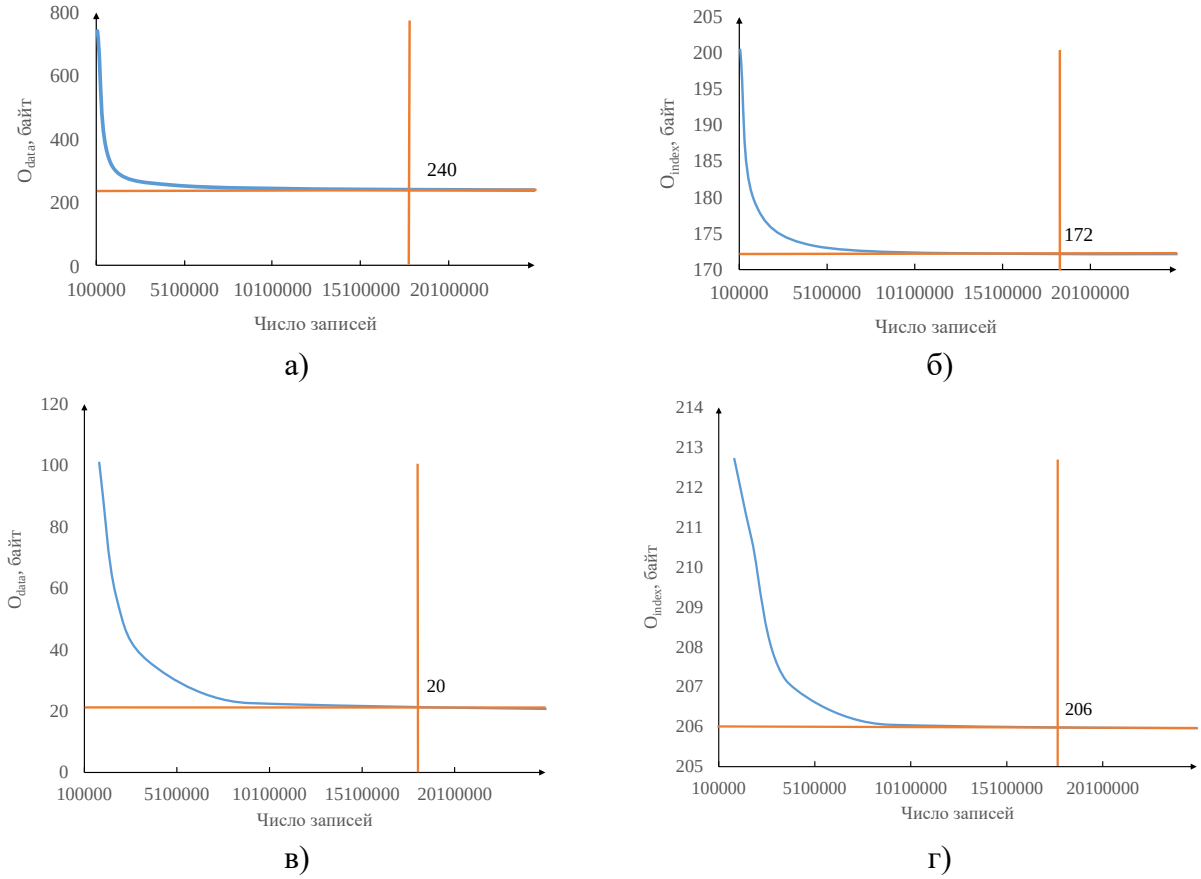



**Рис. 2.** Удельные расходы на хранение данных (а) и индексов (б)

Методика (М), значения ключевых параметров ($k$, $m$ и $n$), число записей (ЧЗ), пул используемых вычислительных ресурсов, прогнозируемый размер ОП (ПР ОП), фактический размер ОП (ФР ОП), абсолютная погрешность прогноза (АПП) в сравнении с ФР ОП, относительная погрешность прогноза (ОПП), прогнозируемое число узлов (ПЧУ) и фактическое число узлов (ФЧУ) для двух моделей разной сложности приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты экспериментов

| М | $k$ / $m$ / $n$ | Пул | ЧЗ | ПР ОП, ГБ | ФР ОП, ГБ | АПП, ГБ | ОПП, % | ПЧУ | ФЧУ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 8 / 26 / 0 | 1 | 140512730 | 62,837 | 61,887 | 0,950 | 1,54 | 1 | 1 |
| M2 | | | | 119,036 | | 57,149 | 92,34 | 2 | |
| M3 | | | | 11,357 | | -50,530 | 81,65 | 1 | |
| M1 | 8 / 26 / 0 | 2 | 140512730 | 62,837 | 61,887 | 0,950 | 1,54 | 1 | 1 |
| M2 | | | | 119,036 | | 57,149 | 92,34 | 1 | |
| M3 | | | | 11,357 | | -50,530 | 81,65 | 1 | |
| M1 | 2 / 2190 / 1220 | 1 | 902411450 | 479,012 | 473,214 | 5,798 | 1,23 | 6 | 6 |
| M2 | | | | 621,846 | | 148,632 | 31,41 | 7 | |
| M3 | | | | 376,964 | | -96,25 | 20,34 | 5 | |
| M1 | 2 / 2190 / 1220 | 2 | 902411450 | 479,012 | 473,214 | 5,798 | 1,23 | 1 | 1 |
| M2 | | | | 621,846 | | 148,632 | 31,41 | 2 | |
| M3 | | | | 376,964 | | -96,25 | 20,34 | 1 | |

Проведено сравнение трех методик прогнозирования требуемого размера ОП: предложенная методика М1, методика М2, представленная в [15], и методика М3

разработчиков Apache Ignite. Исходя из результатов экспериментов, очевидно, что методика М1 обеспечивает наименьшую ОПП, не превышающую 1,54% на всех тестах для обеих моделей энергетических инфраструктур разной сложности, в сравнении с методиками М2 и М3, показывающими ОПП не менее 31,41% и 20,34% соответственно. При этом М1 обеспечивает отклонение ПР ОП только в большую сторону. Методика М2 дает более завышенный прогноз, что может снижать эффективность использования вычислительных ресурсов. В тоже время методика М3 прогнозирует недостаточный размер ОП, что зачастую приводит к выделению недостаточного числа узлов и отказу вычислительного процесса без использования дополнительной виртуальной памяти на диске или к существенному увеличению времени вычислений более чем в 10 раз при использовании дисковой памяти. В частности, для решения задачи по модели ТЭК на пуле 1 по методике М3 прогнозируется недостаточное число узлов.

Для расчета накладных расходов на хранение данных и индексов в рамках методики М1 разработаны испытательные стенды в виде системных рабочих процессов (СРП) СРП1 и СРП2, представленных соответственно на рис. 3 и 4. Системные операции СРП выделены красным цветом. СРП1 включает следующие операции: запуск кластера Apache Ignite для создания БД ($o_3$); запуск НРП ($o_4$); расчет расходов на хранение данных ($o_5$); остановка кластера Apache Ignite ($o_6$). В операциях используются следующие параметры: $z_1 - z_5$, $z_7$ – параметры НРП, представленного на рис. 1; $z_8$ – конфигурационный файл Apache Ignite, описывающий структуру БД с отключенными индексами для всех таблиц; $z_9$ – файл с результатами расчета накладных расходов на хранение данных; $z_{10}$ – результат остановки кластера Apache Ignite.

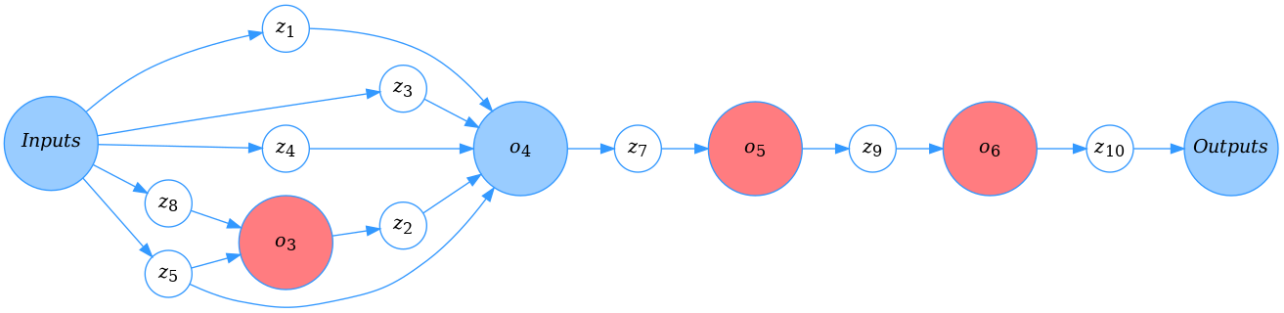



**Рис. 3.** СРП1

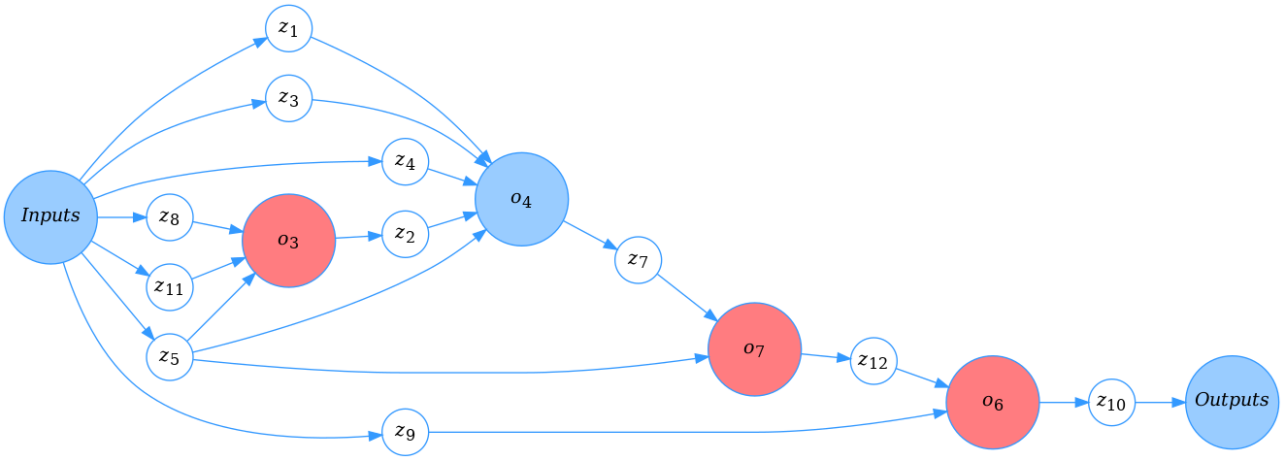



**Рис. 4.** СРП2

СРП2 включает следующие операции: $o_3$, $o_4$ и $o_6$ – операции, описанные выше; расчет расходов на хранение индексов ($o_7$). В операциях используются следующие параметры: $z_1 - z_5$ и $z_7 - z_{10}$ – параметры, описанные выше; $z_{11}$ – конфигурационный файл Apache Ignite,

описывающий структуру БД с включенными индексами для всех таблиц БД; $z_{12}$ – файл с результатами расчета накладных расходов на хранение индексов.

Для прогнозирования требуемого размера ОП и формирования конфигурационного файла кластера Apache Ignite разработан СРПЗ (рис. 5). СРПЗ включает следующие операции: расчет требуемого размера ОП ($o_8$); модификация шаблона конфигурационного файла ($o_9$). В операциях используются следующие параметры: $z_1$, $z_2$, $z_9$ и $z_{11}$ – параметры, описанные выше; $z_{14}$ – шаблон конфигурационного файла; $z_{15}$ – размер требуемого размера ОП; $z_{16}$ – конфигурационный файл.

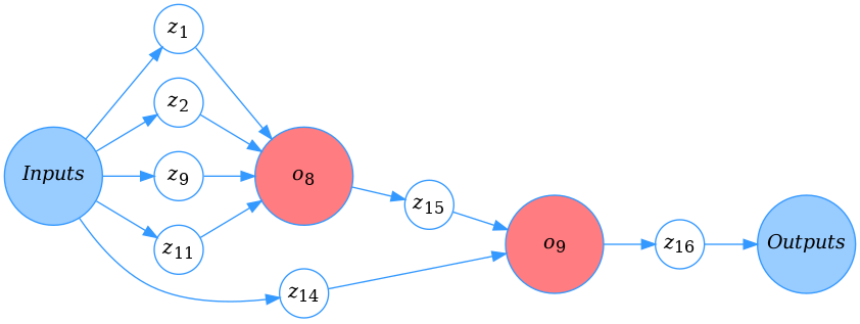



**Рис 5.** СРПЗ

**Заключение.** В статье предложен новый подход к автоматизации подготовки и проведения крупномасштабных экспериментов при решении задачи исследования и повышения живучести энергетических инфраструктур в РВС с использованием IMDG. Приведен пример организации кластера IMDG, использованного для решения задачи. Получены оценки накладных расходов на хранение данных и индексов, которые позволили с высокой точностью спрогнозировать требуемый размер ОП для размещения распределенной БД на вычислительных узлах.

**Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9).

**Список источников**

1. Jasiūnas J., Lund P. D., Mikkola J. Energy system resilience–A review. Renewable and sustainable energy reviews, 2021, vol. 150, pp. 111476, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111476.
2. Mukuhi D.K., Outtagarts A. Distributed Intelligent Resource Orchestration. 2023 2nd International Conference on 6G Networking (6GNet), Paris, France, 2023, pp. 1-3, DOI: 10.1109/6GNet58894.2023.10317732.
3. Voskoboinikov M., Feoktistov A., Tchernykh A. Framework for development and execution of scientific WorkFlows: Designing service-oriented applications. Programming and computer software, 2024, vol. 50, no. 8, pp. 900-913, DOI: 10.1134/S0361768824700828.
4. Воскобойников М.Л. Сравнительный анализ систем управления научными рабочими процессами / М.Л. Воскобойников, А.Г. Феоктистов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 3(35). – С. 102-111. – DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.009.
5. Guroob A.H. EA2-IMDG: Efficient Approach of Using an In-Memory Data Grid to Improve the Performance of Replication and Scheduling in Grid Environment Systems. Computation 2023, vol. 11, pp. 65, DOI: 10.3390/computation11030065.
6. Grover P., Kar A.K., Big data analytics: A review on theoretical contributions and tools used in literature. Glob. J. Flex. Syst.Manag. 2017, vol. 18, pp. 203-229, DOI: 10.1007/s40171-017-0159-3.
7. de Souza Cimino L., de Resende J.E.E., Silva L.H.M., et al. A middleware solution for integrating and exploring IoT and HPC capabilities. Software: Practice and experience. 2019, vol. 49, pp. 584–616. DOI: 10.1002/spe.2630.
8. Hazelcast, available at: https://hazelcast.com (accessed: 04/29/2025).
9. Infinispan. In-Memory distributed data store, available at: https://infinispan.org (accessed: 04/29/2025).
10. Apache Ignite. Distributed database for high-performance applications with in-memory speed, available at: https://ignite.apache.org (accessed: 04/29/2025).

11. Kathiravelu P., Veiga L. An adaptive distributed simulator for cloud and mapreduce algorithms and architectures. In Proceedings of the 7th International Conference on Utility and Cloud Computing, London, UK, 8–11 December 2014, pp. 79-88, DOI: 10.1109/UCC.2014.16.
12. Zhou M., Feng D. Application of in-memory computing to online power grid analysis. IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, iss. 28, pp.132-137, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.690.
13. Zhou M., Yan J., Wu Q. Graph computing and its application in power grid analysis. CSEE J. Power energy syst. 2022, vol. 8, iss. 6, pp. 1550-1557, DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.00430.
14. Capacity Planning, available at: https://apacheignite.readme.io/docs/capacity-planning (accessed: 04/29/2025).
15. Feoktistov A.G., Edelev A.V., Tchernykh A.N., et al. An approach to implementing high-performance computing for problem solving in Workflow-Based energy infrastructure resilience studies. Computation, 2023, vol. 11, iss. 12, 243 p, DOI: 10.3390/computation11120243.
16. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O, 2008, vol. 222, iss. 2, pp. 235-243, DOI: 10.1243/1748006XJRR138.

***Воскобойников Михаил Леонтьевич.*** *Младший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Мелентьева СО РАН. Область научных интересов – программная инженерия, распределенные вычисления, сервис-ориентированный подход, испытательные стенды. AuthorID: 1102663, SPIN: 3417-0258, ORCID: 0000-0003-3034-4907. mikev1988@icc.ru, Россия, г. Иркутск, Лермонтова, 134.*

***Феоктистов Александр Геннадьевич.*** *Д.т.н., доцент, главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. Область научных интересов – распределенные вычисления, системы управления рабочими процессами, автоматизация разработки научных приложений, концептуальное моделирование. AuthorID: 1535, SPIN: 5743-1777, ORCID: 0000-0002-9127-6162, agf@icc.ru, Россия, г. Иркутск, Лермонтова,134.*

---

UDC 004.75
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.013

# Using In-Memory Data Grid technology in energy infrastructure resilience analysis

**Mikhail L. Voskoboinikov, Alexander G. Feoktistov**

Matrosov Institute for system dynamics and control theory of SB RAS,
Russia, Irkutsk, *mikev1988@icc.ru*

**Abstract.** Studying and enhancing the resilience of energy infrastructure is an actual problem that is associated with high computational complexity of preparing and conducting experiments. The complexity of experiments is due to the range of important factors. These factors include large sets of scenarios for significant external disturbances affecting the infrastructure under study, identification of its critical elements whose failure could lead to significant disruptions in the energy resource generation, transportation, and supply, as well as planning activities aimed at enhancing this infrastructure's resilience. Solving these problems in a computing environment based on executing scientific workflows using a distributed database in the RAM of the environment nodes can significantly reduce the computation time. However, this approach is not supported by known workflow management systems. In this context, we propose a new approach to implement the analyzing the energy infrastructure resilience using the Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows and distributed databases. Specifically, we created a scientific workflow to analyze energy infrastructure resilience. Next, we developed a method for predicting the required RAM size for workflow execution. Then, we implemented a set of testbeds (system workflows) to perform computing according to this method. This method takes into account key parameters in the subject area that significantly impact changes in data size. Finally, we conducted a computational experiment to demonstrate the accuracy of predicting the required RAM size when studying two test models of energy infrastructures of different complexities.

**Keywords:** energy infrastructure, modeling, distributed computing environment, in-memory computing, workflows, automation

**Acknowledgements:** The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FWEW-2021-0005 “Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments” (reg. no. 121032400051-9).

## References

1. Jasiūnas J., Lund P. D., Mikkola J. Energy system resilience–A review. Renewable and sustainable energy reviews, 2021, vol. 150, pp. 111476, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111476.
2. Mukuhi D. K., Outtagarts A. Distributed Intelligent Resource Orchestration. 2023 2nd International Conference on 6G Networking (6GNet), Paris, France, 2023, pp. 1-3, DOI: 10.1109/6GNet58894.2023.10317732.
3. Voskoboinikov M., Feoktistov A., Tchernykh A. Framework for development and execution of scientific WorkFlows: Designing service-oriented applications. Programming and computer software, 2024, vol. 50, no. 8, pp. 900-913,. DOI: 10.1134/S0361768824700828.
4. Voskoboynikov M.L., Feoktistov A.G. Sravnitel'nyy analiz sistem upravleniya nauchnymi rabochimi protsessami [Comparative analysis of scientific workflow management systems]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 3(35), pp. 102-111, DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.009.
5. Guroob A.H. EA2-IMDG: Efficient Approach of Using an In-Memory Data Grid to Improve the Performance of Replication and Scheduling in Grid Environment Systems. Computation 2023, vol. 11, pp. 65, DOI: 10.3390/computation11030065.
6. Grover P., Kar A.K., Big data analytics: A review on theoretical contributions and tools used in literature. Glob. J. Flex. Syst.Manag. 2017, vol. 18, pp. 203-229, DOI: 10.1007/s40171-017-0159-3.
7. de Souza Cimino L., de Resende J.E.E., Silva L.H.M., et al. A middleware solution for integrating and exploring IoT and HPC capabilities. Software: Practice and experience. 2019, vol. 49, pp. 584–616. DOI: 10.1002/spe.2630.
8. Hazelcast, available at: https://hazelcast.com (accessed: 04/29/2025).
9. Infinispan. In-Memory distributed data store, available at: https://infinispan.org (accessed: 04/29/2025).
10. Apache Ignite. Distributed database for high-performance applications with in-memory speed, available at: https://ignite.apache.org (accessed: 04/29/2025).
11. Kathiravelu P., Veiga L. An adaptive distributed simulator for cloud and mapreduce algorithms and architectures. In Proceedings of the 7th International Conference on Utility and Cloud Computing, London, UK, 8–11 December 2014, pp. 79-88, DOI: 10.1109/UCC.2014.16.
12. Zhou M., Feng D. Application of in-memory computing to online power grid analysis. IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, iss. 28, pp.132-137, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.690.
13. Zhou M., Yan J., Wu Q. Graph computing and its application in power grid analysis. CSEE J. Power energy syst. 2022, vol. 8, iss. 6, pp. 1550-1557, DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.00430.
14. Capacity Planning, available at: https://apacheignite.readme.io/docs/capacity-planning (accessed: 04/29/2025).
15. Feoktistov A.G., Edelev A.V., Tchernykh A.N., et al. An approach to implementing high-performance computing for problem solving in Workflow-Based energy infrastructure resilience studies. Computation, 2023, vol. 11, iss. 12, 243 p, DOI: 10.3390/computation11120243.
16. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part O, 2008, vol. 222, iss. 2, pp. 235-243, DOI: 10.1243/1748006XJRR138.

***Voskoboinikov Mikhail Leontevich.*** *Junior Researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS. The main direction of research – program engineering, distributed computing, workflow management systems, service-oriented paradigm, testbeds. AuthorID: 1102663, SPIN: 3417-0258, ORCID: 0000-0003-3034-4907, mikev1988@icc.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova, 134*.

***Feoktistov Alexander Gennadevich.*** *Doctor of technical sciences, associate professor, chief researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS. The main direction of research – distributed computing, workflow management systems, automation of developing scientific applications, conceptual modeling. AuthorID: 1535, SPIN: 5743-1777, ORCID: 0000-0002-9127-6162, agf@icc.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova, 134.*

*Статья поступила в редакцию 13.05.2025; одобрена после рецензирования 01.06.2025; принята к публикации 26.08.2025.*

*The article was submitted 05/13/2025; approved after reviewing 06/01/2025; accepted for publication 08/26/2025.*

УДК 621.385.69
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.014

# Алгоритмы трехмерного моделирования электронно-оптической системы гиротронов, используемые в программе ANGEL-TA-S3D

**Семенов Евгений Сергеевич**

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Россия, Нижний Новгород, *semes@ipfran.ru*

**Аннотация.** Статья посвящена описанию математических методов, используемых для расчёта азимутально-несимметричного электрического поля для траекторного анализа электронных пучков в гироприборах. Эти алгоритмы, включая модификации метода дискретных источников, реализованные в комплексе программ ANGEL, показали высокую точность и эффективность работы при проектировании пушек и коллекторов гиротронов.

**Ключевые слова:** электронная оптика, гиротрон, метод дискретных источников, метод трубок тока, уравнение Пуассона

**Цитирование:** Семенов Е.С. Алгоритмы трехмерного моделирования электронно-оптической системы гиротронов, используемые в программе ANGEL-TA-S3D / Е.С. Семенов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 164-176. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.014.

**Введение.** Электронно-оптическая система (ЭОС) формирования винтовых электронных пучков является одной из ключевых подсистем гиротрона [1, 2]. Повышенные требования к эффективности и надежности работы гиротронов определяют необходимость учета в расчетах ЭОС таких явлений, как азимутальная неоднородность эмиссии (связанная с неравномерным подогревом эмиттера), несоосность и перекос силовых полей [3, 4].

Традиционные алгоритмы анализа ЭОС на базе трубок тока [5–8] легли в основу программного комплекса ANGEL (ANalyzer of a Gyrating Electrons), разработка которого ведётся в ИПФ РАН [9]. Данный программный комплекс позволяет рассчитывать траектории электронов в статическом электромагнитном поле в режиме температурного ограничения эмиссии с учётом начального скоростного разброса и пространственного заряда пучка.

При расчёте характеристик электронного пучка (траекторном анализе) наиболее сложным элементом является вычисление напряжённости электрического поля, поэтому основное внимание в данной статье уделено методам расчёта азимутально-несимметричного статического электрического поля. В коммерческих программах электрическое поле обычно рассчитывают такими универсальными методами, как метод конечных элементов (МКЭ), конечных разностей и пр. В этой статье рассмотрены только методы, базирующиеся на граничных интегральных уравнениях, в частности, метод дискретных источников (МДИ) [7, 8], применение которого для траекторного анализа ЭОС гиротронов эффективно по причине малого заполнения электронным пучком межэлектродного пространства, особенно на высоких частотах.

Далее в статье формулируется постановка задачи, описывается идеология МДИ, рассматриваются варианты регуляризации решения задачи, приводятся расчётные схемы МДИ для цилиндрической системы координат и приводится частный случай МДИ для азимутально-симметричной системы. Затем описываются способы учёта пространственного заряда: постановка задачи, адаптация МДИ для решения уравнения Пуассона в азимутально-симметричном и несимметричном случаях с дополнительными модификациями.

**1. Метод трубок тока.** Моделирование электронных пучков с винтовыми траекториями проводится путем численного решения согласованной системы уравнений движения, уравнения Пуассона и уравнения непрерывности [5]. Плотность объёмного заряда

в рабочей области находится по зарядовому следу пучка электронов с помощью метода трубок тока, традиционно используемого для решения статических задач [6].

Поток электронов разбивается на $N_I$ трубок тока; каждая из них несёт сохраняющийся при движении ток $I_k$, $k = \overline{1, N_I}$. Интегрирование уравнений движения (2) в найденных электрическом **E** и магнитном **B** полях позволяет определить траектории каждой токовой трубки и совокупное распределение плотности пространственного заряда.

Вся рабочая область $\Omega$ разбивается на элементарные ячейки $\Omega_m$, $m = \overline{1, M}$. Для простоты организации сетки границы ячеек расположены параллельно координатным осям с постоянным шагом (своим вдоль каждой из осей). Пространственный заряд, вносимый $k$-ой трубкой в $m$-ую ячейку сетки, равен $Q_{m,k} = I_k \, \Delta t$, где $\Delta t$ – время прохождения траектории частицы через данную ячейку, $I_k$ – ток данной трубки. Несмотря на то, что траектории электронов пересекают ячейки во всевозможных направлениях, заряд, оставляемый ими, приписывается точечному источнику с координатами $\xi_m$ центра ячейки. Полный заряд ячейки $Q_m$ получается суммированием зарядов $Q_{m,k}$ по всем трубкам тока, прошедшим через данную ячейку:

$$Q_m = \sum_{k=1}^{N_I} Q_{m,k}. \tag{1}$$

Следуя [8], для уменьшения времени счёта в программе реализована оптимизация с использованием сетки «укрупнённых зарядов». Для экономии памяти сетка $\Omega_m$ покрывает лишь область вокруг силовой линии магнитного поля, выпущенной из эмиттера.

Каждый электрон стартует с эмиттера с заданными координатами $\mathbf{r}_0$, скоростью $\mathbf{v}_0$ и движется под действием силовых полей согласно уравнению движения:

$$\frac{\partial(\gamma \mathbf{v})}{\partial t} = \frac{e_0}{m_0}(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]), \quad \mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t}, \quad \mathbf{v}\Big|_{t\,=\,0} = \mathbf{v}_0, \quad \mathbf{r}\Big|_{t\,=\,0} = \mathbf{r}_0, \tag{2}$$

где $\frac{e_0}{m_0} \approx -1.759 \cdot 10^{11}$ [Кл/кг] – удельный заряд электрона, $\gamma$ – его релятивистский фактор. Для интегрирования уравнений движения используются методы Рунге–Кутты 4-го порядка (в т.ч. с модификацией Мерсона, позволяющей контролировать точность на каждом шаге).

Магнитное поле с индукцией **B** создаётся системой соленоидов; расчёт поля оптимизирован посредством аналитического вычисления интегралов по радиальной и продольной координатам [10]. Напряжённость электрического поля **E** выражается через потенциал $U$, удовлетворяющий уравнению Пуассона в области, ограниченной электродами с заданными потенциалами $U_B$, а также уравнению непрерывности тока:

$$\boldsymbol{E} = -\nabla U, \quad \Delta U = \rho, \quad U\Big|_{\Gamma} = U_B, \tag{3}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \tag{4}$$

где $\rho$ и $\mathbf{j} = \rho \, \mathbf{v}$ – плотности пространственного заряда и тока электронного пучка.

Наличие правой части уравнения Пуассона требует, чтобы все электроны двигались в поле, на величину которого влияет само это движение. Требуется несколько последовательных итераций расчёта траекторий электронов и нахождения создаваемого ими пространственного заряда $\rho$, чтобы получилась стационарная картина. На начальной (нулевой) итерации плотность объемного заряда полагается равной нулю и находится решение *уравнения Лапласа* (см. п. 2). На следующих итерациях электрическое поле находится из решения уравнения Пуассона (см. п. 3) с плотностью $\rho$, вычисленной на предыдущей итерации, и затем вновь рассчитываются электронные траектории. Итерации останавливаются, когда изменение плотности пространственного заряда от итерации к итерации становится меньше некоторой заданной величины.

**2. Электрическое поле системы электродов.** На первом этапе необходимо найти напряжённость электрического поля «холодной системы», в которой поле создаётся набором электродов с приложенными к ним различными потенциалами.

**2.1. Постановка задачи. Уравнение Лапласа.** Рассмотрим уравнение Лапласа:

$$\Delta U = 0 \tag{5}$$

в области:

$$\Omega \subset \mathbb{R}^n. \tag{6}$$

Гладкую границу области разобьём на $K$ последовательно идущих участков:

$$\partial\Omega \equiv \Gamma = \Gamma_1 \cup \ldots \cup \Gamma_K. \tag{7}$$

На каждом $k$-ом участке ($k = \overline{1, K}$) ставится своё граничное условие: либо Дирихле:

$$U(\eta) = U_k, \quad \eta \in \Gamma_k, \tag{8}$$

либо Неймана:

$$\frac{\partial U(\eta)}{\partial n} = 0, \quad \eta \in \Gamma_k, \tag{9}$$

где $\partial n$ – нормаль к $\Gamma_k$ в точке $\eta$.

Условия Дирихле задают постоянные потенциалы $U_k$ на поверхности металлических электродов, а условия Неймана ставятся в межэлектродных промежутках. В частности, при рассмотрении задачи в цилиндрических координатах в азимутально-симметричном случае на оси $z$ системы ставится условие Неймана:

$$\frac{\partial U}{\partial r} = 0, \quad r = 0. \tag{10}$$

**2.2. Метод дискретных источников (МДИ).** Далее рассмотрим вспомогательную область $\Pi \subset \mathbb{R}^n$, полностью объемлющую область $\Omega$:

$$\Pi \subset \Omega, \quad \partial\Pi \cap \partial\Omega = \emptyset. \tag{11}$$

Гладкая граница $\mathcal{S} \equiv \partial\Pi$ нигде не касается и не пересекает границу $\Gamma$.

Ограничимся далее только граничным условием Дирихле (кроме оси $r = 0$, если она является частью границы). Решение задачи (5), (8) в области $\Omega$ представим в виде *потенциала простого слоя:*

$$U(\eta) = \int_{\mathcal{S}} G(\eta, \xi)\, \mu(\xi)\, d\mathcal{S}. \tag{12}$$

Здесь $\eta \in \overline{\Omega} \equiv \Omega \cup \partial\Omega$ – точки, где требуется вычислить решение; $\xi \in \mathcal{S}$ – точки на границе вспомогательной области, где распределён заряд с [неизвестной] плотностью $\mu$; $G(\eta, \xi)$ – функция источника, в нашем случае она представляет собой фундаментальное решение уравнения (5) во всём пространстве $\mathbb{R}^n$. Заметим, что $G$ является решением уравнения:

$$\Delta G(\eta - \xi) = \delta(\eta - \xi). \tag{13}$$

Для нахождения неизвестного распределения $\mu(\xi)$, исходя из граничного условия (8) и представления (12), запишем граничное *интегральное уравнение* (ИУ):

$$\int_{\mathcal{S}} G(\eta, \xi)\, \mu(\xi)\, d\mathcal{S} = U_B(\eta), \quad \eta \in \Gamma, \tag{14}$$

где $U_B(\eta)$ – заданное распределение потенциала вдоль границы области.

Для численного нахождения распределения $\mu(\xi)$ можно использовать как метод коллокаций (поточечное представление решения), так и метод моментов (представление $\mu$ в виде суперпозиции базисных функций с неизвестными коэффициентами, которые отыскиваются посредством решения СЛАУ). Далее остановимся подробнее на *методе коллокаций*.

Разобьём вспомогательную границу $\mathcal{S}$ на $N$ участков с ненулевой длиной:

$$\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \cup \ldots \cup \mathcal{S}_N. \tag{15}$$

и введём обозначения:

$$\begin{gathered} \{\, \xi_i \colon\ \xi_i \in \mathcal{S}_i \,\}, \\ \mu_i = \mu(\xi_i), \end{gathered} \quad i = \overline{1, N}, \tag{16}$$

где каждая точка $\xi_i$ размещена в центре своего участка $\mathcal{S}_i$.

Тогда интеграл в (12) разбивается на сумму интегралов по участкам:

$$U(\eta) = \sum_{i=1}^{N} \int_{\mathcal{S}_i} G(\eta, \xi)\, \mu(\xi)\, d\mathcal{S}, \quad \xi \in \mathcal{S}_i\,. \tag{17}$$

Вместо поиска непрерывного распределения будем искать значения $\mu(\xi)$ лишь в точках $\xi_i$. Неизвестную функцию $\mu(\xi)$ считаем при этом кусочно-постоянной (ступенчатой) со значениями $\mu_i$:

$$\mu(\xi) = \begin{cases} \mu_i, & \xi \in \mathcal{S}_i, \\ & i = \overline{1, N}. \end{cases} \tag{18}$$

В этом случае можно оставить под интегралом лишь ядро:

$$U(\eta) = \sum_{i=1}^{N} \mu_i \int_{\mathcal{S}_i} G(\eta, \xi)\, d\mathcal{S}, \quad \xi \in \mathcal{S}_i\,. \tag{19}$$

Представление (19) можно использовать для нахождения $\mu_i$, вычислив приближённо интегралы по $\mathcal{S}_i$ произвольным численным методом. При предельном упрощении, применяя метод прямоугольников с единственным слагаемым, запишем потенциал в виде:

$$U(\eta) = \sum_{i=1}^{N} \mu_i \, \|\mathcal{S}_i\| \, G(\eta, \xi_i). \tag{20}$$

Обозначим через $Q_i = \mu_i \, \|\mathcal{S}_i\|$ точечный заряд, сосредоточенный в точке $\xi_i$, называемый в дальнейшем *дискретный источник*. Тогда из (20) получаем всюду используемое в дальнейшем представление приближённого решения, которое является анзацем Метода дискретных (вспомогательных) источников:

$$U(\eta) = \sum_{i=1}^{N} Q_i \, G(\eta, \xi_i). \tag{21}$$

Напряжённость электрического поля в стационарном случае записывается в виде:

$$\boldsymbol{E} = -\nabla U. \tag{22}$$

Компоненты поля получаются из представления (21) дифференцированием функции источника $G$ по координатным осям:

$$\boldsymbol{E}(\eta) = -\sum_{i=1}^{N} Q_i \, \nabla G(\eta, \xi_i). \tag{23}$$

**2.3. Нахождение весов дискретных источников.** На границе Γ выберем $N$ точек с ненулевым расстоянием друг от друга:

$$\{\eta_j\} \in \Gamma, \quad j = \overline{1, N}, \tag{24}$$

называемых далее *точками коллокации*. Желательно каждую точку $\eta_j$ размещать так, чтобы расстояние от неё до соответствующей точки $\xi_i$ было бы минимальным.

Если в этих точках проверить граничное условие (8), пользуясь представлением потенциала в виде (21), получим аппроксимацию интегрального уравнения (14) системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно вектора источников $\{q_i\}$:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} Q_i \, G(\eta_j, \xi_i) = U_B(\eta_j), \\ \qquad\qquad\qquad j = \overline{1, N}. \end{cases} \tag{25}$$

Каждый элемент квадратной $N \times N$ матрицы $A \equiv \{a_{ji} = G(\eta_j, \xi_i)\}$ формируется независимо от других, что позволяет легко распараллеливать её заполнение.

Для поиска решения СЛАУ можно использовать произвольный метод, способный удерживать точность при больших размерностях ($N$ от 300 до 1500 в двумерных задачах и десятки тысяч – в трёхмерных) и числах обусловленности (типично от $10^5$ до $10^{14}$). Как правило, явные методы не удовлетворяют этим требованиям, поэтому применяются итерационные, например, методы сопряжённых градиентов, сингулярного разложения матриц (SVD), с использованием подпространств Крылова (GMRES) и др.

Найдя решение $\boldsymbol{Q} = A^{-1}\boldsymbol{U_B}$ СЛАУ (25), можно вычислить потенциал в любой точке пространства, пользуясь анзацем (21).

**2.4. Выбор координат дискретных источников.** При использовании в МДИ поверхности $\mathcal{S}$, объемлющей область Ω, итоговое решение является гармонической функцией, как суперпозиция гармонических источников $G$ с весами $q_i$, причём внутри всей

области П, ограниченной $\mathcal{S}$. Соответственно, поскольку Г находится целиком внутри П, решение (21) уравнения (5) тоже должно быть гармоническим на всей Г. При этом, в граничном условии Дирихле (8) потенциал $U_k$ является заданным, причём кусочно-постоянной функцией.

Таким образом, если на всех участках заданы только условия Дирихле, потенциал на границе не может быть гармоническим; граничные условия (8) можно удовлетворить лишь в некоторых точках границы (в частности, в точках коллокации – по построению), но на всей границе целиком – невозможно. Следовательно, при увеличении $N \to \infty$ , даже если $\|\Gamma_k\| \to 0$ при всех $k = \overline{1,M}$, получившееся решение $U(\eta)$, $\eta \in \Gamma$ не будет сходиться к функции $U_B$, определённой граничными условиями (8).

Для решения этой проблемы можно пойти двумя путями:

– чередовать граничные условия Дирихле и Неймана с тем, чтобы на границе не возникал скачок потенциала, обусловленный переходом от участка к участку $\Gamma_k$;

– задавать $U_k$ не постоянной функцией на $k$-ом участке, а таким образом, чтобы итоговая $U_B$, составленная из $U_k$, $k = \overline{1,M}$ была бы на всей Г следом гармонической функции.

Заметим, что если на границе задано условие Дирихле:

$$U(\eta) = U_B(\eta), \quad \eta \in \Gamma \tag{26}$$

(даже если $U_B$ является следом аналитической функции!), интегральное уравнение (14), соответствующее представлению решения в виде потенциала простого слоя (12), является уравнением Фредгольма I-го рода с ядром $G$ и неизвестной плотностью $\mu$ на границе $\mathcal{S}$ вспомогательной области П. Как известно, задача отыскания решения таких ИУ является некорректной и требуется какая-либо процедура регуляризации.

В этом качестве можно использовать свободный параметр – произвол в выборе формы объемлющей области П, а в дискретном случае – произвол в выборе координат дискретных источников. В частности, используется отход границы $\mathcal{S}$, по которой проводится интегрирование (где распределён заряд $\mu$), от границы области Г, на которой проверяется граничное условие, на некоторое заданное ненулевое расстояние, которое в данном случае и является параметром регуляризации.

На практике граница $\mathcal{S}$ строится «параллельно» границе Г с некоторым отступом $\chi$. Координаты дискретных источников $\xi_i$ находятся из пересечения нормалей к границе Г, проведённых через соответствующие точки коллокации $\eta_i$. При этом автоматически получается $\|\eta_i - \xi_i\| = \chi$ для всех $i = \overline{1,N}$. Удобно нормировать высоту $\chi$ на шаг

$$h_m = \|\eta_i - \eta_{i-1}\| \tag{27}$$

следования дискретных источников; обычно полагается:

$$\chi = w_1 h_m, \tag{28}$$

где относительное расстояние от источника до точки коллокации $w_1$ является нормированным параметром регуляризации. При $w_1 < 1.2$ число обусловленности матрицы СЛАУ (6.22) уменьшается, но при этом наблюдается «раскачивание» потенциала между точками коллокации; при уходе от границы вглубь рабочей области потенциал «выглаживается» и погрешность его нахождения уменьшается. Однако при $w_1 > 1.8$ число обусловленности матрицы $A$ начинает быстро расти и, соответственно, растёт погрешность нахождения решения СЛАУ $q_i$, что приводит к ошибке вычисления потенциала $U$ как на границе, так и внутри области Ω.

Увеличение количества точек коллокации с соответствующим пропорциональным уменьшением шага их следования $h_m$ при сохранении относительного расстояния $w_1$ приводит к увеличению числа обусловленности вследствие увеличения размерности СЛАУ. При этом увеличиваются время и погрешности нахождения решения, тогда как амплитуда

«раскачивания» потенциала между точками коллокации не уменьшается (а зачастую – увеличивается). Для уменьшения этой амплитуды требуется увеличивать $w_1$ быстрее, чем уменьшать $h_m$, поэтому при сгущении точек коллокации число обусловленности СЛАУ быстро растёт. Разумный выбор количества точек коллокации $N$ и расстояния $w_1$ обусловлен как геометрией системы (самые мелкие детали электродов должны быть представлены достаточным количеством точек), так и опытом пользователя.

Заметим, что решение задачи (5), (8) можно искать также в виде потенциала двойного слоя, что приводит к интегральному уравнению Фредгольма II-го рода. Соответствующая матрица СЛАУ обладает очень малым числом обусловленности (порядка 10), но поскольку потенциал двойного слоя терпит разрыв на границе, при любом конечном числе источников наблюдается искажение потенциала при приближении к границе, и ещё большее искажение его градиента (22), что неприемлемо, поскольку электроны стартуют прямо с границы и ошибки в расчёте поля приводят к сильному отклонению их траекторий.

**2.5. Общий (азимутально-несимметричный) случай.** Рассмотрим уравнение Лапласа (5) в цилиндрической области $\Omega_3 \subset \mathbb{R}^3$:

$$\Delta U(r,\varphi,z) = 0, \quad (r,\varphi,z) \in \Omega_3, \quad r \geq 0, \ \ \varphi \in [0,2\pi), \tag{29}$$

$$\Delta U \equiv \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \equiv \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}. \tag{30}$$

Считаем, что задано распределение потенциала на границе области $\Omega_3$:

$$U\Big|_{\Gamma} = U_B(\eta), \quad \eta \in \Gamma, \quad \Gamma = \partial\Omega_3. \tag{31}$$

Потенциал $U(r,\varphi,z)$ в области $\Omega_3$ ищем методом дискретных источников (МДИ) по методике, изложенной выше:

$$U(r,\varphi,z) = \sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\left(r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right) G_3\left(r,\varphi,z,r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right), \tag{32}$$

где $\left(r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right)$ – координаты $N_3$ штук дискретных источников $Q_{i_3}$, расположенных вдоль вспомогательной поверхности $\mathcal{S}$, построенной «параллельно» границе Г.

Компоненты электрического поля (22) с учётом (23) имеют вид:

$$E_r(r,\varphi,z) = -\sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\left(r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right) \frac{\partial G_3}{\partial r}\left(r,\varphi,z,r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right), \tag{33}$$

$$E_\varphi(r,\varphi,z) = -\sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\left(r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right) \frac{1}{r}\frac{\partial G_3}{\partial \varphi}\left(r,\varphi,z,r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right), \tag{34}$$

$$E_z(r,\varphi,z) = -\sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\left(r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right) \frac{\partial G_3}{\partial z}\left(r,\varphi,z,r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right). \tag{35}$$

Функция Грина (источника):

$$G_3(r,\varphi,z,r_0,\varphi_0,z_0) = C_3\,\chi_3^{-1/2} \tag{36}$$

имеет физический смысл потенциала, который заряд, сосредоточенный в точке $(r_0,\varphi_0,z_0)$, создаёт в точке $(r,\varphi,z)$. Здесь:

$$C_3 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}, \quad \chi_3 = (z-z_0)^2 + r^2 + r_0^2 - 2\,r\,r_0\cos(\varphi-\varphi_0). \tag{37}$$

Производные функции источника вдоль координатных осей $r,\varphi,z$ имеют вид:

$$\frac{\partial G_3}{\partial r}(r,\varphi,z,r_0,\varphi_0,z_0) = -C_3\,(r - r_0\cos(\varphi-\varphi_0))\,\chi_3^{-\frac{3}{2}}, \tag{38}$$

$$\frac{\partial G_3}{\partial \varphi}(r,\varphi,z,r_0,\varphi_0,z_0) = -C_3\,r\,r_0\sin(\varphi-\varphi_0)\,\chi_3^{-3/2}, \tag{39}$$

$$\frac{\partial G_3}{\partial z}(r,\varphi,z,r_0,\varphi_0,z_0) = -C_3\,(z-z_0)\,\chi_3^{-3/2}. \tag{40}$$

Величины зарядов $Q_{i_3}$ определятся из СЛАУ, определённой в (25):

$$\begin{cases} \sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\left(r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right) G_3\left(r_j,\varphi_j,z_j,r_{i_3},\varphi_{i_3},z_{i_3}\right) = U_B\left(r_j,\varphi_j,z_j\right), \\ j = \overline{1,N_3}. \end{cases} \tag{41}$$

где $U_B$ – распределение потенциала (31) вдоль границы области, определяемое для точек коллокации $\eta_j \equiv \left(r_j,\varphi_j,z_j\right)$.

**2.6. Азимутально-симметричный случай.** Рассмотрим уравнение Лапласа (29) в азимутально-симметричном случае:

$$\Delta U(r,z)=0,\quad (r,z)\in\Omega_2,\quad r\geq 0, \tag{42}$$

$$\Delta U\equiv\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\equiv\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}. \tag{43}$$

Считаем, что задано распределение потенциала на границе области $\Omega_2$:

$$U\Big|_{\Gamma}=U_B(\eta),\quad \eta\in\Gamma,\quad \Gamma=\partial\Omega_2\backslash\{r=0\}. \tag{44}$$

На оси $z$ цилиндра выполняется условие Неймана в виде (10). Данное условие азимутальной симметричности учитывается при построении функции источника $G_2$, но точки коллокации вдоль оси $z$ не располагаются.

Потенциал $U(r,z)$ в области $\Omega_2$ ищем методом дискретных источников (МДИ) по методике, изложенной п. 2.2:

$$U(r,z)=\sum_{i_2=1}^{N_2}Q_{i_2}\left(r_{i_2},z_{i_2}\right)G_2\left(r,z,r_{i_2},z_{i_2}\right), \tag{45}$$

где $\left(r_{i_2},z_{i_2}\right)$ – координаты $N_2$ штук дискретных источников $Q_{i_2}$, расположенных вдоль вспомогательной линии $\mathcal{S}$, построенной «параллельно» границе Г.

Компоненты электрического поля (22) с учётом (23) имеют вид:

$$E_r(r,z)=-\sum_{i_2=1}^{N_2}Q_{i_2}\left(r_{i_2},z_{i_2}\right)\frac{\partial G_2}{\partial r}\left(r,z,r_{i_2},z_{i_2}\right), \tag{46}$$

$$E_\varphi(r,z)\equiv 0, \tag{47}$$

$$E_z(r,z)=-\sum_{i_2=1}^{N_2}Q_{i_2}\left(r_{i_2},z_{i_2}\right)\frac{\partial G_2}{\partial z}\left(r,z,r_{i_2},z_{i_2}\right). \tag{48}$$

Функция Грина (источника):

$$G_2(r,z,r_0,z_0)=C_2\,\mathcal{F}(\kappa)\,\chi_2^{-1/2} \tag{49}$$

имеет физический смысл потенциала, который заряженное кольцо нулевой толщины с центром в $r=0$, проходящее через точку $(r_0,z_0)$, создаёт в точке $(r,z)$. Здесь:

$$C_2=\frac{4}{2\pi}C_3=\frac{1}{4\pi^2\varepsilon_0},\quad \chi_2=(r+r_0)^2+(z-z_0)^2. \tag{50}$$

Производные функции источника вдоль координатных осей $r$ и $z$ имеют вид:

$$\frac{\partial G_2}{\partial r}(r,z,r_0,z_0)=-C_2\left\{(r+r_0)\,\mathcal{P}(\kappa)-\frac{2\,r_0}{k^2}\left(\mathcal{P}(\kappa)-\mathcal{F}(\kappa)\right)\right\}\chi_2^{-3/2}, \tag{51}$$

$$\frac{\partial G_2}{\partial z}(r,z,r_0,z_0)=-C_2\,(z-z_0)\,\mathcal{P}(\kappa)\,\chi_2^{-3/2}, \tag{52}$$

Для ускорения вычислений производится параболическая интерполяция эллиптических интегралов $\mathcal{F}(\kappa),\mathcal{P}(\kappa)$ по заранее заготовленной таблице их значений от аргумента:

$$\kappa^2(r,z,r_0,z_0)=4\,r\,r_0\,\chi_2^{-1}; \tag{53}$$

$$\mathcal{F}(\kappa)=\int_0^{\pi/2}(1-\kappa^2\sin^2\beta)^{-1/2}\,d\beta,\quad \mathcal{P}(\kappa)=\int_0^{\pi/2}(1-\kappa^2\sin^2\beta)^{-3/2}\,d\beta. \tag{54}$$

Величины зарядов $Q_{i_2}$ определятся из СЛАУ, определённой в (25):

$$\begin{cases}\sum_{i_2=1}^{N_2}Q_{i_2}\left(r_{i_2},z_{i_2}\right)G_2\left(r_j,z_j,r_{i_2},z_{i_2}\right)=U_B\left(r_j,z_j\right),\\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad j=\overline{1,N_2}.\end{cases} \tag{55}$$

где $U_B$ – распределение потенциала (44) вдоль границы области, определяемое для точек коллокации $\eta_j\equiv\left(r_j,z_j\right)$.

**3. Методы учёта пространственного заряда.** Для нахождения электрического поля с учётом пространственного (объёмного) заряда (ПЗ) электронного пучка необходимо решить уравнение Пуассона описанными в п. 1 методами трубок тока и последовательных итераций.

**3.1. Применение МДИ для решения уравнения Пуассона.** Метод дискретных источников, изложенный в п. 2 применительно к уравнению Лапласа, естественным образом адаптируется и для решения уравнения Пуассона

$$\Delta U=\rho \tag{56}$$

с такими же граничными условиями (8)–(9).

Аналогичным образом строится вспомогательная граница $\mathcal{S}$, целиком лежащая *вне* расчётной области $\Omega$. На $\mathcal{S}$ размещаются $N$ дискретных источников $Q_i$ с координатами $\xi_i$, а на границе Г –точки коллокации, в которых проверяется граничное условие (8). Потенциал $U$ в любой точке внутри области представляем в виде суммы двух компонент:

$$U(\eta) = U_D(\eta) + U_S(\eta), \quad \eta \in \Omega. \tag{57}$$

Потенциал $U_D$ порождён граничными электродами и находится аналогично (21) :

$$U_D(\eta) = \sum_{i=1}^{N} Q_i\, G(\eta, \xi_i), \quad \xi_i \in \mathcal{S}. \tag{58}$$

Потенциал $U_S$ порождён пространственным зарядом пучка $\rho(\eta)$ на предыдущей итерации. На нулевой итерации заряд отсутствует ($\rho(\eta) \equiv 0,\ U_S(\eta) \equiv 0$), а на последующих итерациях он находится согласно анзацу МДИ:

$$U_S(\eta) = \sum_{m=1}^{M} Q_m\, G(\eta, \xi_m), \quad \xi_m \in \Omega, \tag{59}$$

где $M$ – общее количество ячеек сетки для учёта ПЗ, $Q_m$ – заряды, сосредоточенные в центрах $\xi_m$ ячеек этой сетки. Величины зарядов $Q_m$ находятся методом трубок тока по формуле (1) при интегрировании уравнения движения (2) для всех электронов.

Величины зарядов $Q_i$ находятся из системы $N$ линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} U_D(\eta_j) + U_S(\eta_j) = U_B(\eta_j), \\ j = \overline{1, N}, \end{cases} \tag{60}$$

полученной проверкой граничного условия (равенство потенциала (57) заданному распределению $U_B(\eta_j)$) в дискретных точках (точках коллокации $\eta_j$), расположенных с некоторым шагом на поверхности электродов Г.

Компоненты электрического поля (22) получаются путём дифференцирования обеих частей потенциала $U$ вдоль соответствующих координатных осей по формулам, аналогичным (23). Фактически, в силу линейности представлений (58) и (59), требуется дифференцировать лишь функцию источников $G$:

$$\boldsymbol{E}(\eta) = -\nabla U(\eta) = -\sum_{i=1}^{N} Q_i\, \nabla G(\eta, \xi_i) - \sum_{m=1}^{M} Q_m\, \nabla G(\eta, \xi_m). \tag{61}$$

**3.2. Азимутально-симметричный случай.** МДИ для уравнения Пуассона в азимутально-симметричном случае с Лапласианом (43) и граничными условиями (44), (10) строится по формулам (57)–(60) очевидным образом:

$$U(r, z) = U_{D_2}(r, z) + U_{S_2}(r, z), \quad (r, z) \in \Omega_2 \subset \mathbb{R}^2, \tag{62}$$

$$U_{D_2}(r, z) = \sum_{i_2=1}^{N_2} Q_{i_2}\left(r_{i_2}, z_{i_2}\right) G_2\left(r, z, r_{i_2}, z_{i_2}\right), \quad \left(r_{i_2}, z_{i_2}\right) \in \mathcal{S}. \tag{63}$$

Функция источника $G_2$ и её производные определяются формулами (49)–(52). Величины зарядов $Q_{i_2}$ находятся из системы (60) с $N_2$ уравнениями, где $\eta_j \equiv \left(r_j, z_j\right)$.

Порождённый пространственным зарядом электронного пучка потенциал:

$$U_{S_2}(r, z) = \sum_{m_2=1}^{M_2} Q_{m_2}\left(r_{m_2}, z_{m_2}\right) G_2\left(r, z, r_{m_2}, z_{m_2}\right), \quad \left(r_{m_2}, z_{m_2}\right) \in \Omega_2 \tag{64}$$

с той же функцией Грина $G_2$, что и при нахождении потенциала на границе; $M_2$ – общее количество ячеек сетки для учёта ПЗ.

**3.3. Азимутально-несимметричный случай.** На практике реализация МДИ для уравнения Пуассона (56) с Лапласианом (30) и граничным условием (31) в цилиндрической области является весьма нетривиальной задачей. Сначала формально воспользуемся формулами (57)–(60):

$$U(r, \varphi, z) = U_{D_3}(r, \varphi, z) + U_{S_3}(r, \varphi, z), \quad (r, \varphi, z) \in \Omega_3 \subset \mathbb{R}^3, \tag{65}$$

$$U_{D_3}(r, \varphi, z) = \sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\, G_3\left(r, \varphi, z, r_{i_3}, \varphi_{i_3}, z_{i_3}\right), \quad \left(r_{i_3}, \varphi_{i_3}, z_{i_3}\right) \in \mathcal{S}. \tag{66}$$

Функция источника $G_3$ и её производные определяются формулами (36)–(40). Величины зарядов $Q_{i_3}$ находятся из системы (60) с $N_3$ уравнениями, где $\eta_j \equiv \left(r_j, \varphi_j, z_j\right)$.

Порождённый пространственным зарядом электронного пучка потенциал:

$$U_{S_3}(r, \varphi, z) = \sum_{m_3=1}^{M_3} Q_{m_3}\, G_3\left(r, \varphi, z, r_{m_3}, \varphi_{m_3}, z_{m_3}\right), \quad \left(r_{m_3}, \varphi_{m_3}, z_{m_3}\right) \in \Omega_3 \tag{67}$$

с той же функцией Грина $G_3$, что и при нахождении потенциала на границе; $M_3$ – общее количество ячеек сетки для учёта ПЗ.

**3.4. Усреднение объёмного заряда по азимуту.** Если буквально следовать формулам (65)–(67), получится СЛАУ с полностью заполненной матрицей размерностью $N_3$ порядка десятков или сотен тысяч неизвестных. Такую систему затруднительно как разместить в памяти современных компьютеров, так и решить за приемлемое время.

Для решения этой проблемы можно принять, что влияние ПЗ на граничные условия учитывается *усреднённо* по азимуту, что оправданно в случае умеренных значений неоднородности плотности эмиссии или малых нарушений соосности электродной и магнитной подсистем (при этом сами подсистемы остаются азимутально-симметричными).

Потенциал $U$ в любой точке цилиндрической области $\Omega_3$ представляем в виде:

$$U(r,\varphi,z) = U_{D_2}(r,z) + U_{S_3}(r,\varphi,z), \quad (r,\varphi,z) \in \Omega_3 \subset \mathbb{R}^3. \tag{68}$$

Потенциал $U_{D_2}$, порождённый азимутально симметричными граничными электродами ЭОС, находим по формуле (63), а порождённый объёмным зарядом пучка [несимметричный] потенциал $U_{S_3}$ — по формуле (67).

Неизвестные величины $N_2$ вспомогательных зарядов $Q_{i_2}$ находятся из СЛАУ:

$$\begin{cases} U_{D_2}(r_j,z_j) + \bar{U}_{S_2}(r_j,z_j) = U_B(r_j,z_j), \\ j = \overline{1,N_2}, \end{cases} \tag{69}$$

Где $$\bar{U}_{S_2}(r,z) \equiv \int_0^{2\pi} U_{S_3}(r,\varphi,z)\,d\varphi = \sum_{m_2=1}^{M_2} \bar{Q}_{m_2}(r_{m_2},z_{m_2})\, G_2(r,z,r_{m_2},z_{m_2}) \tag{70}$$

– усреднённый по азимуту потенциал, порождённый пространственным зарядом пучка на предыдущей итерации. Величины зарядов $\bar{Q}_{m_2}$ получены суммированием зарядов $Q_{m_3}$ по азимуту для каждого элемента сетки в плоскости $(r,z)$:

$$\bar{Q}_{m_2}(r_{m_2},z_{m_2}) = \sum_{m_1=1}^{M_\varphi} Q_{m_3}(r_{m_3},\varphi_{m_1},z_{m_3}), \tag{71}$$

где $M_\varphi$ – количество ячеек сетки в азимутальном измерении, $M_2$ – количество ячеек сетки в плоскости $(r,z)$ в каждом азимутальном сечении, $M_3 = M_2\, M_\varphi$ – общее количество ячеек сетки для учёта пространственного заряда электронного пучка.

Как можно заметить из определений (68) и (69), в этой простейшей гибридной модели оказалось нарушенным установленное ранее правило формирования СЛАУ; для проверки граничного условия тут используется двумерная (азимутально-симметричная) проекция объёмного потенциала $U_{S_3}$. В результате, ни в одной из $N_2$ точек коллокации (и, тем более, между ними) граничное условие (31) не выполняется строго.

С одной стороны, этот подход позволил понизить размерность СЛАУ с $N_3$ до $N_2$, т.е. в $N_\varphi = N_3/N_2 \approx 10^2..10^3$ раз и, тем самым, позволил решить задачу на персональном компьютере. С другой стороны, при усреднении (71) потерялась информация об азимутальном распределении пространственного заряда, и если отклонения от среднего в этом распределении велики, то и погрешность вычисления поля будет также велика. В основном, это критично для области эмиссии электронов, где ПЗ напрямую примыкает к границе (электроду-эмиттеру), особенно в случае существенной неоднородности плотности эмиссии. Для исправления этого недостатка можно использовать следующий подход.

**3.5. Метод локальных коррекций (МЛК).** В границе Г цилиндрической (азимутально-симметричной) рабочей области $\Omega_3 \subset \mathbb{R}^n$ выделим часть $\Gamma_3$ и оставшуюся часть $\Gamma_2$:

$$\partial\Omega_3 \equiv \Gamma = \Gamma_2 \cup \ldots \cup \Gamma_3. \tag{72}$$

Потенциал $U$ в любой точке области представляем в виде суммы *трёх* компонент:

$$U(r,\varphi,z) = U_{D_2}(r,z) + U_{D_3}(r,\varphi,z) + U_{S_3}(r,\varphi,z), \quad (r,\varphi,z) \in \Omega_3. \tag{73}$$

Порождённый объёмным зарядом пучка [несимметричный] потенциал $U_{S_3}$ находится по формуле (67). Потенциал, порождённый граничными электродами ЭОС, складывается из потенциала $U_{D_2}$, который отражает усреднённое по азимуту влияние электродов на части границы $\Gamma_2$ и неусреднённого потенциала $U_{D_3}$ от электродов на части границы $\Gamma_3$:

$$U_{D_2}(r,z) = \sum_{i_2=1}^{N_2} Q_{i_2}\left(r_{i_2}, z_{i_2}\right) G_2\left(r, z, r_{i_2}, z_{i_2}\right), \tag{74}$$

$$U_{D_3}(r,\varphi,z) = \sum_{i_3=1}^{N_3} Q_{i_3}\left(r_{i_3}, \varphi_{i_3}, z_{i_3}\right) G_3\left(r, \varphi, z, r_{i_3}, \varphi_{i_3}, z_{i_3}\right), \tag{75}$$

где $Q_{i_2}\left(r_{i_2}, z_{i_2}\right)$ и $Q_{i_3}\left(r_{i_3}, \varphi_{i_3}, z_{i_3}\right)$ – дискретные источники, расположенные на вспомогательной поверхности $\mathcal{S}$, построенной «параллельно» границе Г. Функция источника $G_2$ и её производные определяются формулами (49)–(52), а $G_3$ и её производные – формулами (36)–(40).

Неизвестные величины $N = N_2 + N_3$ вспомогательных граничных зарядов $Q_{i_2}$ и $Q_{i_3}$ находятся из СЛАУ, полученной проверкой граничного условия (31) в точках коллокации:

$$\begin{cases} U_{D_2}\left(r_j, z_j\right) + U_{D_3}\left(r_j, \varphi_j, z_j\right) + U_{S_3}\left(r_j, \varphi_j, z_j\right) = U_B\left(r_j, \varphi_j, z_j\right), \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad j = \overline{1, N}. \end{cases} \tag{76}$$

При этом на части границы $\Gamma_2$ располагаются точки коллокации $\left(r_j, z_j\right)$, $j = \overline{1, N_2}$, а на участке границы $\Gamma_3$ точки $\left(r_j, \varphi_j, z_j\right)$, $j = \overline{N_2 + 1, N_2 + N_3}$ распределены также и по азимуту.

Данный подход является компромиссом между методами, описанными в пп. 3.3 и 3.4, и переходит в них в предельных случаях: при $\Gamma \equiv \Gamma_3$ получается исходный азимутально-несимметричный подход (п. 3.3), а при $\Gamma \equiv \Gamma_2$ – вариант с усреднением ПЗ по азимуту (п. 3.4). В непредельном варианте МЛК позволяет строго выполнить граничное условие (31) по крайней мере в точках коллокации, относящихся к участку границы $\Gamma_3$. Разумно расположить этот участок в областях эмиттера и коллектора, где ПЗ напрямую примыкает к граничным электродам. На остальной части границы $\Gamma_2$ объёмный заряд не подходит близко к границе и влияние его асимметрии заметно меньше.

Альтернативная модификация МЛК – *метод точечных поправок* (МТП) заключается в том, что часть $\Gamma_2$, где граничное условие выполняется усреднённо по азимуту, совпадает со всей границей Г, но на части границы $\Gamma_3 \subset \Gamma$ *дополнительно* присутствуют точки коллокации и дискретные источники, распределённые по азимуту. При этом *вместо* СЛАУ (76) для нахождения величин вспомогательных граничных зарядов $Q_{i_2}$ и $Q_{i_3}$ необходимо решить *две* СЛАУ: сначала (69) для нахождения всех усреднённых $Q_{i_2}$ (не принимая в расчёт существование источников, соответствующих $\Gamma_3$), а затем, уже зная $U_{D_2}$, решить ещё одну СЛАУ (76) для нахождения зарядов $Q_{i_3}$, которые в этом случае уже имеют смысл несимметричных точечных поправок к заряженным кольцам $Q_{i_2}$. Такой подход приводит к матрицам СЛАУ с более качественной структурой. Если отклонения от среднего в распределении ПЗ малы, то и величины поправочных зарядов также будут малы.

Расход памяти на хранение СЛАУ и время её обращения быстро растут при увеличении части $\Gamma_3$; не имеет смысла использовать этот метод уже при $N_3 > 10^4$. В случае сильной асимметрии ПЗ вдоль всей ЭОС необходимо воспользоваться следующим подходом.

**3.6. Метод множественных покрытий границы.** Метод множественных покрытий границы (ММП) является развитием метода локальных коррекций, изложенного выше. Суть ММП заключается в том, что граница области Г и вспомогательная граница $\mathcal{S}$ покрываются точками коллокации $\eta_j$ и дискретными источниками $\xi_i$ не единственным образом, а несколькими наборами. Выбор используемого при расчёте потенциала $U(\eta)$ покрытия зависит от точки наблюдения $\eta$, при этом сам потенциал рассчитывается по формуле (73).

Рабочая область $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ разбивается по продольной координате $z$ на $W$ непересекающихся подобластей (*регионов*):

$$\Omega = \Omega_1 \cup \ldots \cup \Omega_W. \tag{77}$$

Каждой точке $\eta \in \Omega$ ставится в соответствие регион $w(\eta),\ \eta \in \Omega_w$. Для каждого региона $w = \overline{1, W}$ производится независимое разбиение (72) границы Г на части, где граничные условия выполняются строго и усреднённо по азимуту. Соответственно, требуется индивидуальное для каждого региона размещение точек коллокации $\{\eta_j\}_w$ на границе Г и дискретных источников $\{\xi_i\}_w$ на вспомогательной границе $\mathcal{S}$:

$$\begin{matrix} \{\eta_j\}_w,\ \ \eta_j \in \Gamma,\ \ j = \overline{1, N_w}, \\ \{\xi_i\}_w,\ \ \xi_i \in \mathcal{S},\ \ i = \overline{1, N_w}, \end{matrix} \quad w = \overline{1, W}, \tag{78}$$

где $N_w$ – количество дискретных элементов границ для региона $\Omega_w$.

Таким образом, применив к каждому региону МЛК, и решив $W$ штук соответствующих СЛАУ (с размерностями $N_w$), получим в результате решение $U(\eta)$ уравнения Пуассона (56) для любой точки рабочей области $\eta \in \Omega$. Потенциал, порождённый граничными электродами, складывается из $U_{D_2}$, который отражает усреднённое по азимуту влияние дальних границ и $U_{D_3}$ – неусреднённый потенциал от электродов, ближайших к текущей точке наблюдения $\eta$.

Наилучшее применение ММП даёт в паре с МТП. В этом случае создаётся единственное азимутально-симметричное покрытие всей области, дающее одну СЛАУ (69) с $\Gamma_2 = \Gamma$, а для точечных несимметричных поправок область разбивается согласно (77)–(78), и вместо одной поправочной СЛАУ (76) большого размера получаются $W$ СЛАУ меньшего размера, дающие поправки $Q_{i_3}$ только для локальной окрестности текущей точки интегрирования. В момент перехода точки интегрирования из одного региона в другой поле может измениться скачкообразно. Во избежание этого эффекта следует делать соседние покрытия перекрывающимися, т.е. необходимо располагать источники и точки коллокации и за пределами области $\Omega_w$. При этом переключение между регионами происходит строго по их границе, т.е. в середине области перекрытия.

ММП имеет смысл использовать не только в несимметричном случае для распространения МЛК на всю границу Г, но и в азимутально-симметричном случае. Размещения (78) можно устроить так, чтобы в окрестности точки наблюдения источники и точки коллокации располагались гуще, чем на периферии, и, тем самым, давали бы более точное решение при малом общем количестве источников, что экономит время как при разложении матрицы СЛАУ, так и при нахождении граничного потенциала $U_D$. Платой за это является необходимость построения $W$ различных покрытий границы и, соответственно, решение $W$ штук СЛАУ, а при интегрировании уравнений движения – необходимость дополнительно проводить определение региона $\Omega_w$, в который попала текущая точка интегрирования $\eta$.

**Заключение.** После подтверждения работоспособности кода ANGEL-TA-S2D в двумерных расчетах технологических систем [11], были разработаны методы трехмерного моделирования, описанные в данной статье. Эти алгоритмы были реализованы на языке Fortran-90 и включены в состав комплекса программ ANGEL-TA-S3D. По результатам сравнения как с традиционными двумерными кодами, так и с коммерческими пакетами программ, новый код показал высокую точность и эффективность работы при проектировании пушек и коллекторов гиротронов, в том числе их вариантов со сложной азимутально-несимметричной конфигурацией.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке проекта по теме FFUF-2022-0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона». Автор благодарен В. Е. Запевалову, А. Д. Юнаковскому, О. П. Планкину и А. С. Зуеву за внимание к работе и плодотворные дискуссии.

**Список источников**

1. Мануилов В. Н. Электронные пучки для мазеров на циклотронном резонансе и лазеров на свободных электронах / Мануилов В. Н. // Соросовский образовательный журнал, 2001. – Т. 7. – № 10. – С. 81–87.
2. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков / Ш. Е. Цимринг – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
3. Завольский Н.А. Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона / Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев, и др. // Известия вузов. Радиофизика, 2011. – Т. 54 – № 6 – С. 444.
4. Pagonakis I. et al. Overview on recent progress in magnetron injection gun theory and design for high power gyrotrons. EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019, vol. 203, p. 04011.
5. Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., et al. Numerical simulation models of focussing systems of intense gyrotron helical electron beams. Int. J. of Infrared and MM waves, 2001, vol. 22, no. 8, p. 1119.
6. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики / В. П. Ильин. – М.: Наука, 1985.
7. Вашковский А.В. К нахождению распределения потенциала в области, ограниченной заданными формами с заданными потенциалами / А.В. Вашковский, В.Т. Овчаров // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ, 1971. – № 9. – С. 34.
8. Лыгин В.К. О методах интегральных уравнений и вспомогательных зарядов в траекторном анализе интенсивных электронных пучков / В.К. Лыгин, В.Н. Мануилов, Ш.Е. Цимринг // Электронная техника, Сер. 1, Электроника СВЧ, 1987. – №7 (401). – С. 36-38.
9. Планкин О. П. Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона. Инструкция для пользователя / О.П. Планкин, Е.С. Семенов // Методическая разработка. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. 32 с.
10. Семенов Е.С. Расчет статического магнитного поля системы соленоидов / Е.С. Семенов, А.Д. Юнаковский // Известия вузов. Радиофизика, 2010. – Т. 53. – № 12. – С.799-802.
11. Планкин О. П. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона / О.П. Планкин, Е.С. Семенов // Вестник НГУ, серия «Физика», 2013. – Т. 8. – № 2. – С. 44–54.

***Семенов Евгений Сергеевич.*** *К.ф.-м.н., Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, научный сотрудник. AuthorID: 146102, SPIN: 9049-4781, ORCID: 0000-0003-1572-985X. semes@ipfran.ru, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.*

---

UDC 621.385.69
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.014

# Algorithms for three-dimensional simulation of electron-optical system of the gyrotrons used in the ANGEL-TA-S3D program

**Evgeniy S. Semenov**

Institute of applied physics RAS,
Russia, Nizhny Novgorod, *semes@ipfran.ru*

**Abstract.** The article describes mathematical methods used to calculate an azimuthally asymmetric electric field for trajectory analysis of electron beams in gyrodevices. These algorithms, including some modifications of the discrete sources method implemented in the ANGEL software package, have shown high accuracy and efficiency in the design of guns and collectors of gyrotrons.

**Keywords:** electronic optics, gyrotron, discrete sources method, current pipes method, Poisson equation

**Acknowledgements**: The work was carried out with financial support on the topic FFUF-2022-0007 "Creation of powerful sources of electromagnetic radiation of the ECR range". The author is grateful to V. E. Zapevalov, A. D. Yunakovsky, O. P. Plankin and A. S. Zuev for their attention to the work and fruitful discussions.

## References


1. Manuilov V.N. Elektronnyye puchki dlya mazerov na tsiklotronnom rezonanse i lazerov na svobodnykh elektronakh [Electron Beams for Cyclotron Resonance Masers and Free-Electron Lasers]. Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal [Soros educational journal], 2001, vol. 7, no. 10, pp. 81-87.
2. Tsimring Sh.E. Vvedenie v vysokochastotnujy vakuumnujy electroniku i fiziku elektronnyh puchkov [Electron beam and microwave vacuum electronics]. N. Novgorod, IPF RAN Publ., 2012, 576 p.
3. Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., et al. Vlijanie nesoosnosti elektronnogo puchka i rezonatora na harakteristiki girotrona [The effect of electron beam and resonator misalignment on the characteristics of the gyrotron]. Izvestiya vuzov. Radiofizika [Radiophysics and quantum electronics], 2011, vol. 54, no. 6, pp. 444.
4. Pagonakis I. et al. Overview on recent progress in magnetron injection gun theory and design for high power gyrotrons. EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019, vol. 203, p. 04011.
5. Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., et al. Numerical simulation models of focussing systems of intense gyrotron helical electron beams. Int. J. of Infrared and MM waves, 2001, vol. 22, no. 8, p. 1119.
6. Il'in V.P. Chislennyye metody resheniya zadach elektrofiziki [Numerical methods for solving problems of electrophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1985.
7. Vashkovskiy A.V., Ovcharov V.T. K nakhozhdeniyu raspredeleniya potentsiala v oblasti, ogranichennoy zadannymi formami s zadannymi potentsialami [On finding the potential distribution in a region bounded by given shapes with given potentials]. Elektronnaya tekhnika. Ser. 1, Elektronika SVCh [Electronic engineering. Ser. 1, Microwave electronics], 1971, no. 9, p. 34.
8. Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E. O metodakh integral'nykh uravneniy i vspomogatel'nykh zaryadov v traektornom analize intensivnykh elektronnykh puchkov [On the methods of integral equations and auxiliary charges in the trajectory analysis of intense electron beams]. Elektronnaya tekhnika. Ser. 1, Elektronika SVCh [Electronic Engineering. Ser. 1, Microwave Electronics], 1987, no. 7 (401), pp. 36-38.
9. Plankin O.P., Semenov E.S. Kompleks programm ANGEL-2DS dlya modelirovaniya pushki girotrona. Instruktsiya dlya pol'zovatelya [ANGEL-2DS software package for gyrotron gun modeling. User manual]. Metodicheskaya razrabotka [Methodological development]. N. Novgorod, IPF RAN Publ., 2011, 32 p.
10. Semenov E.S., Yunakovskiy A.D. Raschet staticheskogo magnitnogo polya sistemy solenoidov [Calculation of the static magnetic field of a solenoid system]. Izvestiya vuzov. Radiofizika [Radiophysics and quantum electronics], 2010, vol. 53, no. 12, pp. 799-802.
11. Plankin O.P., Semenov E.S. Traektornyy analiz elektronno-opticheskoy sistemy tekhnologicheskogo girotrona [Trajectory analysis of the electron-optical system of a technological gyrotron]. Vestnik NGU, seriya “Fizika” [Bulletin of NSU, Series “Physics”], 2013, vol. 8, no. 2, pp. 44-54.


***Semenov Evgeniy Sergeevich.*** *PhD, Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, research fellow. AuthorID: 146102, SPIN: 9049-4781, ORCID: 0000-0003-1572-985X. semes@ipfran.ru, 46 Ulyanov Str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia.*

*Статья поступила в редакцию 23.05.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 25.08.2025.*

*The article was submitted 05/23/2025; approved after reviewing 06/25/2025; accepted for publication 08/25/2025.*

УДК 004.8+004.942
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.015

# Применение алгоритмов поиска ассоциативных правил для определения технологически значимых сочетаний компонентов в рецептурах резиновых смесей

**Рыбанов Александр Александрович, Каблов Виктор Федорович**

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Россия, г. Волжский, *rybanoff@yandex.ru*

**Аннотация.** В статье представлены результаты применения алгоритма поиска ассоциативных правил Apriori для анализа рецептур резиновых смесей с целью выявления технологически значимых сочетаний компонентов. Предложена методология, основанная на интеллектуальном анализе данных, которая позволяет автоматически обнаруживать устойчивые комбинации ингредиентов, сокращать пространство поиска рецептур и формализовать экспертные знания. В исследовании проанализирована база данных из 5065 промышленных рецептур с использованием метрик поддержки, достоверности и лифта. Выявлены ключевые ассоциации между ингредиентами резиновых смесей, Результаты работы демонстрируют потенциал методов ассоциативного анализа для оптимизации рецептур, сокращения времени разработки и цифровизации проектирования резиновых смесей.

**Ключевые слова:** ассоциативные правила, резиновые смеси, ингредиенты, машинное обучение, интеллектуальный анализ данных, база данных, метрики значимости, достоверность, поддержка, лифт, цифровизация материаловедения, поиск закономерностей

**Цитирование:** Рыбанов А.А. Применение алгоритмов поиска ассоциативных правил для определения технологически значимых сочетаний компонентов в рецептурах резиновых смесей / А.А. Рыбанов, В.Ф. Каблов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 177-188. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.015.

**Введение.** Современное проектирование рецептур резиновых смесей представляет собой сложную многокритериальную задачу, требующую учета множества взаимосвязанных факторов: выбора полимерной матрицы, наполнителей, пластификаторов, вулканизующих агентов и их оптимальных концентраций. Традиционные подходы, основанные на эмпирическом подборе компонентов, часто оказываются ресурсоемкими и неэффективными, особенно в условиях роста требований к эксплуатационным характеристикам материалов (прочность, износостойкость, термостабильность) и необходимости сокращения сроков разработки [1, 2].

В этом контексте методы интеллектуального анализа данных, например, такие, как поиск ассоциативных правил (association rule mining, ARM), открывают новые возможности для систематизации знаний о взаимосвязях между компонентами смесей и их свойствами [3, 4, 5]. Алгоритмы Apriori, FP-Growth [6, 7, 8] и ECLAT [9, 10, 11], изначально разработанные для анализа потребительских корзин, демонстрируют высокую эффективность в выявлении скрытых паттернов в многокомпонентных системах. Их применение позволяет:

- автоматически обнаруживать устойчивые комбинации ингредиентов, коррелирующие с целевыми характеристиками;
- сокращать пространство поиска за счет исключения заведомо неэффективных составов;
- формализовать экспертные знания для цифровизации процессов разработки.

Несмотря на успешное использование ARM в фармацевтике и материаловедении, потенциал этих методов в области проектирования резиновых смесей остается недостаточно изученным. Современные алгоритмы ассоциативных правил демонстрируют значительные ограничения при обработке химико-технологических данных, особенно в контексте рецептур резиновых смесей, где ключевую роль играют не только частотные, но и количественные зависимости. В работах [12, 13] представлены алгоритмы ассоциативных правил, которые не

учитывают специфику химических данных и интерпретацию правил с учетом технологических ограничений. Алгоритм ProbBF, предложенный в работе [14], заменяет традиционное вычисление поддержки на вероятностные прогнозы, что является актуальным для фиксированных пропорций компонентов, однако это может привести к потере значимых комбинаций. Потенциалом для оптимизации рецептур обладают эволюционные методы [15], но они требуют адаптации к химической терминологии. В существующих работах преобладают узконаправленные исследования, фокусирующиеся на отдельных классах материалов, тогда как комплексный анализ кросс-ингредиентных взаимодействий в многокомпонентных системах требует дальнейшего развития.

Цель данной работы – исследовать методологию применения алгоритмов поиска ассоциативных правил для оптимизации рецептур резиновых смесей через выявление устойчивых комбинаций и синергетических эффектов.

**1. Методы исследований.** В выполненном исследовании осуществляется анализ технологических процессов на основе методов интеллектуального анализа данных (Data Mining) с применением алгоритма Apriori для выявления ассоциативных правил во взаимосвязях ингредиентов, входящих в состав резиновых смесей.

Методологическая основа исследования базируется на выявлении частых наборов ингредиентов и последующей генерации ассоциативных правил, позволяющих установить значимые взаимосвязи между ингредиентами резиновых смесей. Введем следующие обозначения:

- $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ – конечное множество из $n$ уникальных ингредиентов, используемых при производстве резиновых смесей (натуральные/синтетические каучуки, вулканизирующие агенты, наполнители, пластификаторы, антиоксиданты и др.);
- $D = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ – конечное множество рецептур (база данных), где каждая рецептура $R_k \in D$ представляет собой подмножество ингредиентов $R_k \subseteq I$, $|R_k| \geq 1$.

Для алгоритмической обработки каждая рецептура резиновой смеси $R_k \in D$ кодируется бинарным вектором длины n для всех $j = 1, \dots, n$:

$$R_k \to r \in \{0,1\}^n,$$

где $r[j] = 1$, если ингредиент $i_j \in R$; $r[j] = 0$, если ингредиент $i_j \notin R$.

Ассоциативным правилом называется импликация вида:

$$X \Rightarrow Y,$$

Удовлетворяющая условиям: $X \subset I$ – антецедент (условие); $Y \subset I$ – консеквент (следствие); $X \neq \emptyset, Y \neq \emptyset, X \cap Y = \emptyset$.

Семантика ассоциативного правила выражает вероятностную зависимость: наличие в рецептуре всех ингредиентов антецедента $X$ предполагает наличие ингредиентов консеквента $Y$ с вероятностью, равной достоверности правила $confidence(X \Rightarrow Y)$.

Рассмотрим метрики значимости ассоциативных правил для анализа рецептур резиновых смесей.

Для заданного набора ингредиентов $X \subseteq I$ поддержка $support(X)$ – это доля рецептур $R_k$ в базе данных $D$, которые содержат все ингредиенты из $X$:

$$support(X) = \frac{|\{R_k | R_k \in D, X \subseteq R_k\}|}{|D|}.$$

Набор ингредиентов $X \subseteq I$ называется частым при минимальном уровне поддержки $support_{min}$, если $support(X) \geq support_{min}$.

Поддержка ассоциативного правила $X \Rightarrow Y$ показывает частоту совместного использования комбинации ингредиентов в рецептурах резиновых смесей:

$$support(X \Rightarrow Y) = support(X \cup Y) = \frac{|\{R_k | R_k \in D, X \cup Y \subseteq R_k\}|}{|D|}.$$

Достоверность ассоциативного правила $X \Rightarrow Y$ определяет вероятность включения ингредиентов $Y$ в рецептуру резиновой смеси при наличии в ней ингредиентов $X$ и показывает технологическую зависимость:

$$confidence(X \Rightarrow Y) = \frac{support(X \cup Y)}{support(X)}, \text{ где } support(X) > 0.$$

Лифт ассоциативного правила $X \Rightarrow Y$ количественно характеризует степень ассоциативной связи между антецедентом $X$ и консеквентом $Y$. Данная метрика определяется, как отношение наблюдаемой частоты совместного появления ингредиентов к ожидаемой частоте при условии их статистической независимости:

$$lift(X \Rightarrow Y) = \frac{support(X \cup Y)}{support(X) \cdot support(Y)} = \frac{confidence(X \Rightarrow Y)}{support(Y)}.$$

Применение ассоциативных правил с анализом указанных метрик представляет собой эффективный инструмент для управления рецептурами резиновых смесей на основе данных.

Высокие значения поддержки $support(X \Rightarrow Y)$ указывают на типовые комбинации компонентов (например, совместное использование оксида цинка и серы в 66,27 % рецептур).

Анализ метрики $support(X \Rightarrow Y)$ позволяет выявлять статистически значимые комбинации ингредиентов, где высокие значения поддержки указывают на технологически обоснованные и широко применяемые компонентные сочетания, характерные для отрасли, что позволяет:

- идентифицировать стандартные/типовые комбинации ингредиентов (например, базовые системы вулканизации);
- отсеивать редкие и нетипичные сочетания, потенциально ведущие к нестабильности свойств;
- формировать исходные рецептурные шаблоны при разработке новых составов;
- проводить сравнительный анализ технологических традиций разных производителей.

Достоверность $confidence(X \Rightarrow Y)$ показывает технологическую зависимость: $confidence = 0.9185$ для правила (Сера, Стеарин технический) ⇒ (Оксид цинка)) означает, что в 91,85% рецептур с серой и стеарином присутствует оксид цинка. Данная метрика количественно определяет надежность технологических зависимостей между ингредиентами, позволяя выделять устойчивые причинно-следственные связи в составе рецептур – высокие значения достоверности ($confidence > 0.8$) свидетельствуют о стабильных комбинациях ингредиентов, которые следует учитывать при модификации составов, тогда как низкие значения ($confidence < 0.3$) указывают на случайные или слабые взаимосвязи, не имеющие практической значимости для технологического процесса.

Лифт $lift(X \Rightarrow Y)$ представляет собой количественную меру технологической синергии между ингредиентами состава. Ее значения интерпретируются следующим образом:

- $lift > 1$ (положительная корреляция): указывает на синергетическое взаимодействие ингредиентов;
- $lift \approx 1$ (нейтральная связь): ингредиенты используются независимо друг от друга;
- $lift < 1$ (отрицательная корреляция): свидетельствует о технологической несовместимости ингредиентов.

Анализ метрики $lift(X \Rightarrow Y)$ позволяет оптимизировать составы резиновых смесей путем сохранения проверенных синергетических комбинаций ($lift > 1.5$) и исключения технологически несовместимых пар компонентов ($lift < 0.5$).

На рис. 1 представлена UML-диаграмма последовательности, иллюстрирующая процесс извлечения ассоциативных правил. Диаграмма отражает поэтапное взаимодействие между компонентами системы, включая:

- извлечение данных из базы рецептур резиновых смесей,
- трансформацию в бинарный формат,
- применение алгоритма Apriori для идентификации частых наборов,
- генерацию ассоциативных правил с заданными метриками поддержки (support) и достоверности (confidence).

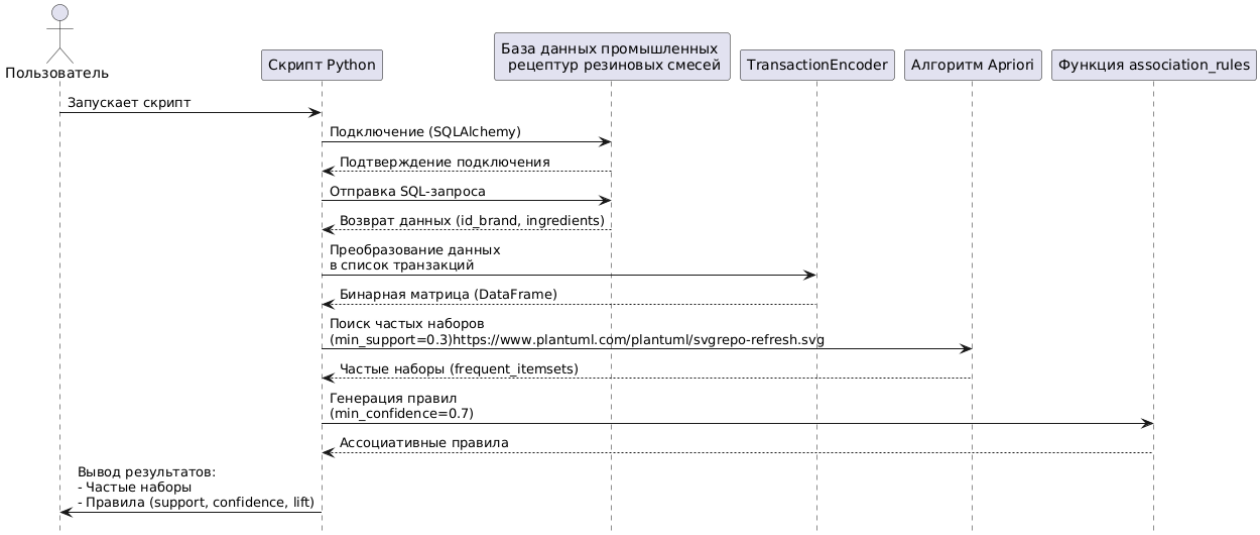



**Рис. 1.** UML-диаграмма последовательности для процесса поиска ассоциативных правил

Визуализация позволяет проследить логическую последовательность операций, начиная с инициализации процесса пользователем и заканчивая выводом статистически значимых паттернов, что соответствует методологии поиска ассоциативных правил.

В качестве исходных данных в исследовании применялась база данных промышленных рецептур резиновых смесей, охватывающая период с 1989 года по настоящее время. База включает информацию о составе, ингредиентах и свойствах резиновых смесей (с учетом технических синонимов [16, 17], содержащая в общей сложности 5065 уникальных рецептур (рис. 2).

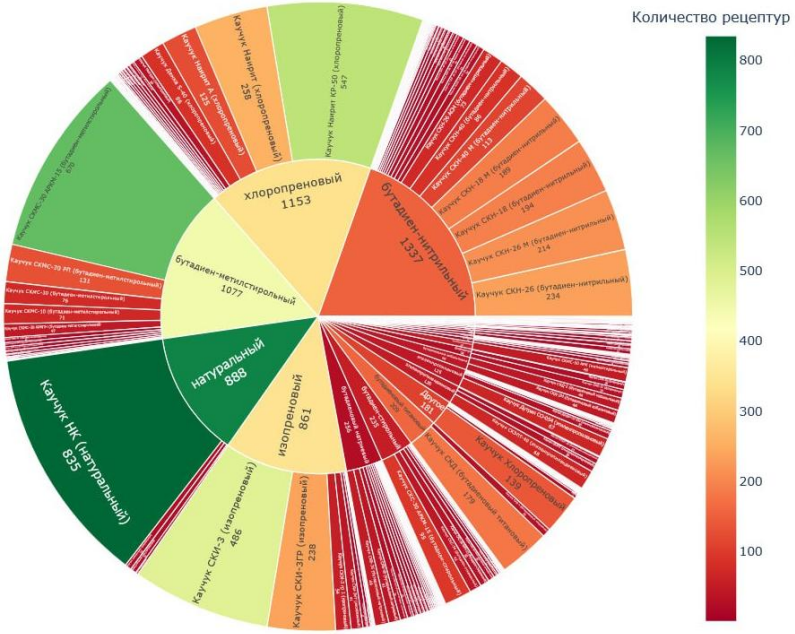



**Рис. 2.** Иерархическое распределение видов каучука в базе данных

Анализ иерархического распределения видов каучука в рецептурах резиновых смесей БД, представленный на рис. 2, показывает, что хлоропреновый каучук лидирует с 1153 рецептурами, за ним следует натуральный каучук с 888 рецептурами, что свидетельствует об их универсальности и широком применении в различных отраслях. В то же время такие виды, как бутиловый и стирол-бутадиеновый каучук, имеют значительно меньше рецептур, что может указывать на узкую область применения.

Фрагмент логической схемы базы данных, содержащей данные о составе рецептов резиновых смесей, на основе которых была сформирована выборка исходных данных для поиска ассоциативных правил, представлен на рис. 3.

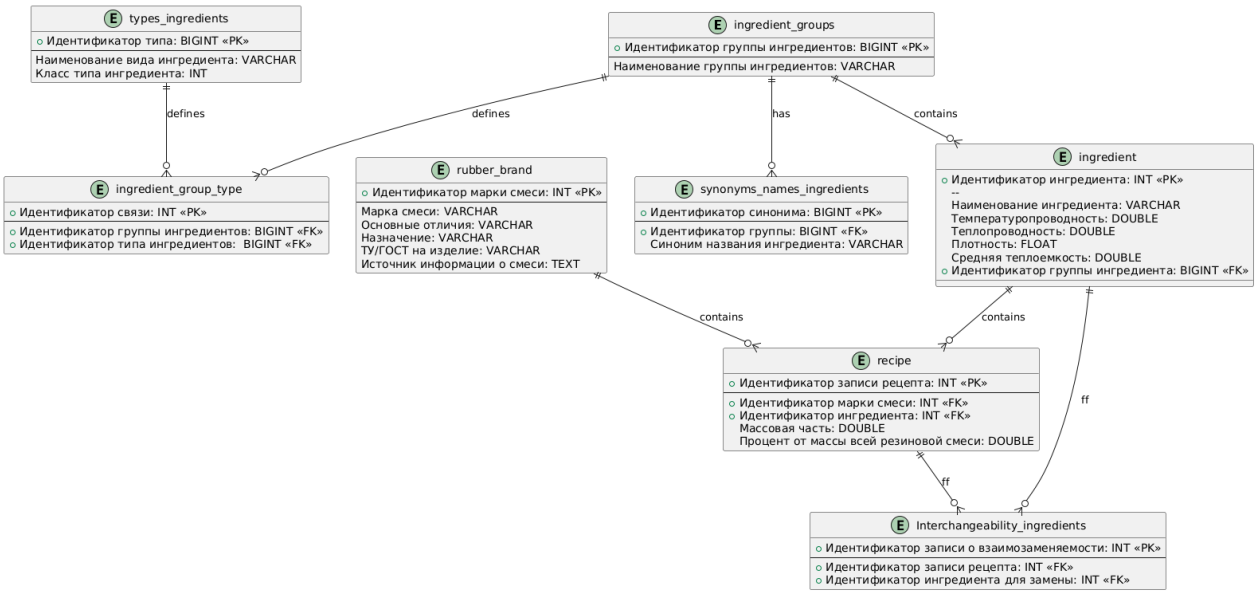



**Рис. 3.** Фрагмент логической схемы БД с исходными данными по составу рецептов резиновых смесей

Особенностью базы данных является наличие справочников технических синонимов ингредиентов и свойств резиновых смесей, которые упрощают поиск информации и позволяют применять методы машинного обучения для анализа данных

**2. Результаты исследований.** В рамках проведенного исследования осуществлен анализ 5065 рецептур резиновых смесей с применением методов ассоциативного rule mining для выявления устойчивых взаимосвязей между ингредиентами. Использование алгоритма Apriori позволило идентифицировать частые наборы компонентов и установить статистически значимые ассоциативные правила. Результаты анализа количественно оценены с использованием метрик поддержки (support), достоверности (confidence) и лифта (lift), характеризующих силу и значимость выявленных ассоциаций.

В таблице 1 представлены наиболее распространенные комбинации ингредиентов, ранжированные по уровню поддержки. Анализ данных показал, что наибольшую частоту встречаемости среди одиночных компонентов демонстрируют *оксид цинка* ($support = 0.851$) и *сера* ($support = 0.758$), что свидетельствует об их ключевой роли в составе резиновых смесей.

Также выявлены устойчивые парные и тройные комбинации, такие, как:

1) *оксид цинка* + *сера* ($support = 0.663$),

2) *оксид цинка* + *технический углерод П-803* ($support = 0.369$),

3) *оксид цинка* + *сера* + *стеарин технический* ($support = 0.319$).

**Таблица 1.** Частые наборы ингредиентов с уровнем поддержки

| № | **Наборы ингредиентов (itemsets)** | **Поддержка (support)** |
|---|---|---|
| 1 | Нафтам-2 | 0.372088 |
| 2 | (Тиурам Д) | 0.305771 |
| 3 | (Технический углерод П-803) | 0.415950 |
| 4 | (Стеарин технический) | 0.437566 |
| 5 | (Мел) | 0.338720 |
| 6 | (Сера) | 0.757817 |
| 7 | (Оксид цинка) | 0.851417 |
| 8 | (Оксид цинка, Нафтам-2) | 0.350052 |
| 9 | (Сера, Технический углерод П-803) | 0.324869 |
| 10 | (Оксид цинка, Технический углерод П-803) | 0.368730 |
| 11 | (Сера, Стеарин технический) | 0.347534 |
| 12 | (Оксид цинка, Стеарин технический) | 0.393704 |
| 13 | (Мел, Оксид цинка) | 0.306401 |
| 14 | (Оксид цинка, Сера) | 0.662749 |
| 15 | (Оксид цинка, Сера, Стеарин технический) | 0.319203 |

Наличие данных сочетаний подтверждает существование стандартизированных подходов к составлению рецептур, где определенные ингредиенты систематически комбинируются для достижения заданных технологических свойств.

В таблице 2 приведены наиболее значимые ассоциативные правила, отобранные на основе комбинации метрик $confidence$ и $lift$. Правила с $lift > 1$ указывают на положительную корреляцию между компонентами, при этом значения $lift > 1.05$ свидетельствуют о статистически значимых ассоциациях.

**Таблица 2.** Ассоциативные правила с показателями достоверности и лифта

| № | **Причина (antecedents)** | **Следствие (consequents)** | **Поддержка (support)** | **Достоверность (confidence)** | **Лифт (lift)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (Нафтам-2) | (Оксид цинка) | 0.350052 | 0.940778 | 1.104957 |
| 2 | (Технический углерод П-803) | (Сера) | 0.324869 | 0.781029 | 1.030630 |
| 3 | (Технический углерод П-803) | (Оксид цинка) | 0.368730 | 0.886478 | 1.041180 |
| 4 | (Стеарин технический) | (Сера) | 0.347534 | 0.794245 | 1.048069 |
| 5 | (Стеарин технический) | (Оксид цинка) | 0.393704 | 0.899760 | 1.056780 |
| 6 | (Мел) | (Оксид цинка) | 0.306401 | 0.904585 | 1.062447 |
| 7 | (Оксид цинка) | (Сера) | 0.662749 | 0.778408 | 1.027170 |
| 8 | (Сера) | (Оксид цинка) | 0.662749 | 0.874550 | 1.027170 |
| 9 | (Оксид цинка, Стеарин технический) | (Сера) | 0.319203 | 0.810768 | 1.069872 |
| 10 | (Сера, Стеарин технический) | (Оксид цинка) | 0.319203 | 0.918478 | 1.078765 |
| 11 | (Стеарин технический) | (Оксид цинка, Сера) | 0.319203 | 0.729496 | 1.100713 |

Наибольшую прогностическую силу демонстрируют следующие правила:

1) *Стеарин технический* $\Rightarrow$ *Оксид цинка* ($confidence = 0.9,\ lift = 1.057$) – наличие стеарина в составе с высокой вероятностью предполагает использование оксида цинка.

2) *Мел* ⇒ *Оксид цинка* ($confidence = 0.905$, $lift = 1.062$) – сочетание мела с оксидом цинка встречается чаще, чем можно было бы ожидать при случайном распределении.

3) *Оксид цинка* + *Стеарин технический* ⇒ *Сера* ($confidence = 0.811$, $lift = 1.07$) – данная тройная ассоциация указывает на устойчивую взаимосвязь между указанными компонентами.

На рис. 4 представлена визуализация найденных ассоциативных правил в виде графа.

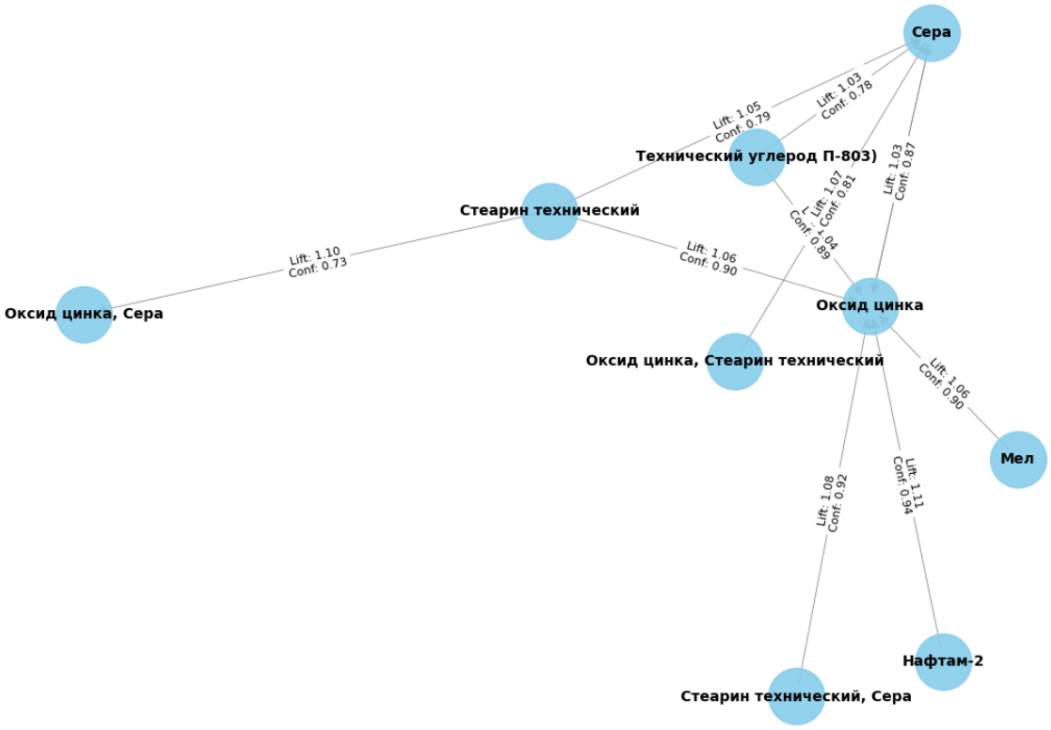



**Рис. 4.** Граф ассоциативных правил

Графовая структура ассоциативных правил представляет собой ориентированную сеть, узлы которой соответствуют компонентам рецептур резиновых смесей, а дуги отражают статистически значимые взаимосвязи между ними. Весовые коэффициенты связей ($lift$ и $confidence$) количественно характеризуют силу и достоверность выявленных ассоциаций между ингредиентами в составе композиций. Данная модель позволяет визуализировать и анализировать закономерности совместного использования компонентов при проектировании резиновых смесей.

**3. Обсуждение результатов исследования.** Проведенный анализ методами ассоциативного rule mining выявил статистически значимые взаимосвязи между компонентами резиновых смесей, что подтверждает гипотезу о существовании устойчивых комбинаций ингредиентов в промышленных рецептурах. Полученные результаты имеют важное значение как для фундаментального понимания принципов составления резиновых смесей, так и для практического применения в технологии производства резинотехнических изделий.

Интерпретация ключевых закономерностей:

– высокие значения поддержки для оксида цинка ($support = 0.851$) и серы ($support = 0.758$) согласуются с их общепризнанной функцией в процессах вулканизации; однако обнаруженная сильная ассоциация (рис. 5):

*оксид цинка* ⇒ *сера* (lift = 1.027)

и обратная зависимость

*сера* ⇒ *оксид цинка* (lift = 1.027)

указывают на их взаимодополняемость в рецептурах, что может быть связано с необходимостью балансировки активности вулканизующих систем;

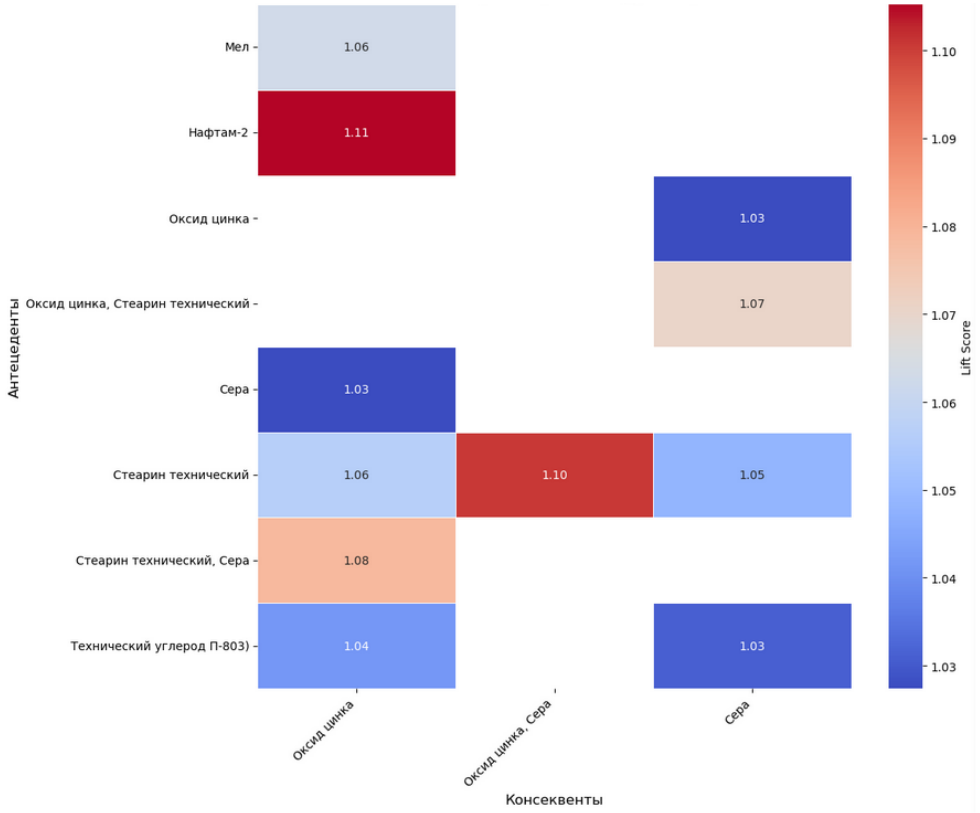



**Рис. 5.** Тепловая карта lift для наборов данных

– установлено, что стеарин технический ($support = 0.438$) часто сочетается как с оксидом цинка ($confidence = 0.9$, $lift = 1.057$), так и с серой ($confidence = 0.794$, $lift = 1.048$); это подтверждает его роль не только как пластификатора, но и как компонента, влияющего на кинетику вулканизации;
– ингредиент *мел* демонстрирует неожиданно высокую ассоциацию с *оксидом цинка* ($confidence = 0.905$, $lift = 1.062$), что может свидетельствовать о его участии в модификации свойств резиновых смесей за пределами традиционной функции наполнителя;
– выявленная взаимосвязь:

  оксид цинка + стеарин технический ⇒ сера ($lift = 1.07$)

  указывает на существование сложных синергетических эффектов, при которых комбинация активатора (ZnO) и пластификатора (стеарин) статистически значимо предопределяет наличие вулканизующего агента (серы); это может быть связано с оптимизацией рецептур для достижения определенных реологических или механических характеристик.

Можно выделить следующие оригинальные аспекты исследования:

1) обнаружено (рис. 6), что *нафтам-2*, несмотря на относительно низкую частоту встречаемости ($support = 0.372$), демонстрирует высокую предсказательную силу в отношении *оксида цинка* ($confidence = 0.941$, $lift = 1.105$); это позволяет предположить его специализированное применение в рецептурах с повышенными требованиями к активации вулканизации;

2) *технический углерод П-803* ($support = 0.416$) чаще сочетается с *оксидом цинка* ($confidence = 0.886$), чем с *серой* ($confidence = 0.781$), что может отражать его влияние

не только на усиление, но и на диспергирование активных ингредиентов в резиновой матрице (рис. 6).

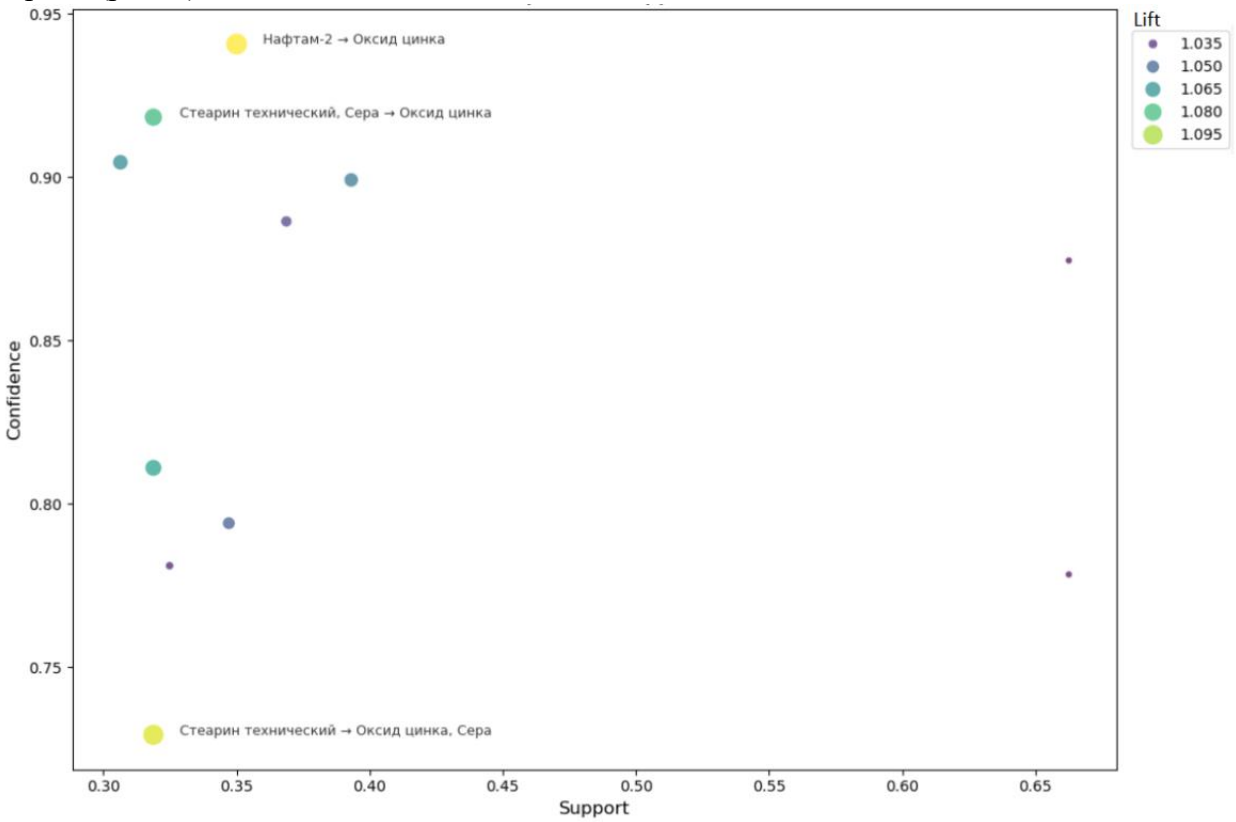



**Рис. 6.** Визуализация ассоциативных правил

Следует отметить следующие методологические ограничения: во-первых, выявленные закономерности носят специфический характер и привязаны к конкретной выборке рецептурных данных, что потенциально ограничивает их обобщаемость для различных производственных практик; во-вторых, анализ был сосредоточен исключительно на компонентном составе смесей без рассмотрения их эксплуатационно-технических характеристик, что создает определенные сложности в интерпретации взаимосвязей между составом и функциональными свойствами конечных резиновых изделий; в-третьих, хотя показатели $lift > 1$ демонстрируют статистическую значимость обнаруженных ассоциативных правил, их технологическая значимость, особенно для случаев с $lift < 1.1$, требует дополнительного экспериментального подтверждения для валидации практической применимости полученных результатов.

**Заключение.** Проведенное исследование демонстрирует эффективность методов ассоциативного анализа для выявления скрытых закономерностей в составе резиновых смесей. Полученные результаты имеют значительный потенциал для практического применения в резинотехнической промышленности, особенно в контексте цифровой трансформации производства. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную верификацию выявленных ассоциаций и разработку на их основе интеллектуальных систем поддержки принятия решений при проектировании новых рецептур. Таким образом, работа вносит вклад в цифровизацию проектирования резиновых смесей, предлагая инструмент для оптимизации состава на основе данных.

## Список источников

1. Нигматуллин, В. Р. Использование методов машинного обучения и искусственного интеллекта в химической технологии. Часть I / В. Р. Нигматуллин, Н. А. Руднев // Нефтегазовое дело, 2019. – № 4. – С. 243-268.

2. Каблов В.Ф. Эволюция информационных систем управления рецептурами резиновых смесей: от баз данных к интеллектуальным хранилищам с интеграцией модулей искусственного интеллекта / В.Ф. Каблов, А.А. Рыбанов, М.А. Маслова // Каучук и Резина-2025: Традиции и новации: материалы XIII Всерос. конф. – Москва, 2025. – С. 23-24.
3. Chinnasamy M., Rathanasamy R., Pal S.K. et al. Data Mining in Material Science. Application of Artificial Intelligence in New Materials Discovery, 2023, pp. 24-46, DOI: 10.21741/9781644902530-2.
4. Yu G., Chen J., Zhu L. Data Mining Techniques for Materials Informatics: Datasets Preparing and Applications. Proc. of the Int. Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM 2009), 2009, pp. 189-192, DOI: 10.1109/KAM.2009.98.
5. Rajan K., Rajagopalan A., Suh C. Data mining and multivariate analysis in materials science. Molten salts: from fundamentals to applications, Dordrecht, Springer, 2002, vol. 52, pp. 89-102, DOI: 10.1007/978-94-010-0458-9_8.
6. Пальмов С. В. Алгоритм поиска ассоциативных правил FP-growth / С.В. Пальмов, Е.Н. Французова // Национальная Ассоциация Ученых, 2016. – № 10-1 (26). – С. 27-28.
7. Зуенко А.А. Обзор методов поиска частых паттернов для интеллектуального анализа данных / А.А. Зуенко, О.В. Фридман // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки, 2024. – Т. 15. – № 3. – С. 82-96.
8. Графеева Н.Г. Реализация алгоритмов машинного обучения средствами реляционных СУБД / Н.Г. Графеева, А.А. Назаров // Компьютерные инструменты в образовании, 2024. – № 2. – С. 58-71.
9. Бурец А.С. Ассоциативные правила и алгоритмы их поиска / А.С. Бурец // Научные вести, 2019. – № 12 (17). – С. 86-96.
10. Suvalka B., Khandelwal S., Patel C. Revised ECLAT algorithm for frequent itemset mining. Proc. of the Int. Conf. on Advanced computing and communication technologies, 2016, pp. 211–220, DOI: 10.1007/978-81-322-2752-6_21.
11. Бова В.В. Оценка эффективности метода поиска ассоциативных правил для задач обработки больших данных / В.В. Бова, Э.В. Кулиев, С.Н. Щеглов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2020. – № 2 (212). – С. 66-78.
12. Цымблер М.Л. Параллельный поиск частых наборов на многоядерных ускорителях Intel MIC / М.Л. Цымблер // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2019. – Т. 8. – № 1. – С. 54–70. – DOI: 10.14529/cmse190104.
13. Sadeequllah M., Rauf A., Rehman S.U., Alnazzawi N. Probabilistic support prediction: fast frequent itemset mining in dense data. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 39330-39350, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3376477.
14. Telikani A., Gandomi A.H., Shahbahrami A.A. A survey of evolutionary computation for association rule mining. Information Sciences, 2020, vol. 524, pp. 318–352.
15. База данных рецептур, ингредиентов и свойств резиновых смесей с учетом технических синонимов: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2025621312 Рос. Федерация: № 2025620796: заявл. 12.03.2025: опубл. 24.03.2025 / В.Ф. Каблов, А.А. Рыбанов, НА. Кейбал, и др.; правообладатель ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
16. Каблов В.Ф. Автоматизированный банк данных нового поколения рецептур и свойств резин – “Раббер С” / В.Ф. Каблов, А.А. Рыбанов, Н.А. Кейбал // Каучук и резина, 2024. – Т. 83. – № 3. – С. 168-173.

***Рыбанов Александр Александрович.*** *Кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информатика и технология программирования», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградский государственный технический университет, заведующий кафедрой. AuthorID: 234968, SPIN: 9256-6050, ORCID: 0000-0002-8638-9998, rybanoff@yandex.ru. 404111, Россия, Волгоградская область, г. Волжский, пр-кт Ленина, 72.*

***Каблов Виктор Федорович.*** *Доктор технических наук, профессор, кафедра «Химическая технология полимеров и промышленная экология», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградский государственный технический университет, профессор. AuthorID: 115782, SPIN: 1093-9003, ORCID: 0000-0002-2970-6109, vkablov5@gmail.com. 404111, Россия, Волгоградская область, г. Волжский, пр-кт Ленина, 72.*

UDC 004.8+004.942
DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.015

# Application of association rule mining algorithms to identify technologically significant component combinations in rubber compound formulations

**Alexander A. Rybanov, Victor F. Kablov**

Volzhsky polytechnic institute (Branch) of Volgograd state technical university,
Russia, Volzhsky, *rybanoff@yandex.ru*

**Abstract.** The article presents the results of applying the Apriori association rule mining algorithm to analyze rubber compound formulations in order to identify technologically significant component combinations. A methodology based on data mining is proposed, which enables the automatic detection of stable ingredient combinations, reduces the search space for formulations, and formalizes expert knowledge. The study analyzed a database of 5065 industrial formulations using support, confidence, and lift metrics. Key associations between rubber compound ingredients were identified. The results demonstrate the potential of association analysis methods for optimizing formulations, reducing development time, and digitalizing rubber compound design.

**Keywords:** association rules, rubber compounds, ingredients, machine learning, data mining, database, significance metrics, confidence, support, lift, digitalization of materials science, pattern discovery

## References

1. Nigmatullin V.R., Rudnev N.A. Ispol'zovaniye metodov mashinnogo obucheniya i iskusstvennogo intellekta v khimicheskoy tekhnologii. Chast' I [The use of machine learning and artificial intelligence methods in chemical technology. Part I]. Neftegazovoye delo [Oil and Gas Business], 2019, no. 4, pp. 243-268.
2. Kablov V.F., Rybanov A.A., Maslova M.A. Evolyutsiya informatsionnykh sistem upravleniya retsepturami rezinovykh smesey: ot baz dannykh k intellektual'nym khranilishcham s integratsiyey moduley iskusstvennogo intellekta [Evolution of information systems for managing rubber compound recipes: from databases to intelligent warehouses with integrated AI modules]. Kauchuk i Rezina-2025: Traditsii i novatsii: materialy XIII Vseros. konf. [Rubber and Rubber-2025: Traditions and Innovations: Proceedings of the XIII All-Russian Conference]. Moscow, 2025, pp. 23-24.
3. Chinnasamy M., Rathanasamy R., Pal S.K. et al. Data Mining in Material Science. Application of Artificial Intelligence in New Materials Discovery, 2023, pp. 24-46, DOI: 10.21741/9781644902530-2.
4. Yu G., Chen J., Zhu L. Data Mining Techniques for Materials Informatics: Datasets Preparing and Applications. Proc. of the Int. Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM 2009), 2009, pp. 189-192, DOI: 10.1109/KAM.2009.98.
5. Rajan K., Rajagopalan A., Suh C. Data mining and multivariate analysis in materials science. Molten salts: from fundamentals to applications, Dordrecht, Springer, 2002, vol. 52, pp. 89-102, DOI: 10.1007/978-94-010-0458-9_8.
6. Palmov S.V., Frantsozova E.N. Algoritm poiska assotsiativnykh pravil FP-growth [FP-growth association rule mining algorithm]. Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh [National Association of Scientists], 2016, no. 10-1 (26), pp. 27–28.
7. Zuenko A.A., Fridman O.V. Obzor metodov poiska chastykh patternov dlya intellektual'nogo analiza dannykh [A review of frequent pattern mining methods for data mining]. Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskiye nauki [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences], 2024, vol. 15, no. 3, pp. 82–96.
8. Grafeeva N.G., Nazarov A.A. Realizatsiya algoritmov mashinnogo obucheniya sredstvami relyatsionnykh SUBD [Implementation of machine learning algorithms using relational DBMS]. Komp'yuternyye instrumenty v obrazovanii [Computer tools in education], 2024, no. 2, pp. 58-71.
9. Burets A.S. Assotsiativnyye pravila i algoritmy ikh poiska [Association rules and algorithms for their mining]. Nauchnyye vesti [Scientific News], 2019, no. 12 (17), pp. 86–96.
10. Suvalka B., Khandelwal S., Patel C. Revised ECLAT algorithm for frequent itemset mining. Proc. of the Int. Conf. on Advanced computing and communication technologies, 2016, pp. 211–220, DOI: 10.1007/978-81-322-2752-6_21
11. Bova V.V., Kuliev E.V., Shcheglov S.N. Otsenka effektivnosti metoda poiska assotsiativnykh pravil dlya zadach obrabotki bol'shikh dannykh [Efficiency evaluation of an association rule mining method for big data processing tasks]. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, no. 2 (212), pp. 66–78.

12. Tsymbler M.L. Parallel'nyy poisk chastykh naborov na mnogoyadernykh uskoritelyakh Intel MIC [Parallel frequent itemset mining on Intel MIC many-core accelerators]. Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering], 2019, vol. 8, no. 1, pp. 54-70, DOI: 10.14529/cmse190104.
13. Sadeequllah M., Rauf A., Rehman S.U., Alnazzawi N. Probabilistic support prediction: fast frequent itemset mining in dense data. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 39330-39350, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3376477.
14. Telikani A., Gandomi A.H., Shahbahrami A.A. A survey of evolutionary computation for association rule mining. Information Sciences, 2020, vol. 524, pp. 318–352.
15. Baza dannykh retseptur, ingredientov i svoystv rezinovykh smesey s uchetom tekhnicheskikh sinonimov [Database of recipes, ingredients and properties of rubber compounds, accounting for technical synonyms]: svidetel'stvo o gos. registratsii bazy dannykh no. 2025621312 Ros. Federatsiya: no. 2025620796: zayavl. 12.03.2025: opubl. 24.03.2025. V.F. Kablov, A.A. Rybanov, N.A. Keybal, et al.; pravoobladatel' VPI (filial) VolgGTU [Certificate of state registration of the database No. 2025621312 Russian Federation: No. 2025620796: appl. 12.03.2025: publ. 24.03.2025 / V.F. Kablov, A.A. Rybanov, N.A. Keybal, M.A. Maslova, D.A. Kryukova; right holder VPI (branch) of VolgSTU].
16. Kablov V.F., Rybanov A.A., Keybal N.A. Avtomatizirovannyy bank dannykh novogo pokoleniya retseptur i svoystv rezin – “Rabber S” [A new-generation automated databank for rubber recipes and properties - "Rubber S"]. Kauchuk i rezina [Rubber and Rubber], 2024, vol. 83, no. 3, pp. 168-173.

***Alexander Aleksandrovich Rybanov.*** *PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of "Informatics and Programming Technology", Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University. AuthorID: 234968, SPIN: 9256-6050, ORCID: 0000-0002-8638-9998, rybanoff@yandex.ru. 404111, Russia, Volgograd Region, Volzhsky, 72 Lenin Ave.*

***Victor Fedorovich Kablov.*** *Doctor in Engineering, Professor, Department of "Chemical Technology of Polymers and Industrial Ecology", Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University. AuthorID: 115782, SPIN: 1093-9003, ORCID: 0000-0002-2970-6109, vkablov5@gmail.com. 404111, Russia, Volgograd Region, Volzhsky, 72 Lenin Ave.*

*Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 02.08.2025.*

*The article was submitted 05/21/2025; approved after reviewing 05/27/2025; accepted for publication 08/02/2025.*