

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)
ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

Vol 15
2025
№3

Научный журнал - Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



приоритет2030⁺
лидерами становятся



Передовые
инженерные
школы



Ontology of Designing - Vol 15, No 3, 2025 - ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Scientific journal

Volume 15

№ 3

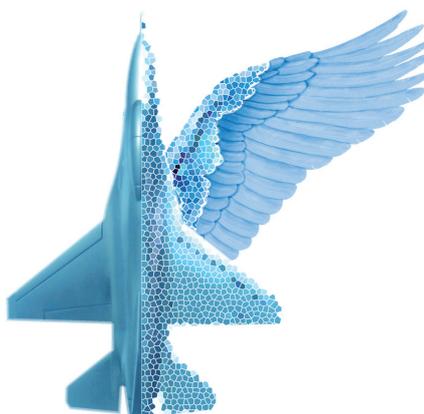
ОНТОЛОГИЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 15

№ 3



Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAQA, AAAl. Samara, Russia
 Stanislav N. **Vasiliev***, Doctor of Phys. and Math. Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Tatiana A. **Gavrilova***, Doctor of Technical Sciences, Professor, GSOM SPbU, St.-Petersburg, Russia
 Vladimir G. **Gainutdinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, KNITU-KAI, Kazan, Russia
 Vladimir V. **Golenkov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSUIR, Minsk, Belarus
 Vladimir I. **Gorodetsky***, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «EVRIKA», St. Petersburg, Russia
 Valeriya V. **Gribova***, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, IAPU of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia
 Yury A. **Zagorulko***, Ph.D., Senior Researcher, ISI of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia
 Valery A. **Komarov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Vladik **Kreinovich**, Ph.D., Professor, University of Texas at El Paso, El Paso, USA
 Venedikt S. **Kuzmichev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry V. **Lande***, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, IPRI NASU, Kiev, Ukraine
 Paulo **Leitao**, Professor at Polytechnic Institute of Bragança, Bragança, Portugal
 Vladimir **Marik**, Professor, Scientific Director of the CIIRC of the Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic
 Lyudmila V. **Massel***, Doctor of Technical Sciences, Professor, ISEM of the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia
 Aleksandr Yu. **Nesterov**, Doctor of Philosophy, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry A. **Novikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Alexander V. **Palagin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the NASU, Ins. of Cybernetics, Kiev, Ukraine
 Yury M. **Reznik**, Doctor of Philosophy, Professor, Institute of Philosophy of RAS, Moscow
 George **Rzevski**, Professor, Open University, London, UK
 Peter O. **Skobelev***, Doctor of Technical Sciences, SamSC of RAS, Samara, Russia
 Sergey V. **Smirnov***, Doctor of Technical Sciences, PSUTI, member of IAQA, Samara, Russia
 Dzhavdet S. **Suleymanov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the AS of the RT, Kazan, Russia
 Boris E. **Fedunov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
 Andrei A. **Cherepashkov***, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Technical University, Samara, Russia
 Altynbek **Sharipbay***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Astana, Kazakhstan

Боргест Николай Михайлович*, к.т.н., доцент, Самарский университет, член IAQA, AAAl. Самара, Россия
Васильев Станислав Николаевич*, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Гаврилова Татьяна Альбертовна*, д.т.н., профессор, ВШМ СПбУ, Санкт-Петербург, Россия
Гайнутдинов Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
Голенков Владимир Васильевич*, д.т.н., профессор, БГУИР, Минск, Беларусь
Городецкий Владимир Иванович*, д.т.н., профессор, АО «Эврика», Санкт-Петербург, Россия
Грибова Валерия Викторовна*, д.т.н., член-корреспондент РАН, г.н.с., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия
Загорюлько Юрий Алексеевич*, к.т.н., с.н.с., ИСИ СО РАН, Новосибирск, Россия
Комаров Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Креинович Владик, профессор, Техасский университет Эль Пасо, Эль Пасо, США
Кузьмичев Венедикт Степанович, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Ландэ Дмитрий Владимирович*, д.т.н., с.н.с., ИПРИ НАН Украины, Киев, Украина
Лейтао Пауло, профессор, Политехнический институт Браганса, Браганса, Португалия
Марик Владимир, профессор, научный директор ЧИИРК Чешского технического университета, Прага, Республика Чехия
Масель Людмила Васильевна*, д.т.н., профессор, ИСЭМ СО РАН, Иркутск, Россия
Нестеров Александр Юрьевич, д.филос.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Новиков Дмитрий Александрович, д.т.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Палагин Александр Васильевич, д.т.н., профессор, академик НАН Украины, Ин-т кибернетики, Киев, Украина
Резник Юрий Михайлович, д.филос.н., профессор, Институт философии РАН, Москва, Россия
Ржевский Георгий, профессор, Открытый университет, Лондон, Великобритания
Скобелев Петр Олегович*, д.т.н., СамНЦ РАН, Самара, Россия
Смирнов Сергей Викторович*, д.т.н., ПГУТИ, член IAQA, Самара, Россия
Сулейманов Джавдет Шевкетович*, д.т.н., профессор, академик АН РТ, Казань, Россия
Федунов Борис Евгеньевич*, д.т.н., профессор, ГосНИИ авиационных систем, Москва, Россия
Черепашков Андрей Александрович*, д.т.н., доцент, СамГТУ, Самара, Россия
Шарипбай Алтынбек*, д.т.н., профессор, Ин-т искусственного интеллекта, Астана, Казахстан

* - members of the Russian Association of Artificial Intelligence - члены Российской ассоциации искусственного интеллекта - http://www.raai.org/about/about.shtml?raai_list

Executive Editorial Board - Исполнительная редакция

Chief Editor **P.O. Skobelev** Samara, Russia
 Deputy Chief Editor **S.V. Smirnov** Samara, Russia
 Executive Editor **N.M. Borgest** Samara, Russia
 Editor **D.M. Kozlov** Samara, Russia
 Technical Editor **D.N. Borgest** Samara, Russia
 Executive Secretary **S.A. Vlasov** Samara, Russia

Главный редактор Скобелев П.О. СамНЦ РАН, Самара, Россия
 Зам. главного редактора Смирнов С.В. ПГУТИ, Самара, Россия
 Выпускающий редактор Боргест Н.М. Самарский университет, Самара, Россия
 Редактор Козлов Д.М. Самарский университет, Самара, Россия
 Технический редактор Боргест Д.Н. Самарский университет, Самара, Россия
 Ответственный секретарь Власов С.А. Самарский университет, Самара, Россия

The journal has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the EBSCOhost™ databases. The journal has been successfully evaluated in the evaluation procedure for the **ICI Journals Master List 2014-2019** and journal received the ICV (Index Copernicus Value).

Журнал размещён в коллекции «Издания по естественным наукам» на платформе **EastView**.

Журнал включён в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук (Перечень ВАК, категория **K1**) по научным специальностям 1.2.2., 2.3.1., 2.3.4., 2.3.5., 2.3.7., 2.3.8., 2.5.1., 2.5.13., 2.5.15., 5.12.4. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1,091** (2023).

Журнал включён в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе **Web of Science**, а также в «**Белый список**» научных журналов, утверждаемый Межведомственной рабочей группой, созданной Минобрнауки РФ.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-70157 от 16.06.2017 г. (ранее выданное свидетельство ПИ № ФС 77-46447 от 07.09.2011 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

«Ученые – свет, а неученые – тьма» 305-308

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Д.И. Лобач 309-323

Онтология дуализма безопасности технической системы

С.В. Микони 324-333

Формализация требований к показателям в задачах многомерного оценивания объектов

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

И.В. Котенко, Д.С. Левшун, К.Н. Жернова, А.А. Чечулин 334-350

Обнаружение аномальных транзакций криптовалюты с помощью нейронных сетей и онтологий

Д.С. Борисов, К.К. Симовин, Д.Р. Юкина, А.В. Благов, И.В. Чечет, С.Г. Матвеев 351-362

Применение методов машинного обучения при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей

М.С. Максимов, В.Н. Волкова 363-375

Развитие системы информационного обеспечения административного органа территориального управления

Е.К. Терешко, М.Р. Малашенко, Е.П. Середин 376-389

Цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

А.А. Зуенко 390-403

Метод поиска частых паттернов с учётом иерархий признаков

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Р.А. Бурнашев, Я.В. Сергеев, А.Ф. Назипова 404-417

Методы гранулирования нечётких временных рядов для анализа данных

Ф.М. Кирьяков, П.О. Скобелев 418-435

Мультиагентный метод повышения адаптивности управления вычислительными ресурсами в реальном времени

А.Г. Щербаков, Н.П. Садовникова, Д.С. Парыгин, Н.М. Рашевский, А.С. Гуртяков 436-448

Интеллектуальная поддержка анализа градостроительных проектов на основе онтологии

С.В. Доронин, Ю.Ф. Филиппова 449-458

Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла

Научные конференции 459-460

Журнал ориентирован на учёных и специалистов, работающих по научным направлениям: онтологические аспекты общих вопросов формализации проектирования, прикладные онтологии проектирования, инжиниринг онтологий, методы и технологии принятия решений.

Правила подготовки рукописей статей размещены на сайте журнала «Онтология проектирования»:

http://agora.guru.ru/scientific_journal/, а также на <https://www.ontology-of-designing.ru/>.

Контент журнала распространяется по лицензии CC-BY 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International License).



Контакты соучредителей

Самарский университет: 443086, Самара, Московское шоссе 34, корп. 10, тел.: +7 (846) 267 46 47. Боргест Н.М. borgest@yandex.ru.

СамНЦ РАН: 443001, Самара, Студенческий пер. 3а, тел.: +7 (846) 340 06 20. Соколов В.О. sokolov@ssc.smr.ru.

ООО «Новая техника» (издатель, редакция): 443010, Самара, ул. Фрунзе, 145, тел.: +7 (846) 332 67 84, +7 (846) 332 67 81.

CONTENTS

EDITORIAL

Knowledge is light, ignorance is darkness **305-308**

GENERAL ISSUES OF FORMALIZATION IN THE DESIGNING: ONTOLOGICAL ASPECTS AND COGNITIVE MODELING

D.J. Lobach **309-323**
An ontological model of the dual nature of safety in technical systems

S.V. Mikoni **324-333**
Formalization of indicator requirements in multidimensional evaluation of objects

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

I.V. Kotenko, D.S. Levshun, K.N. Zhernova, A.A. Chechulin **334-350**
Detection of anomalous cryptocurrency transactions using neural networks and ontologies

D.S. Borisov, K.K. Simovin, D.R. Yukina, A.V. Blagov, I.V. Chechet, S.G. Matveev **351-362**
Application of machine learning methods in designing combustion chambers of gas turbine engines

M.S. Maksimov, V.N. Volkova **363-375**
Development of the information support system for a territorial administration body

E.K. Tereshko, M.R. Malashenko, E.P. Seredin **376-389**
Digital transformation of industrial facility processes of oil and gas field

ONTOLOGY ENGINEERING

A.A. Zuenko **390-403**
A method for mining frequent patterns considering feature hierarchies

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

R.A. Burnashev, Y.V. Sergeev, A.F. Nazipova **404-417**
Fuzzy time series granulation methods for data analysis

F.M. Kiriakov, P.O. Skobelev **418-435**
Multi-agent method to improving adaptive real-time management of computing resources

A.G. Shcherbakov, N.P. Sadovnikova, D.S. Parygin, N.M. Rashevskiy, A.S. Gurtyakov **436-448**
Intelligent support for the analysis of urban development projects based on ontology

S.V. Doronin, Yu. F. Filippova **449-458**
Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle

Scientific conferences **459-460**

The journal is aimed at scientists and specialists working in the following research areas: ontological aspects of general issues of design formalization, applied design ontologies, ontology engineering, methods and technologies of decision making.

The current version of the Rules for the preparation of manuscripts of articles for the journal «Ontology of Designing» is on the journal website:



http://agora.guru.ru/scientific_journal/, and <https://www.ontology-of-designing.ru/>.

The content of the scientific journal is distributed under a license **CC-BY 4.0**

(Creative Commons Attribution 4.0 International License)

Contacts of the co-founders

Samara University: 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia. Tel.: +7 (846) 267 46 47, N.M. Borgest, borgest@yandex.ru

Samara Scientific Center of the RAS: 3a, Studenchesky per., Samara, 443001, Russia. Tel.: +7 (846) 340 06 20. V.O. Sokolov, sokolov@ssc.smr.ru.

New Engineering LLC (publishing house, editorial office): 145, Frunze st., Samara, 443010, Russia. Tel.: +7 (846) 332 67 84, +7 (846) 332 67 81



ОТ РЕДАКЦИИ

**«Ученье – свет, а неученье – тьма»
Knowledge is light, ignorance is darkness**

«Ученье – свет, а неученье – тьма...»
А.В. Суворов¹

«... во многой мудрости много печали; и кто
умножает познания, умножает скорбь»
Екклезиаст. Глава 1, стих 18

**Дорогой наш читатель,
уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!**

Начать своё обращение хотелось бы с темы, которая активно обсуждалась на международной научной конференции «Физика и Философия – 2025»² 30–31 мая 2025 г. в Москве. Конференция была организована Национальным исследовательским ядерным университетом (НИЯУ) «МИФИ», Российским национальным комитетом по истории и философии науки и техники РАН, Институтом истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН при поддержке Научного совета по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований при Президиуме РАН и Отечественного Ядерного общества.

Ровесник Самарского университета НИЯУ МИФИ был создан во время Великой Отечественной войны в 1942 году. Космические исследования Самарского университета и ядерные технологии МИФИ не могли не обратить внимание на связь познания Вселенной, бесконечной глубины атома, зарождающегося искусственного интеллекта (ИИ) и место в этом мире человека. И здесь философский обобщающий взгляд на накапливаемые знания, как и прежде, востребован.

Ректор МИФИ д.ф.-м.н. *Шевченко Владимир Игоревич* (на фото с журналом) своим пленарным докладом задал вектор и настроил аудиторию на конструктивный диалог и дискуссию, проявив интерес к научному журналу «Онтология проектирования». Онтология проектирования как пример интеграции естественнонаучных и гуманитарных знаний³ продолжает строить мосты между гуманитариями и инженерами⁴, активно вовлекая в дискуссию специалистов из этих разбегающихся сфер человеческих знаний о мире реальном и искусственном⁵.



В.И. Шевченко

В онтологии как модели мира, состоящей из бесконечного множества моделей предметных областей, большое значение имеет учёт эволюции этих моделей и, в частности, направления ожидаемых изменений. Изменения в онтологии связаны с появлением и добавлением новых понятий, изменением толкования понятий, изменением структуры и весов связей. Существенный результат этих изменений — изменение структуры категорий, выделяемых в онтологии, образование новых предметных областей. И здесь известное выражение, припи-

¹ Александр Васильевич Суворов. Наука побеждать. (Великие полководцы мира). М.: Эксмо, 2011. 480 с.

² Международная научная конференция «Физика и Философия – 2025» (к 70-летию Гиффордских лекций Вернера Гейзенберга). <https://physics-philosophy.mephi.ru/>.

³ Онтология проектирования как пример интеграции естественнонаучных и гуманитарных знаний. <https://ssau.ru/news/24435-ontologiya-proektirovaniya-kak-primer-integratsii-estestvennonauchnykh-i-gumanitarnykh-znaniy>.

⁴ От редакции. Дезинтеграция постоянства памяти. *Онтология проектирования*. 2025. Том 15. №2(56). С.157-162.

⁵ Дискуссия. Разбор понятий. *Онтология проектирования*. 2025. Том 15. №2(56). С.295-300.

сываемое великому русскому полководцу Александру Васильевичу Суворову, – прекрасная аналогия того, что даёт нам знание, знание о мире, о предметных областях, о процессах, в них происходящих. Именно знания, добываемые искусными технологиями, освещают путь, по которому идёт цивилизация.

В отличие от прошедшей в МИФИ первой междисциплинарной конференции, в Санкт-Петербурге с 30 июня по 2 июля 2025 года состоялась уже **XXIX** Международная научно-практическая конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» на площадке Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого⁶. На пленарной сессии и на секциях обсуждались онтологические и понятийные аспекты, в том числе применительно к созданию информационных систем и систем с ИИ. Практически каждый доклад начинался с понятийного разбора используемых терминов.



В.Н. Волкова



Г.Г. Малинецкий

Содержательными были доклады член-корреспондента РАН Г.Б. Клейнера (Москва), академика РАО М.А. Боровской (Ростов-на-Дону), профессоров В.Н. Волковой (сопредседателя этой конференции), С.Н. Микони и др. Отмеченные здесь как докладчики, уважаемые профессора из Санкт-Петербурга проявили себя и на страницах нашего журнала, опубликовав статьи в этом номере.

Стоит выделить яркое выступление д.ф.-м.н., действительного члена Академии военных наук Г.Г. Малинецкого на актуальную для России тему «Системный анализ и развитие систем вооружения». Проведённый автором критический анализ современного состояния имеющихся средств и способов ведения противоборств с очевидностью указывает на важность системного анализа и ИИ как основных направлений развития этих средств и способов. Ещё более очевидным проявился приоритет науки в постиндустриальном обществе, где главным является человек. Отсюда и потребность в междисциплинарных исследованиях, в знаниях, которые позволят сохранить нашу цивилизацию для потомков (если, конечно, эти знания дойдут до амбициозных и недоговороспособных элит, воющих друг с другом и игнорирующих цивилизационный запрос на устойчивое развитие).

Но на планете из живых существ мы не первые, кто активно взялся за саморазрушение. Насекомые, которые по «уровню приспособленности, интеллекту, наряду с млекопитающими, представляют собой одну из вершин мироздания»⁷, обладают свойством ориентироваться и двигаться по направлению к источнику света (положительный *фототаксис*), лишая себя при этом жизни. Свет для насекомых несёт сигнальную функцию, которая была выработана долгой эволюцией в той среде, где появились эти существа.

Источники света в природе – Солнце, Луна, дающая тот же солнечный свет, а также свет звёзд. Жизнь насекомого адаптирована к естественным источникам света, интенсивность излучения которых на земной поверхности регулярно и закономерно изменяется. Насекомые не смогли приспособиться к таким редким и нерегулярным источникам света как лесные пожары. Тем более большинство видов насекомых не смогло адаптироваться к искусственным источникам света. Летящее насекомое, увидев лампу, поворачивает к ней и приближается, как будто притягиваемое магнитом. Поблизости от источника света у насекомого часто резко нарушаются ориентация и координация движений, и насекомое может погибнуть, влетев в огонь.

Реакции насекомых на свет имеют приспособительное значение. Реагируя на свет, отыскивая место с определённым уровнем освещённости, насекомое находит наиболее благоприятное для себя сочетание условий. Свет является универсальным и наиболее надёжным индикатором открытого пространства, куда устремляется насекомое и не только оно. Например, птицы в массе иногда прилетают во время их сезонных миграций на свет маяков. Рыбу–сайру вылавливают сетями, привлекая её с помощью мощных источников света. Следовательно – это *общебиологическое явление*.⁷

⁶ Системный анализ, ИИ и большие данные: итоги научной конференции в СПбПУ. 9 Июля 2025.

https://www.spbstu.ru/media/news/studencheskaya_zhizn/sistemnyy-analiz-ii-i-bolshie-dannye-itogi-nauchnoy-konferentsii-v-spbpu/

⁷ Чернышев В.Б. Экология насекомых. Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1996. 304 с.

Человек в ранний период своего существования смог понять ценность новых знаний, которые позволяли ему совершенствовать своё жилище, свой быт, лечить, осваивать новые земные, водные, а затем воздушные и космические пространства, проектировать и строить артефакты. В силу заложенной природой межвидовой конкуренции живого мира знания помогли человеку стать её венцом, а внутривидовая конкуренция на ранних этапах развития была хоть и жестокая, но имеющиеся у человека знания и технологии не позволяли ему нанести ущерб, который бы смог разрушить цивилизацию.

Во время своей активности насекомое предпочитает более высокий уровень освещённости, чем во время покоя. Так же и Человек, тянущийся к новым знаниям, к покорению новых вершин в науке, становится более активным и в то же время разрушительным.

Как любое, созданное долгой эволюцией существо, человек также не способен быстро адаптироваться, перестроиться к новым условиям и тем технологическим возможностям, которые значительно опережают его социальное, личностное и психологическое развитие. Освоить новые технологии, получив или добыв необходимые знания, не означает изменить природу меж- и внутривидовой борьбы⁸, которая включает: заложенные эволюцией эгоцентричность и амбиции; стремление к захвату и обладанию любых доступных в пределах имеющихся технологических возможностей ресурсов.

Как в докладе Г.Г. Малинецкого, так и выступлениях других авторов на отмеченных здесь конференциях, в многочисленных публикациях^{9,10}, в т.ч. и в нашем журнале¹¹, включая работы ушедшего от нас профессора В.А. Виттиха^{12,13}, остро ставится вопрос о проблемах управления, организации и образования общества, о неразрешимости амбивалентности, как имманентной характеристики деятельности «нормального»⁸ учёного. Все публикации лишь констатируют присутствие признаков летящей на свет цивилизации, но практический механизм разворота цивилизации, накопившей знания, которые могут быть задействованы для саморазрушения, разбивается о волны природы человека, *сложившейся системы организации, управления и образования общества*. Поэтому так своевременны старания организаторов научных конференций пролить свет на междисциплинарные проблемы, на включённость человека со всеми его свойствами. Где «человек рассматривается в ней не как «винтик» ценностно-инвариантного управленческого механизма, а как личность (актор), наделённая сознанием, действующая рационально и выполняющая познавательно-деятельностные функции вместе с другими людьми по урегулированию проблемных ситуаций, возникающих в повседневной жизни»¹².

Проблемы, которые активно обсуждались на конференциях, – это попытка сблизить языки разных наук и дисциплин в них для взаимопонимания и взаимопроникновения знаний.

Добыча знаний — это область исследований в таких дисциплинах, как обработка естественного языка, добыча данных и машинное обучение¹⁴. Общей целью извлечения знаний из источника данных является создание структурированного представления, которое позволяет исследователям лучше понимать такие данные и работать с ними для создания приложений. Междисциплинарный подход позволит создать новые мосты между областями для дальнейшего продвижения задачи извлечения знаний.

Ещё пару десятилетий назад считалось, что при построении онтологии инженерной проектной деятельности нет общего понимания действий в процессе проектирования, чёткой классификации проектных работ и со-

⁸ От редакции. Война и мир: онтологические основания. *Онтология проектирования*, №1, том 12, 2022. С.5-10.

⁹ Касавин И.Т. Амбивалентность научного этоса непреодолима. *Высшее образование в России*. 2021. №4. С.36-48. DOI: 10.31992/0869-3617-2021-30-4-36-48.

¹⁰ Савченко И.А. Системные дихотомии современного этоса науки (к 115-летию Роберта Мертона). *Социология науки и технологий*. 2025. Т.16. №1. С.74-90. DOI: 10.24412/2079-0910-2025-1-74-90.

¹¹ От редакции. «COME ON!» Вперёд, в будущее! *Онтология проектирования*, том 8, №1(27)/2018. С.5-7.

¹² Виттих В.А. Понятие интерсубъективности в эвергетике. *Онтология проектирования*. 4(14)/2014. С.90-95.

¹³ Vitikh V.A. Prolegomena to Evergetics. *Онтология проектирования*, том 5, №2(16)/2015. С.135-148.

¹⁴ Rui Y., Carmona V.I.S., Pourvali M., Xing Y., Yi W.W., Ruan H.B., Zhang Y. Knowledge mining: a cross-disciplinary survey. *Machine Intelligence Research*/ 2022. Vol.19, No.2. P.89–114. DOI: 10.1007/s11633-022-1323-6.

гласованных определений этой деятельности, её оценки и управления¹⁵. Однако стремление найти решение, в том числе, на основе графов знаний, неявного повторного использования знаний при проектировании продолжается¹⁶, и наш журнал тоже вносит посильный вклад в этом направлении.



В конце этого номера журнала приведена информация о предстоящих научных конференциях, посвящённых исследованию проблем в области формализации знаний и ИИ. Здесь же предлагается обратить внимание нашего читателя на свежие научно-технические отчёты (их обложки слева). Это Отчёт о конвергенции технологий, подготовленный Всемирным экономическим форумом¹⁷, и Отчёт о будущем ИИ, подготовленный Ассоциацией по развитию искусственного интеллекта (*Association for the Advancement of Artificial Intelligence, AAAI*)¹⁸.

Вот лишь некоторые важные выводы из отчёта по ИИ: исследования в области ИИ становятся всё более актуальными; достоверность и надёжность ИИ являются важными темами исследований; агенты ИИ изучаются и используются в различных областях; этика и безопасность ИИ становятся центральными темами конференций по ИИ; взаимосвязь между ИИ и когнитивными науками становится всё более заметной; аппаратное обеспечение и ИИ играют важную роль в развитии исследований и приложений; ИИ используется для общественного блага и устойчивого развития; исследования в области ИИ направлены на создание общего ИИ; разнообразие подходов к исследованию ИИ и их влияние на общество становятся все более заметными; идёт развитие агентного ИИ и мультиагентных систем от автономных объектов к совместному ИИ; теория игр становится доминирующей теоретической основой мультиагентных систем.

Завершить наше обращение в этом номере хотелось бы, солидаризовавшись со словами В.В. Маяковского: «*Светить всегда, светить везде*, до дней последних донца, светить – и никаких гвоздей! *Вот лозунг мой – и солнца!*»¹⁹.

К этому призыву присоединяется и редакция нашего журнала.

В номере

В разделе «*Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование*» рассмотрены: онтология дуализма безопасности технической системы (**Минск**); формализация требований к показателям в задачах многомерного оценивания объектов (**Санкт-Петербург**).

В разделе «*Прикладные онтологии проектирования*» рассмотрены: методы обнаружения аномальных транзакций криптовалюты с помощью нейронных сетей и онтологий (**Санкт-Петербург**); методы машинного обучения при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей (**Самара**); системы информационного обеспечения административного органа территориального управления (**Санкт-Петербург**); цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения (**Санкт-Петербург**).

В разделе «*Инжиниринг онтологий*» рассмотрен метод поиска частых паттернов с учётом иерархий признаков (**Апатиты**).

В разделе «*Методы и технологии принятия решений*» рассмотрены: методы гранулирования нечётких временных рядов для анализа данных (**Казань**); мультиагентный метод повышения адаптивности управления вычислительными ресурсами в реальном времени (**Самара**); интеллектуальная поддержка анализа градоостроительных проектов на основе онтологии (**Волгоград**); цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла (**Красноярск**).

Ontologists and designers of all countries and subject areas, join us!

各國各學科領域的本體論者與設計師，加入我們吧！

¹⁵ Sim S.K., Duffy A.H.B. Towards an ontology of generic engineering design activities. *Research in Engineering Design*. 2003. 14. P.200–223. DOI: 10.1007/s00163-003-0037-1.

¹⁶ Jia J., Zhang Y., Saad M. Knowledge graph-based multi-granularity tacit design knowledge reuse for product design. *Journal of Computational Design and Engineering*. January 2025. V.12, Iss.1. P.53–79. DOI:10.1093/jcde/qwae108.

¹⁷ Technology Convergence Report. World Economic Forum. June 2025. 60 p. <https://www.weforum.org/publications/technology-convergence-report-2025/>.

¹⁸ AAAI 2025 Presidential Panel on the Future of AI Research. Published March 2025. 88 p.

<https://aaai.org/wp-content/uploads/2025/03/AAAI-2025-PresPanel-Report-Digital-3.7.25.pdf>

¹⁹ Маяковский В.В. Необычайное приключение, бывшее с Владимиром Маяковским летом на даче, 1920.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 338.3:621.391:[004.5]

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-309-323



Онтология дуализма безопасности технической системы

© 2025, Д.И. Лобач

ОАО «Минский завод шестерён», Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Задача исследования – структурировать аспекты управления и безопасности технической системы с применением понятий энтропия, негэнтропия и информация для возможности получить дополнительные факторы оценки контроля и потери управления при принятии управляющих решений или утраты эмерджентности. Рассмотрен анализ некоторых свойств эргатических систем, которые формируют информационное поле описания структуры, управления и уровня безопасности технических систем. Построена двухуровневая структура онтологии для оценки управления технической системы путём рассмотрения информационных свойств. Негэнтропия характеризует состояние технической системы при сочетании влияния на функционал внутренних свойств и внешних факторов. Количество систем безопасности формирует предельные уровни и возможности управления и обеспечения безопасности в технической системе, в т.ч. при проявлении эмерджентности. Дуализм безопасности заключается в определении как негэнтропии (характеристики состояния порядка в системе, фактического (наихудшего) уровня и структуры управления и безопасности), так и информации о состоянии управления и безопасности (по величине необходимого количества систем безопасности в проекте для достижения наилучших возможностей). Проведено сопоставление некоторых понятий и закономерностей из теории информации и термодинамики для применения их в онтологии дуализма безопасности. Анализ дуализма безопасности позволяет для проектов технических систем проводить сравнение структуры и комплексов управления, их потенциальных возможностей; определение факторов успешного контроля или потери управления, условий утраты эмерджентности; экспертные оценки систем коммуникаций, управления и связи; формировать режимы оптимального управления оборудованием и обеспечения безопасности с учётом потери ресурсов и/или необходимости их пополнения.

Ключевые слова: онтология, негэнтропия, дуализм, безопасность, техническая система, кибернетика, сэйфеометрика, потеря управления, эмерджентность.

Цитирование: Лобач Д.И. Онтология дуализма безопасности технической системы. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.309-323. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-309-323.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Для прикладных проблем не всегда имеется подходящая теория их описания, в области развития техники практика зачастую её опережает [1]. Рассмотрение свойств технических систем (ТС) осуществляется на основании присущих им наиболее общих, признаков и описаний, которые формализованы (см., например, [2-4]). В ходе исследований по расширению подходов и развитию дополнительных инструментов для оценки возможностей проектов ТС можно выделить полезные для экспертной деятельности темы с содержательной информацией для анализа их функционала, включая области обеспечения безопасности, контроля и управления [4-6]. Развитие теории ТС осуществляется с целью привести существующие знания по объекту исследования от исходного состояния к их новому пониманию и использова-

нию для других явлений и подходов, т.е. изучать природу явлений в русле Сенеки [7]: «Если не можешь изменить мир, измени отношение к этому миру».

1 Основные понятия

С точки зрения описания взаимодействия различных объектов в ТС (элементов, структуры (систем) и сигналов – ЭСС), можно рассмотреть возможности применения её параметров для внутреннего структурирования, системообразования в контексте энтропии ТС. Характеристики систем в разных областях науки первоначально рассматриваются гипотетически и обычно подтверждаются косвенно. С учётом развития знаний об энтропии получены выражения для этой величины первоначально от предположений Больцмана

$$S=k \times \log P, \quad (1)$$

где S – термодинамическая энтропия по Клаузиусу, k – постоянная Больцмана, P – число равновероятных микросостояний термодинамической системы; до выводов из теории информации по Шеннону (как информационная энтропия); по Хартли

$$H=K \times \log_2 N, \quad (2)$$

где H – мера Хартли для равновероятных состояний, K – количество символов в сообщении, N – количество символов в используемом алфавите; по Колмогорову (скорость потери информации) и др. [8].

Под энтропией понимают меру беспорядка в системе (из-за неопределённости состояния) [8-11]. Описание уровня формирования структурности и взаимодействия в системе (негэнтропию) с позиций предотвращения наихудших последствий использования ТС можно рассматривать как меру предусмотрительности от незнания структуры или неблагоприятных ситуаций. Особенностью ТС является то, что в ТС имеются сигналы управления и контроля своих параметров. ТС является активным объектом, содержит в себе ЭСС. Рост числа рабочих систем (РС) в ТС может привести к повышению случаев потери управления (ПУ), как проявлению неопределённости, беспорядка (энтропии), утраты приобретённых свойств управления (эмерджентности). Выставляемый в ходе управления уровень функциональной (проектной) готовности (как результат, итог оценки, вывод или совокупность аналитических данных и информация об этом) связан с уровнем безопасности в ТС (верхняя граница уровня безопасности – наилучший показатель для проекта ТС, который оценивается по числу систем безопасности) и покажет, какой отклик ТС может предоставить (показать, отреагировать и т.п.) для реального (или гипотетического) состояния. Для этого ТС оснащается системами безопасности (СБ). Чем выше проектный уровень безопасности надо обеспечить в ТС (в относительных единицах), тем к большему незнанию внутренних связей следует быть готовым. Априорная готовность будет обеспечиваться большим количеством СБ в проекте ТС.

Можно предположить, что энтропия и негэнтропия ТС характеризуют уровень управления ТС, его структуру. Если необходимо обеспечить более высокий уровень безопасности, то это значит, что в системе имеется большой хаос, например, в ЭСС, высокий риск неисправностей, ПУ, аварий. Когда в ТС уровень безопасности является низким – это значит, что в ТС мало неблагоприятных рисков, система проста и малохаотична (по свойствам). Управление ТС понижает уровень хаоса (энтропию). Изменение состояний в такой ТС не случайное, а управляемое между фактической и максимальной границами безопасности и проявляется как её *дуализм*. Проектная готовность к ПУ и фактическая безопасность формируют двойственность в понимании безопасности ТС. Можно рассмотреть проявление дуализма безопасности, как характеристики всесторонней энтропии ТС со свойствами управления.

ТС, в контексте рассмотрения состояний [1-6], может иметь разные связи и систему управления, характеристики технического и человеческого потенциала эргатической систе-

мы (ЭС). Внутреннее состояние соответствует возможностям ТС с определённым уровнем безопасности. При росте энтропии в системе увеличивается вероятность принятия неправильного управленческого решения. Негэнтропия и информация о ТС связаны между собой [12]. Главная задача исследования по гносеологическому принципу А.Н. Колмогорова – определить возможную корреляцию математическим соотношением [13], которая проявляется как тенденция к поискам более простых решений для анализа.

Под информацией традиционно понимаются сведения о системе, а в кибернетике – данные или сообщение для управления системой, связанные с сигналами [14]. Безопасность обычно представлена информацией о системе через отношения и взаимодействия с окружающими объектами и средой. Это соответствует определению информации [15]: «Информация – снятая неопределённость наших знаний о чём-то».

Неочевидна тенденция изменения энтропии ТС, как меры беспорядка, для безопасности. В ходе использования аналитических подходов и методик, аналогий в научном исследовании нарабатывается информация, экспериментальные и эксплуатационные данные для оценки надёжности ТС, рисков проектных и запроектных аварий оборудования для достоверной оценки безопасности инновационных технологий в конструкциях [16-19].

2 Методология

При сравнении проектов для определения уровня превосходства одних проектов над другими важно использовать данные, которые могут представить комплексный экспертный анализ ТС, чтобы оценить, например, степень опасности, уровень оснащённости СБ, степень автономности, характеристики уровня управления, автоматизации процессов, участия в них людей, степень изолированности (от доступа людей, от окружающей среды и т.п.) и пр. Ряд параметров являются величинами из описания проекта, например, количество РС (или элементов), количество СБ (или элементов), технические характеристики и т.п.

Для подготовки анализа требуется структурирование свойств ТС с учётом выявлением или новых особенностей, синергии, сверхаддитивности, эмерджентности в функционале ТС и т.п. Рассмотрение объекта в таком контексте позволяет проводить параметризацию характеристик для оценки, построение кластеров по выбранным направлениям, выявлять фрактальные особенности, строить древовидные иерархические структуры, что даёт возможность выработать общие тематические рекомендации, используя принцип модульности [1-6, 8]. Применение в экспертных подходах совокупности признаков и потенциалов ТС даёт возможность использовать параметризацию для анализа в контексте функционально-ориентированного представления. При наличии нескольких аспектов рассмотрения целесообразно упрощать используемые подходы, начиная с однокомпонентных, и переходить к многоуровневым зависимостям, а анализ влияния внутренних и внешних факторов проводить независимо друг от друга [4].

Для анализа жизненного цикла (ЖЦ) ТС целесообразно выделить его подциклы, например, ЖЦ потребностей ТС (в снабжении, ресурсах), ЖЦ параметров и потенциалов ТС, ЖЦ влияния внутренних и внешних факторов, ЖЦ контроля и управления ТС, ЖЦ технического обеспечения (деградация и старение оборудования).

РС понижает безопасность, а СБ работает для стабилизации и повышения безопасности. Назначение РС – проявление и использование функциональности ТС (увеличение единиц продукции, выполнение большего количества операций, повышение и достижение проектом ТС технологических режимов и т.п.). Назначение СБ – управление ТС, ограничение эксплуатационных характеристик в пределах проектных характеристик. Использование СБ, приведение ТС в безопасное состояние усложняет управление, повышает комплексность действий

и хаос сигналов и связи. Повышением уровня безопасности с увеличением числа СБ при передаче энергии для переходов в замкнутой (адиабатической) системе в ходе управления создаются условия для перевода ТС в первичное состояние (проявление обратимости).

Рассмотрение связи управления с уровнем безопасности ТС [16] и энтропией, негэнтропией и информацией в системе создаёт предпосылку выдвинуть гипотезу, что эти характеристики находятся в количественной зависимости. Необходимо выявлять и пояснять свойства и закономерности описания энтропии ТС, т.е. (по Пуанкаре) рассмотреть как величину, имеющую физический смысл [9, 20]. Уровень оценённой безопасности [18] должен предположительно коррелировать с негэнтропией (Q), которая может показывать уровень контроля в системе [11, 12]. Одновременно уровень безопасности может содержать информацию об ограничении энтропии в ТС. Такая *двойственность* оценки уровня безопасности для ТС формирует концепцию *дуализма безопасности*, структура которого представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Структура онтологии дуализма безопасности технической системы

Качества ТС, эффекты влияния	ТС – управляемая система		
	негэнтропия	информация	энтропия
количественная оценка	по РС	об исправных СБ	неисправных РС и СБ
уровень безопасности	нижняя граница для ТС	верхняя граница для ТС	не характеризует
уровень управления	определяет текущее состояние (возможность)	определяет потенциал (наилучшие возможности)	общая потеря и утрата возможностей
потеря управления	характеризует	характеризует	не характеризует
усиление свойств управления	не характеризует	характеризует	не характеризует
ослабление свойств управления	характеризует	характеризует	не характеризует
запас безопасности	характеризует	характеризует	не характеризует
недостаток безопасности	характеризует	характеризует	не характеризует
профессионализм персонала	характеризует	характеризует	не характеризует
ущерб	не характеризует	не характеризует	характеризует
для принятия решения	важно	важно	вводит в заблуждение
для рекомендаций, вывода	использовать	использовать	не использовать

Предположительно канонический (как в термодинамике [21]) эффект хаоса в контексте потери функциональности ТС близок к пониманию о нанесении системе ущерба [22, 23].

3 Информационная структура безопасности технической системы

При отсутствии СБ или при малом их количестве информацию об уровне безопасности, энтропии и негэнтропии нельзя точно оценить (показано в рамках сэйфеометрики, поскольку возможности ТС могут быть не представлены или не соответствовать ожиданиям) [16, 17].

Количество элементов в ТС дискретно, с дополнением каждого нового элемента свойства ТС изменяются – осуществляется новая функция или выполняется работа с другим действием происходит приспособление к усилению внешних условий. В состоянии детерминированности уровень безопасности с конечным количеством РС и СБ (т.е. имеется фиксированное число состояний) Q_1 зависит только от уровня безопасности, достигнутого в предыдущем состоянии Q_0 (свойство Маркова) [24-26]. Получение информации от ТС влияет на последующее действие и состояние, формирует уровень безопасности в ТС. Характеристики комплекса РС-СБ и информационные данные о ТС создают внутренний поток сведений [3, 16].

В [16] приведено выражение зависимости $Q(N_{СБ})$ с модельными условиями. Для задачи об оценке состояния безопасности получена функция $Q(N_{СБ})=a+\alpha \times \ln(N_{СБ})$, где a – коэффициент интегрирования (для упрощения анализа $a=0$); потенциал, характеризующий ТС $\alpha=N_{СБ}/M_{\Phi}$ – степень опасности; $N_{СБ}$ – количество СБ в ТС; M_{Φ} – количество проектных или запроектных факторов опасности для этой ТС. *Гипотеза уравнения идеального со-*

стояния ТС (ГУИ) [18] рассматривается в виде: $Q \times N_{PC} \Rightarrow Q(N_{PC}) = b/N_{PC}$, где b – коэффициент свойств ТС; N_{PC} – количество РС.

Значение $Q(N_{PC}) \equiv Q_R$ для количества N_{PC} характеризует структурность ТС вследствие формируемого (реального) уровня безопасности, т.е. эту величину можно рассматривать как *негэнтропию*. Величину $Q(N_{CB})$ можно считать предельной для ТС с числом СБ N_{CB} : $Q(N_{CB}) \equiv Q_{lim}$. Самой простой ТС можно считать систему с одной СБ [16]. По Хартли (2) один символ $N=1$ соответствует $H=0$, т.е. нет информации о системе (не работает). В случае СБ это соответствует состоянию, когда СБ не работает – выключение системы, что можно сопоставить с передачей информации об уровне безопасности ТС.

Пусть взаимное влияние N_{PC} и N_{CB} друг на друга при совместном их функционировании ограничивается только уменьшением предельного значения Q_{lim} на величину Q_R : $Q_{\Sigma} = Q_{lim} - Q_R$. Формализация оценки Q_{lim} и Q_R произведена в [16, 18]. Результирующее значение Q_{Σ} показано на рисунке 1 вместе с Q_{lim} и Q_R .

Проектный уровень безопасности ТС должен достигаться только в случае, когда $Q_R \leq Q_{lim}$, т.е. если $Q_{lim} = Q_R$, то $Q_{\Sigma} = 0$ при N_{Σ} . СБ не справляются с негативным эффектом от работы РС при $Q_R > Q_{lim}$ (*условие достижения проектного уровня безопасности ТС*). Эту часть на рисунке 1 можно ассоциировать с недоработкой проекта ТС, недостатком управления ЭСС, зоной ПУ. В точке K обеспечивается минимальный уровень безопасности ТС (проектный уровень безопасности) с минимальным количеством СБ для проектной функциональности ТС. Управление в ТС ухудшается при росте N_{PC} , поэтому величина Q_R падает. Состояние ТС стабилизируется при увеличении N_{CB} , при этом Q_{lim} растёт. При N_{Σ} состояние управления ТС достигает достаточного уровня Q_{Σ} (при меньших N_{CB} функциональная безопасность не обеспечивается). До этого значения уровень безопасности в ТС недостаточен, есть риск ПУ и аварий. В развитии ТС можно выделить два аспекта изменения энтропии, как меры хаоса: рост N_{PC} формирует уровень негэнтропии, упорядоченность ЭСС, увеличивая количество сигналов в системах управления и связи.

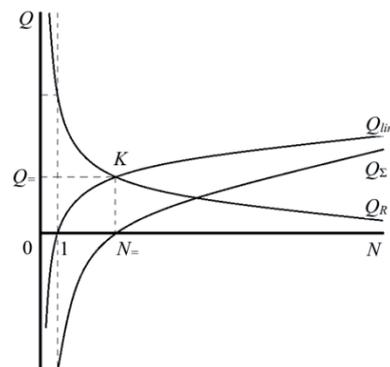


Рисунок 1 – Схематичные зависимости Q_{lim} , Q_R и Q_{Σ} (пояснения в тексте)

Пусть есть ТС с возможностью изменения количества СБ N_{CB} : $A = \{N_{CB0}, N_{CB1}, \dots, N_{CBi}\}$, где $i=0..I$, $N_{CBi}=i$. Пусть вероятность изменения РС и (или) СБ для достижения состояния ТС с безопасностью $Q(N_{CBi})$ равна 1. Использование N_{CBi} СБ соответствует состоянию с уровнем безопасности $Q(N_{CBi}) = \alpha \times \ln(N_{CBi})$. В условиях постоянного внешнего воздействия фактора $M_{\Phi} = const$ и $M_{\Phi} \equiv M$, $\alpha = I/M = const \Rightarrow Q(N_{CBi}) = Q(i) = \alpha \times \ln(i)$:

$$Q = \alpha \times \ln(i). \tag{3}$$

Это выражение, с учётом вариантов возможного понимания и общих выводов об информационной энтропии по Шеннону и по Хартли [8, 27], можно сопоставить с *информацией о безопасности* (мерой информации о безопасности, ИБ) для проекта ТС при $\alpha = const$.

Для случая, если $\alpha \neq const$ в ходе изменения ТС (при модификации или модернизации), при количестве СБ $N_{CBi}=i$, то $\alpha = i/M$. Информацию об изменении уровня безопасности ТС для контроля и управления можно представить как: $Q(N_{CBi}) = \alpha \times \ln(i) = \ln(i^{\alpha}) = \ln(i^{(i/M)})$. Можно полагать, что полученное выражение является общим видом ИБ. При изменении проекта ТС ($\alpha \neq const$), если $M_{\Phi} = 1 \Rightarrow$ ИБ $Q(N_{CBi}) = Q(i) = \ln(i^i)$:

$$Q = i \times \ln(i). \tag{4}$$

Состояние ТС, когда $Q(N_{CB1}) = 0$, связано с достижением нейтральной безопасности, когда функционирование ТС может прекратиться без воздействия специально предназначенных для этого систем. Это может характеризовать ТС с $\alpha = const$ и $\alpha \neq const$. Можно полагать, что работа этой ТС не причиняет вреда окружающей среде, инфраструктуре или людям. Для формулы Хартли (2) это эквивалентно невозможности передачи информации, если алфавит содержит только один символ.

Пусть $M_{\Phi} = M_H$ для $Q(1) = 0$, а это состояние может различаться для разных M_{Φ} , то ТС может находиться в двух состояниях управления: с $Q(i) \leq 0$ и $Q(i) > 0$. При $M_{\Phi} > M_H$ требуются дополнительные СБ при переходе ТС в нейтральное состояние для прекращения функционирования. С учётом этого, понимания безопасного состояния для разных ТС при разных внеш-

них условиях различаются (формально зависят от величины M_H). Однако ИБ зависит от детализации рассмотрения ТС – чем больше элементов $N_{СБi}$, тем больше требуется усилий для согласования и синхронизации информации при поддержании высокого уровня контроля и управления ТС. Пространственно-временные масштабы ТС не определяют однозначно уровень безопасности и ИБ ТС. Размеры систем и время для передачи сигнала в ходе связи могут быть большими, и управление ТС не будет осуществляться оперативно (требуется время на взаимодействие между ЭСС, РС и/или СБ). Величина $Q(i)$ для любых ТС зависит только от текущего значения i , если $M_\Phi=1$. При $M_\Phi \leq M_H$ порядок в системе может повыситься без управления, а хаос уменьшиться. При $M_\Phi > M_H$ требуется прикладывать дополнительные усилия для приведения системы в порядок, поскольку уровень опасности от работы ТС будет возрастать.

Минимум хаоса предполагает нулевой уровень безопасности в ТС, тогда принимать меры для её обеспечения не требуется. Большое количество элементов ТС содержится в системе с большим числом связей, где необходимо обеспечить управление с повышенным риском отказов, отклонений, поломок и аварий. Максимум контролируемой безопасности при повышении количества РС достигается только при росте числа СБ. Эта величина определяется предельными энергетическими ресурсами или финансовым обеспечением проекта.

Структуру ТС можно рассмотреть с позиции аналога парадокса Гиббса [9] – повышение энтропии ТС при увеличении количества РС и СБ при одних и тех же внешних условиях и росте сигналов управления и связи. В ТС происходит формирование структуры ЭСС – образование связей между независимыми, пространственно или временно распределёнными элементами, находящимися при одинаковых внешних условиях. В этой ситуации управлению требуется готовность к увеличивающемуся уровню рассогласования, нарушения синфазности и синхронизации ЭСС, поэтому *уровень безопасности, обеспечиваемый СБ, должен повышаться быстрее, чем падение неэнтропии, вызванное ростом количества РС*. Задача СБ – повысить согласованность в структуре ТС. Это может происходить только в системах с наличием управления, где могут производиться действия по упорядочиванию, а не по повышению хаоса (как, например, в космологических, биологических системах и т.п., со статистической природой связей). Графики на рисунке 1 с учётом ГУИ показывают возрастание результирующих функций управления и контроля, т.е. для Q_{lim} и Q_Σ .

Количество СБ определяет неизвестную информацию об обеспечении сохранности РС, уязвимости ТС. С учётом этого можно сформулировать условия для устойчивого функционирования ТС. С ростом Q_{lim} в системе возрастает запас безопасности (ЗБ). Для замкнутой системы с ростом ИБ в ней уменьшается количество возможных случаев неустойчивого управления, повышается уровень контроля над ЭСС. Таким образом, условие устойчивости ТС по аналогии с принципом Ле-Шателье-Брауна [3, 9]: *состояние ТС более устойчиво, если ИБ максимальна*. Внешние воздействия на ТС будут вызывать перераспределение внутренних ресурсов. Это аналогично правилу Ленца для самоиндукции о направлении индукционного тока в контуре (в данном случае речь идёт о компенсации внешнего воздействия с использованием внутренних ресурсов) [21].

4 Влияние внешних условий на состояние технической системы

Гипотетические случаи для изменений Q_R (внутренние условия) и M (внешние условия) состояний ТС (переходов), возможные их практические ситуации с использованием *диаграмм управления* состояниями показаны на рисунке 2. Из ГУИ ТС в контексте сэйфеометрики $Q_R/M=const$. Можно предположить, что в замкнутой системе внутренние возможности должны перераспределяться для работы при изменении внешних воздействий. Для двух со-

стояний $M_0 < M_1$ полагая, что если система способна функционировать при худших условиях M_1 , то она будет оставаться работоспособной и при лучших M_0 : $Q_1/M_1 = Q_0/M_0$. В этом случае не требуется обеспечивать высокий уровень безопасности для ТС: $Q_0 < Q_1$. Изменение энтропии и негэнтропии ТС связано с сигналом в ходе управления системой об иной величине ИБ ТС Q_{lim} , соответствующей переходу для состояний ТС: $Q_1/M_1 - Q_0/M_0 = 0$ (как аналогия энтропии Клаузиуса для циклического процесса [21]). При рассмотрении условий переходов для состояний ТС предполагается, что ТС эксплуатируется в течение определённого проектного времени $T_Э$. Для замкнутого или обратимого перехода ТС входящая и исходящая информация о ТС будут эквивалентны: $\oint dQ/M = 0$. При исчерпании ресурсов и средств в ходе эксплуатации в течение времени $T > T_Э$ для любого необратимого перехода с ПУ $\oint dQ/M < 0$.

Схема переходов состояний ТС показана на рисунке 2. В точке A ТС использует максимальное предоставленное количество РС и СБ, чтобы отметить ЗБ и недостаток безопасности (НБ) для ТС (на рисунке 2 сплошная линия – обратимые переходы без влияния связей между элементами ТС, пунктир – с влиянием связей; C и B – промежуточные состояния на кривых с ЗБ и НБ соответственно):

- $\{0-A\}$ – переход в соответствии с ГУИ ($Q_R/M = const$);
- $\{0-C-A\}$ и $\{M_0-A\}$ – из состояния с ЗБ (с потенциалом резервирования и дублирования), если $M_0 \neq 0$, есть запас ресурсов и средств, для больших M_0 ТС более аварийно-устойчива (способна преодолевать худшие внешние условия);
- $\{0-B-A\}$ и $\{Q_0-A\}$ – в ТС есть НБ, возможны проектные недоработки (старт от $Q_0 \neq 0$), требуется приработка и т.п., при больших Q_0 ТС менее готова к пуску, небезопасна.

Циклическая работа ТС возможна с проявлением обратимости или необратимости переходов состояний ТС. Случаи обратимости рассматриваются по аналогии с циклом Карно [21]. Эти переходы характерны для ТС, осуществляющих функциональность только на внутренних запасах без отбора ресурсов. При сохранности ЭСС состояние ТС не ухудшается. Если в ходе работы эксплуатационные возможности устойчивости улучшаются, то повышается ЗБ, есть внешнее поступление ресурсов. При использовании резервов очевидна возможность полной обратимости с улучшением конечного состояния ТС. К условиям необратимости переходов в ТС можно отнести следующие: утечки ресурсов и средств, утрата работоспособности, снижение эффективности и (или) КПД, старение и (или) рабочая деградация оборудования, деградация при хранении и ожидании использования по назначению, ПУ, утрата связи и коммуникаций. В реальных ТС всегда есть необратимые переходы и потеря рабочего потенциала, снижение надёжности и живучести, происходит разрушение ЭСС (график для реального перехода при $M=0$ не от $Q_R=0$, а от $Q_R=Q_0$ с начальным отбором ресурсов). Необратимость переходов повышается при работе с нарастающим воздействием внешних условий, увеличением M . Обратимость и необратимость влияют на эффективность работы ТС в диапазоне изменений внешних условий в пределах внутренних запасов и возможностей. Необратимые переходы ($\{Q_A-M_A\}$, $\{Q_1-M_A\}$, $\{Q_1-M_1\}$) указаны на рисунке 2: сплошная линия – без влияния связей между элементами ТС, пунктир – с влиянием связей.

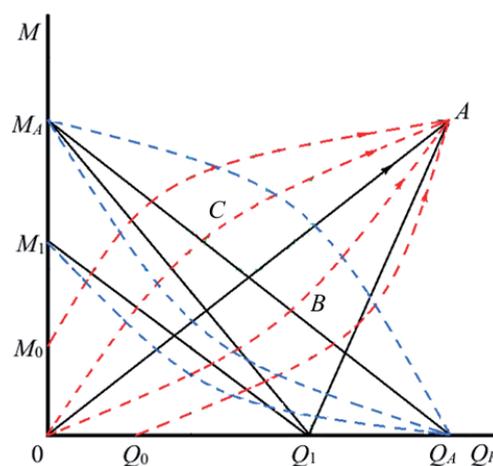


Рисунок 2 – Схематичные зависимости для отдельных переходов состояний ТС при управлении (пояснения в тексте)

Увеличение по Q_R показывает переходы без ПУ, например, $\{0-A\}$, $\{0-C-A\}$, $\{0-B-A\}$. Переходы с уменьшением Q_R будут характерны для случаев с ПУ, например, $\{Q_A-M_A\}$. Эффективность работы с имеющимся ЗБ можно оценить через соотношение M_1/M_A (достигнутого значения к максимально возможному числу факторов), а эффективность управления – с использованием Q_1/Q_A (минимальной величины к максимально возможному значению параметра). Изменение состояний ТС с $Q_R=const$ возможны с изменением Q_R/M . Переходы при $M=const$ возможны по разным причинам, и их целесообразно рассматривать с учётом корреляций согласно ГУИ.

Переходы состояний в треугольнике $\Delta\{0-A-M_A\}$ происходят в условиях щадящей эксплуатации или ЗБ, старт из состояния с $M \neq 0$ возможен, если в ТС создан ЗБ для преодоления ΔM . Для ТС в $\Delta\{0-A-Q_A\}$ мало ресурсов и НБ, поэтому начало перехода из $Q_0 \neq 0$ все ресурсы эксплуатируются с наибольшим износом. При начале функционирования из области $\Delta\{0-A-M_A\}$ обратный переход возможен в ту же область или в $\Delta\{0-A-Q_A\}$.

Прямой переход может совершаться как из состояния с ЗБ, так и при НБ, выполняемом в ходе функционирования ТС. Этот переход осуществляется под управлением и контролем ЭСС ТС. НБ может быть связан с недоработками проекта, приработкой, согласованием элементов, наладкой. Обратный переход обычно происходит самопроизвольно (под действием активных СБ) или при изменении режимов работы ТС. В ходе возврата возможности ТС могут ухудшаться (элементы выходят из строя – деградируют, стареют, ломаются и т.п.).

Основная причина необратимости переходов в ТС – это утрата системой своей проектной функциональности из-за выработки ресурса, ПУ, израсходования средств (материалов, финансов, энергии и пр.). Неисправность СБ и ПУ приводят к информации, обусловленной многочисленными беспорядочными и несогласованными взаимодействиями и сигналами между РС в ходе неуправляемой их работы. СБ обеспечивают упорядоченные, подконтрольные связи между РС. Необратимость, её факторы делают переходы ТС несимметричными. Характеристики ТС – комплексные признаки, поэтому может быть много факторов риска изменения состояний, утраты контроля и связи. Предположительно необратимость происходит из-за разделения затрат в ТС на материальные средства (носители оборудования) и нематериальные (меры для поддержания контроля, связи, процесс передачи информации и др.), темпы расходования которых различаются. Нематериальные ресурсы диссипативны, исчерпываются, не запасаются, излучаются, рассеиваются и т.п., может происходить их отбор из ТС или сброс наружу. Условную «идеальность» и «неидеальность» проектов ТС можно связать с обратимостью или необратимостью состояний ТС, что определяется конструкцией систем (проектантами и изготовителем). Без использования компенсации затрат в ТС формируется необратимость состояний. Факторы обратимости состояний ТС – это благоприятные для функционирования условия. Для экспертного анализа важно изучение влияния на работу ТС факторов необратимости, необходимо дать выводы по их исключению, рекомендации для эксплуатации ТС с ними. Они характеризуют несовершенство ТС. Все реальные системы имеют необратимые состояния. Для обратимых переходов изменение ИБ не меняется $|\Delta Q| = 0$, а для необратимых $|\Delta Q| \neq 0$. Численно эффект необратимости характеризует степень открытости или незамкнутости системы, уровень утечки ресурсов и средств, ПУ и потерю контроля, подходит для описания устойчивости ТС к внешним воздействиям и утрате внутреннего рабочего потенциала.

Поскольку уровень безопасности ТС определяется количеством как РС, так и СБ, то целесообразно рассматривать динамику ИБ (для формирования системы РС) и статическую ИБ (по ограничению безопасности при использовании СБ). Цикл переходов относительно статической ИБ обратим, поскольку определяет пределы функционирования проекта ТС. Динамика ИБ может показать необратимость переходов в ТС по естественным причинам (утрата РС, их износ, рассеяние и др.).

По прямому и обратному переходам можно оценить возможность эквивалентности состояний в ТС. Для осуществления в ТС прямого перехода требуется привлечение ресурсов и средств, а обратный переход показывает диссипацию накопленных ресурсов, наличие в ТС расходов и потерь на восстановление функциональности, управление, сложность контроля и управления.

ПУ понижает уровень безопасности. ЭС является детерминированной системой, поэтому для эволюции ТС по вопросам технического оснащения и управления можно рассмотреть свойство её обратимости. Его трактовка в контексте функционирования ТС с этим свойством:

Если в системе нет потери управления при сложной обстановке (т.е. при запроектных или аварийных параметрах), то в этой системе не будет потери управления в простых условиях (т.е. при проектных, докритических режимах).

5 Применение онтологии дуализма безопасности для анализа свойств технической системы

Сформулированные с помощью гипотезы о дуализме выводы базируются на сделанных допущениях. ТС представляет собой устройство, назначение которого определено проектом. Информацию, содержащую управляющее действие для ТС, следует относить к негэнтропии, которая формируется согласно принципу компенсации энтропии [3, 12].

Понятие о негэнтропии базируется на параметрах, требуемых для основного функционала ТС (N_{PC} и M), и характеризует ПУ ТС с ростом энтропии при расширении ЭСС, проявлении эмерджентности. ИБ основана на данных о структуре и свойствах управления проектом, параметрах СБ (α и N_{CB}), характеристиках о готовности и способности ТС поддерживать контроль и управление. Анализ негэнтропии и ИБ позволяет оценить готовность ТС к функционированию и её проектный предел уровня безопасности.

Понимание негэнтропии и ИБ ТС возможно лишь в рамках проекта ТС с детальным описанием её функционала. Максимальное значение $Q(I)$ целесообразно рассматривать при функционировании проекта ТС с заданными параметрами I , M_{Φ} , M_H и др. Успешность управления определяется большей возможностью контроля и большим количеством управляемых состояний в ТС. На основании закона необходимого разнообразия (закон Эшби) [3]: *для успешного управления количество СБ должно быть не меньше числа разнообразных РС* ($N_{CB} \geq N_{PC}$). В этом случае количество подконтрольных состояний ТС с учётом предположений о независимости подсистем РС и СБ (рисунок 1) можно использовать для рассмотрения свойства аддитивности. Для работы ТС наблюдатель осуществляет управление проектом посредством N_{CB} , а экспериментатор (тот, кто эксплуатирует ТС) работает с N_{PC} . Количество СБ определяет границу предполагаемого изменения ИБ, число РС связано с фактическим значением негэнтропии. Анализ влияния структуры систем при рассмотрении задач эксплуатационной безопасности ТС важен, например, в авиации [24-26]. Сведения для управления ТС могут быть получены при снятии неопределённости в информации о ТС согласно закону возрастания эмерджентности [28].

Для оценки величины запаса ресурсов и средств в ТС можно применить понятие *свободной энергии* (по Гельмгольцу [9]), как характеристики внутреннего потенциала системы при работе в изоляции, и его уменьшение из-за затрат для поддержания функциональности.

Среди задач эксперта может быть необходимость оценки баланса безопасности, проведение анализа диаграмм переходов ТС. Эксперту надо учесть эти данные для формирования выводов и рекомендаций, решения ряда аналитических вопросов: как и когда это можно отследить среди массивов данных; как целесообразно распределить ресурсы ТС для переходов состояний; к чему надо готовиться в ходе эксплуатации ТС; в чём суть преобразований в ТС; какие показатели проекта могут быть достигнуты. Для получения ответов необходимо рассмотреть деградацию оборудования, ухудшение управления, причины увеличения отходов, сброс отработанного или ремонт и восстановление оборудования, потери человеческих ресурсов ЭС. Для поддержания работы происходит плановая потеря ресурсов и средств, потенциала ТС. Требуется оценка адекватности затрат.

Если ТС меняет свои параметры в ходе эксплуатации, то и требования к безопасности тоже необходимо изменять. К контролируемым процессам можно отнести, например, управляемую, планируемую человеком эволюцию ТС. Неуправляемым процессом следует считать самопроизвольные, «слепые» изменения на неконтролируемых объектах, происходящие по законам природы. Обратимость происходит (парадокс Лошмидта [9]), если нет ПУ, нет неисправностей. Если есть потери, то ТС не восстанавливается полностью. При расширении размеров ТС ПУ в ней происходит из-за ослабления связей между ЭСС, при сжатии ТС контроль может восстанавливаться. То же может происходить в ходе циклических переходов.

Предположение о воображаемом в термодинамике «демоне» Максвелла [9] может органично вписаться в анализе энтропии и негэнтропии ТС в качестве проявления ряда явлений: функция управления в ЭС, влияние человеческого фактора на принятие решения, возникно-

вание ПУ в ТС. В результате изменяются состояния ТС, происходят переходы и требуемая для работы ТС корректировка. Изгнание «демона» – это переход к более совершенному управлению ТС, автоматизации, к обратимости переходов состояний ТС. Для этого можно обобщить факторы управления и их признаки (см. таблицу 2).

Таблица 2 - Факторы управления технической системой

Факторы	Признаки факторов
Повышение эффективности и возможностей управления	системный эффект, синергия, сверхаддитивность, эмерджентность
Запас безопасности	дублирование, резервирование, замена, синхронизация, синфазность, многоканальность, когеррированность, дальноедействие
Недостаток безопасности	наладка, настройка, приработка, согласование, несовместимость оборудования, односторонность сигналов, потеря управления
Потеря управления	поломка, деградация, старение, запроектные параметры, выработка ресурса, запаздывание сигнала, слабый сигнал, высокий шум, большие расстояния, протяжённость объектов, потеря отклика или двусторонности, нецелостность, прерывистость, отсутствие координации, диссипация, утрата эмерджентности

В безопасности ТС можно рассмотреть новый контекст постулата Нернста (3-е начало термодинамики) [21]. При $M \rightarrow 0 \Rightarrow Q_{\Sigma} \rightarrow 0$. Функция безопасности ТС требуется, только если $M > 0$, поскольку тогда для её обеспечения нужен контроль, управление и соответствующее оборудование. Однако всё имеющееся в проекте ТС оснащение может не использоваться, если M изменяется в диапазоне ΔM . Поэтому при функционировании ТС можно рассматривать полноту использования ЗБ, т.е. какая часть потенциала ТС используется для преодоления внешних условий ΔM .

Например, если проектом предусмотрена работа ТС (см. гипотетический контур на рисунке 3: обратимый переход {1-2}, необратимый – {3-4}) с переходами в $\Delta\{1-4-2\}$ или $\Delta\{1-3-2\}$ (пунктир – переход с влиянием связей), то в ней есть ЗБ для функционирования в пределах $[M_{MIN}; M_{MAX}]$. Фактическое изменение ΔM находится в этом диапазоне для M при использовании ЗБ в проекте ТС, поэтому коэффициент эксплуатации (КЭ) можно оценить по $\eta_{ТС} = \Delta M / (M_{MAX} - M_{MIN})$. Для сохранения в ТС эксплуатационных параметров более приемлемы меньшие значения $\eta_{ТС}$. Если $\eta_{ТС} > 1$, то при функционировании ТС имеются аварийные признаки и условия (выход за проектные условия).

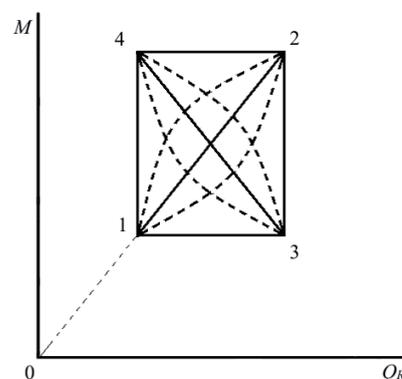


Рисунок 3 – Схема гипотетического контура для переходов состояний ТС при управлении (пояснения в тексте)

Энтропия управляемой системы, как мера информации о безопасности ТС, увеличивается с ростом числа связей и сигналов контроля. Безопасность неуправляемой ТС (негэнтропия) уменьшается из-за роста термодинамической энтропии для ЭСС в ТС. Обратимость возможна в пределах ограниченного времени. КЭ показывает долю обратимости. Для эксперта важно выделить влияние необратимости на функционал ТС. Чем меньше $\eta_{ТС}$, тем перспективнее ТС, больше её потенциал и возможности. При больших КЭ повышается износ оборудования для функционирования с изменением параметров в широких пределах.

С учётом (3)-(4) при $Q_{lim} \rightarrow 0$ у эксперта будет полная информация о состоянии ТС и всех её элементов. При максимальных значениях Q_{lim} или $Q_{lim}(\alpha = const) \rightarrow Q_{lim}(\alpha \neq const)$ (высокая энтропия сигналов и связей, их наибольшая хаотичность) практически невозможно зафиксировать

ровать конкретные состояния ТС и её элементов, требуются усилия в управлении системой, постоянное проведение синхронизации и согласования компонентов структуры, чтобы не потерять управление, т.е. может достигаться Q_{lim} . ИБ и негэнтропия изменяются в противоположных направлениях, взаимоисключают друг друга – разрастание структуры понижает Q_R , что соответствует термодинамической концепции информации по Шеннону [15]. Сравнение состояний и выделение ключевых компонентов в онтологии рассматриваемого дуализма для ТС проведено в таблице 3, используя подходы научного познания [29].

Таблица 3 - Сопоставление ключевых компонентов в онтологии дуализма безопасности (пояснения в тексте)

Термодинамика	Теория информации	Дуализм безопасности	
		Формирование функционалов ТС через количество РС	Обеспечение безопасности ТС через количество СБ
энтропия	информация	негэнтропия	информация
–	информация	информация об управлении	информация о пределе безопасности
$S=k \times \log P$	–	$Q_R=b/N_{PC}$	–
–	$H=K \times \log_2 N$	–	$Q_{lim}=\alpha \times \ln N_{CB}$
S	H	Q_R	Q_{lim}
k	K	–	α
P	N	N_{PC}	N_{CB}
постулат Нернста	–	–	применим
свободная энергия	–	–	запас безопасности
необратимость процессов	–	недостаток безопасности	недостаток безопасности
обратимость процессов	–	обратимость переходов	обратимость переходов
принцип Ле-Шателье-Брауна	–	–	запас безопасности в ЭСС
–	закон Эшби	–	запас безопасности в ЭСС
–	закон возрастания эмерджентности	–	применим
парадокс Гиббса	–	запас безопасности в ЭСС	системы управления и связи
парадокс Лошмидта	–	запас безопасности	запас безопасности
«демон» Максвелла	–	сигналы управления и связи	сигналы управления и связи
КПД процесса	–	КЭ	–

Для некоторых ТС в ходе работы может происходить изменение пространственных параметров функционирования при $N_{CB}=const$. В этом случае может быть изменение эффективности связей, потеря или ослабевание управления, усиление влияния внешних факторов. Информация о ТС содержит представление о её состоянии, свойствах и структуре. Данные об ЭСС конкретизируют базовое понимание о термодинамической энтропии ТС.

Дуализм безопасности позволяет рассматривать ТС с различных сторон. Информация имеет значение для описания состояния системы в целом и её компонентов. Внешние факторы M в своём диапазоне хаотически действуют на ТС, но величина N_{CB} определяет максимальный фактор готовности ТС к такому воздействию по величине Q_{lim} . Количество РС через Q_R определяет информацию о возможном падении уровня безопасности вследствие большого числа управляемых элементов ТС. Чем меньше имеется информации о состоянии безопасности, о состоянии управления, тем выше энтропия ТС и надо руководствоваться предельными случаями проекта ТС для готовности к возможным инцидентам и авариям:

- полная информация соответствует нулевой энтропии, ТС не включена, элементы не взаимодействуют, их состояние не изменяется;
- минимум (исчезновение) информации соответствует высокой энтропии, поскольку уменьшаются сведения о конкретных множественных состояниях элементов ТС.

Информация о начальной упорядоченности с полной информацией о состоянии элементов ТС переходит в понижение информации об ЭСС в ходе ЖЦ ТС.

Заключение

Наличие широкого круга характеристик и моделей проекта ТС позволяет эксперту участвовать в создании ТС с использованием *трансдисциплинарного* подхода [1, 3, 30]. При рассмотрении вопросов безопасности трудности в проведении опыта с ТС связаны с невозможностью точно воспроизвести состояние системы с внутренними и внешними условиями.

Незнание реального состояния ТС из-за множественности состояний в управлении компенсируется диапазоном СБ для управления ТС. Формируется двойственность в структуре рассмотрения вопросов безопасности ТС. Концептуальное рассмотрение ТС образует структурную схему дуализма в описании состояния и обеспечения безопасности для онтологии проектирования ТС [30]. Энтропия часто рассматривается в качестве инструмента анализа информации и информационных систем. В ЖЦ ТС количество информации по управлению увеличивается на основании закона возрастания эмерджентности. Состояние управления ТС определяет меру упорядоченности системы, способность контролировать и поддерживать требуемую проектом функциональность и свойства ТС.

Неуправляемая ТС не может характеризоваться безопасностью, для неё нельзя ни определить, ни ограничить её состояния, т.к. их нельзя зафиксировать. К дуализму безопасности можно прийти через рассмотрение неуправляемых ТС и структурирование ТС для построения системы её управления. В этом случае увеличение информации (по Шеннону) будет происходить в связи со снятием неопределённости о состояниях ТС. В обратном случае (при переходе от управления к ПУ) фиксируются множественные сведения об отказах и падении контроля, т.е. об отсутствии функциональности. Выражения (3)-(4), как и формула Хартли (2), несут информацию о влиянии внутреннего строения ТС (структурной, системной организованности, упорядоченности) на её устойчивость при функционировании. Дуализм безопасности показывает её многосторонность в единой системе с управлением.

Подходы к оценке управления и уровня безопасности ТС, например, сэйфеометрика, могут применяться при рассмотрении и оптимизации проектов систем коммуникаций, управления и связи наряду с известными методиками для автоматизированных систем управления производства [28]. Сравнение для проектов уровней негэнтропии, предельной величины обеспечиваемой безопасности позволяет прогнозировать срок и условия для возможной ПУ в ТС, предусмотреть меры и обеспечить к этому готовность ЭС (наличие резервов оборудования, подготовку персонала, возможность принимать своевременные решения).

Список источников

- [1] *Хубка В.* Теория технических систем. М.: Мир, 1987, 208 с.
- [2] ГОСТ Р 58908.1-2020/МЭК 81346-1:2009. Промышленные системы, установки, оборудование и промышленная продукция. Принципы структурирования и коды. Часть 1. Основные правила. М.: Стандартинформ, 2020, 77 с.
- [3] *Качала В.В.* Основы теории систем и системного анализа. М.: Горячая линия – Телеком, 2012, 210 с.
- [4] *Кириллов Н.П.* Концептуальные модели технических систем с управляемыми состояниями: обзор и анализ. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2011. № 4. С.81–91. EDN: PXGUWD.
- [5] *Кириллов Н.П.* Описание метода комбинированного концептуального моделирования технических систем. Тр. СПИИРАН, 2013, выпуск 31. С.223–235. <https://www.mathnet.ru/rus/trspy/v31/p223/>.
- [6] *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем. М.: «Янус-К», 2002, 284 с.
- [7] *Сенека, Луций Анней* Нравственные письма к Луцилию. Перевод, примечания С.А. Ошерова. Отв. ред. М.Л. Гаспаров. М.: Издательство «Наука», 1977, 680 с.
- [8] *Чумак, О.В.* Энтропии и фракталы в анализе данных. М.– Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011, 164 с.
- [9] *Шамбадаль П.* Развитие и приложения понятия энтропии. М.: Наука, 1967, 280 с.
- [10] *Мартин Н., Ингленд Дж.* Математическая теория энтропии. М.: Мир, 1988, 350 с.
- [11] *Волькенштейн М.В.* Энтропия и информация. М.: Наука, 1986, 192 с.

- [12] **Лотоцкий В.Л.** Энтропия и неэнтропия. *Перспективы науки и образования. Международный электронный научный журнал*. 2017. 1(25). С.20-23. Адрес: pnojournal.wordpress.com/archive17/17-01/.
- [13] **Колмогоров А.Н.** Теория информации и теория алгоритмов. М.: «Наука», 1987, 304 с.
- [14] **Жилин В.И.** К вопросу о многозначности трактовки понятия «информация». *Вестник Челябинского государственного университета. Философия. Социология. Культурология*. Вып.19. 2010. №31(212). С.116–122.
- [15] **Shannon C., Weaver W.** The Mathematical Theory of Communications, University of Illinois Press, Urbana, 1949, 131 p.
- [16] **Лобач Д.И.** О развитии экспертных возможностей для рассмотрения проектов оборудования и технологических решений. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2023. № 2. С.38-41. DOI:10.21122/2309-4923-2023-2-38-41.
- [17] **Лобач Д.И.** О развитии подходов системной оценки безопасности при проектировании технических систем. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13. №4(50). С.615-624. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624.
- [18] **Лобач Д.И.** О гипотезе уравнивания состояния технической системы. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024. Т.51(4). С.112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122.
- [19] **Уемов А.И.** Аналогия в практике научного исследования. М.: Наука, 1970, 272 с.
- [20] **Poincare H.** La science et l'hypothese, Paris: Flammarion, 1908, chap. 9, 20 p.
- [21] **Фейман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1976, 496 с.
- [22] **Лобач Д.И.** О некоторых случаях количественной оценки ущерба технической системе. *Надежность*. 2024. №4. С. 58-64. DOI:10.21683/1729-2646-2024-24-4-58-64.
- [23] **Лобач Д.И.** О некоторых случаях применения статистических распределений для оценки влияния человеческого фактора на безопасность технических систем. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2025. № 1(124). С.35–45. DOI:10.23859/1994-0637-2025-1-124-3.
- [24] **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации авионики как марковские и полумарковские процессы. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2015, №213, С.28-33. EDN: TONRTR
- [25] **Чинючин Ю.М., Соловьёв А.С.** Применение марковских процессов для анализа и управления эксплуатационной технологичностью летательного аппарата. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2020. Т.23, №1, С.71-83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83.
- [26] **Уланский В.В., Мачалин И.А.** Оценка показателей эффективности эксплуатации систем авионики с комбинированными структурами резервирования. *Математичні машини і системи*, 2007, № 2, С.90-97. EDN: PUWXRH.
- [27] **Шеннон К.** Работы по теории информации и кибернетике. М.: Издательство иностранной литературы, 1963, 829 с.
- [28] **Волкова В.Н., Денисов А.А.** Теория систем. М.: Высшая школа, 2006, 511 с.
- [29] **Степин В.С., Елсуков А.Н.** Методы научного познания. Минск: Вышэйшая школа, 1974, 152 с.
- [30] **Фаянс А.М.** Об онтологии проектирования с позиций трансдисциплинарного подхода. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.163-173. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-163-173.

Сведения об авторе

Лобач Дмитрий Иосифович, 1971 г. рождения. Окончил Белорусский государственный университет (1993), к.т.н. (1998), с 2004 по 2024 – работа в Департаменте по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Национальном банке Республики Беларусь, ОАО «Минский завод шестерён». Принимал участие в рассмотрении технических проектов ядерных установок по вопросам их безопасности, функционирования систем безопасности. В списке научных трудов более 80 работ. ORCID: 0000-0001-5512-0032; ResearcherID: HKN-7220-2023; SPIN 8838-3030; Author ID (РИНЦ): 1177269. lobachd@yandex.ru.



Поступила в редакцию 31.03.2025, после рецензирования 26.05.2025. Принята к публикации 16.06.2025.



An ontological model of the dual nature of safety in technical systems

© 2025, D.J. Lobach

OJSC «Minsk Gear Plant», Minsk, Belarus

Abstract

The aim of this study is to structure the aspects of control and safety in technical systems using the concepts of entropy, negentropy, and information, in order to identify additional factors for assessing controllability and loss of control in the process of decision-making or the loss of emergence. The article examines specific properties of ergatic systems that contribute to forming the informational basis for describing the structure, control, and safety levels of technical systems. A two-level ontological framework is proposed for evaluating the controllability of a technical system through the analysis of its informational characteristics. Negentropy is interpreted as an indicator of the system's condition, reflecting the combined effect of internal properties and external influences on its functionality. The configuration and number of safety subsystems define the upper limits of controllability and safety within a technical system, including in scenarios involving emergence. The dualism of safety lies in capturing both the negentropy (describing the state of order in the system, as well as its actual — or worst-case — levels and structure of control and safety) and the information about the state of control and safety (expressed through the required number and configuration of safety subsystems needed to achieve optimal performance). The article compares several concepts and regularities from information theory and thermodynamics for their applicability within the ontological framework of safety dualism. The analysis of safety dualism enables the comparison of structural and control architectures in technical system designs, the identification of factors contributing to successful or failed control, the definition of conditions under which emergence is lost, expert assessment of communication and control systems, and the development of optimal control and safety regimes—taking into account both resource depletion and the need for resource replenishment.

Keywords: *ontology, negentropy, dualism, safety, technical system, cybernetics, safeometrics, loss of control, emergence.*

For citation: Lobach D.J. An ontological model of the dual nature of safety in technical systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 309-323. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-309-323.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Schematic dependencies of Q_{lim} , Q_R and Q_Σ (explanations are in the text)

Figure 2 – Schematic dependencies for separate state transitions of technical system during control (explanations are in the text)

Figure 3 – Diagram of a hypothetical contour for transitions of technical system during control (explanations are in the text)

Table 1 – The structure for the ontology of the dual nature of safety in technical systems

Table 2 – Control factors for technical system

Table 3 – Correlation of the key components in ontology of safety dualism (comments are in the text)

References

- [1] **Hubka V.** Theory of technical systems [In Russian]. Moscow: Mir, 1987, 208 p.
- [2] GOST R 58908.1-2020/IEC 81346-1:2009. Industrial systems, installations and equipment and industrial products. Structuring principles and reference designations. Basic rules [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2020, 77 p.
- [3] **Kachala VV.** Fundamentals of systems theory and system analysis [In Russian]. Textbook for universities. – 2nd ed., ispr. Moscow: Hotline – Telecom, 2012, 210 p.
- [4] **Kirillov NP.** Conceptual models of technical systems with controlled states: overview and analysis [In Russian]. *Artificial intelligence and decision-making*. 2011; 4:81–91. EDN: PXGUWD.
- [5] **Kirillov NP.** The description of a method of the combined conceptual modelling of technical systems [In Russian] // SPIIRAS Proceedings. 2013. Issue 8(31). Available: <https://www.mathnet.ru/rus/trspy/v31/p223/>.
- [6] **Klimontovich YuL.** Introduction to the Physics of Open Systems [In Russian], Moscow: Janus–K, 2002, 284 p.
- [7] **Lucius Annaeus Seneca.** Moral Letters to Lucilius Translated, notes, and prepared by S. A. Osheroov. Edited by M. L. Gasparov [In Russian]. Moscow: Nauka, 1977, 680 p.

- [8] **Chumak OV.** Entropy and fractals in data analysis [In Russian]. Moscow– Izhevsk: Scientific Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", Institute of Computer Research, 2011, 164 p.
- [9] **Shambadal P.** Development and Applications of the concept of entropy [In Russian]. Moscow: Nauka, 1967, 280p.
- [10] **Martin N., England J.** Mathematical Theory of Entropy [In Russian]. Moscow: Mir, 1988, 350 p.
- [11] **Volkenstein MV.** Entropy and Information [In Russian]. Moscow: Nauka, 1986, 192 p.
- [12] **Lototsky VL.** Entropy and negentropy [In Russian]. *Perspectives of Science & Education. International Scientific Electronic Journal* [Electronic resource]. 2017;1(25):20-23. Available: psejournal.wordpress.com/archive17/17-01/ Published: 1 March 2017
- [13] **Kolmogorov AN.** Theory of information and theory of algorithms [In Russian]. Moscow: Nauka, 1987, 304 p.
- [14] **Zhilin VI.** On the issue of ambiguity of interpretation of the concept of "information" [In Russian]. *Bulletin of the Chelyabinsk State University. Philosophy. Sociology. Cultural studies.* 2010; 19, 31(212):116–122.
- [15] **Shannon C., Weaver W.** The Mathematical Theory of Communications, University of Illinois Press, Urbana, 1949, 131 p.
- [16] **Lobach DJ.** About development of expert possibilities for consideration of equipment projects and technological decisions [In Russian]. *System analysis and applied information science.* 2023; 02: 38-41. DOI:10.21122/2309-4923-2023-2-38-41.
- [17] **Lobach DJ.** On the development of approaches to system safety assessment in the design of technical systems [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 13(4): 615-624. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624.
- [18] **Lobach DJ.** On the hypothesis of the equation for technical system state [In Russian]. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2024; 51(4):112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122.
- [19] **Uemov AI.** Analogy in the practice of scientific research [In Russian]. Moscow: Nauka, 1970, 272 p.
- [20] **Poincare H.** La science et l'hypothese, Paris, Flammarion, 1908, chap. 9, 20 p.
- [21] **Feynman RP, Leighton RB, Sands M.** The Feynman lectures on physics [In Russian]. Moscow: Mir, 1976, 496 p.
- [22] **Lobach DJ.** On some cases of quantitative estimation of damage to a technological system [In Russian]. *Dependability.* 2024; 4:58-64. DOI:10.21683/1729-2646-2024-24-4-58-6.
- [23] **Lobach DJ.** About some cases of applying statistical distributions to assess the impact of the human factor on safety [In Russian]. *Cherepovets State University Bulletin.* 2025;1(124):35–45. DOI:10.23859/1994-0637-2025-1-124-3.
- [24] **Kuznetsov SV.** Mathematical models of processes and systems of technical operation of avionics as Markov and semi-Markov processes [In Russian]. *Scientific Bulletin of MSTU GA.* 2015; 213: 28-33. EDN: TONRTR.
- [25] **Chinyuchin YuM, Solov'ev AS.** Application of Markov processes for analysis and control of aircraft maintainability [In Russian]. *Civil Aviation High Technologies.* 2020; 1(23):71-83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83.
- [26] **Ulansky VV, Mochalin IA.** Evaluation of performance indicators for the operation of avionics systems with combined redundancy structures [in Russian]. *Mathematical machines and systems.* 2007;2:90-97. EDN: PUWXRH.
- [27] **Shannon C.** Works on information theory and cybernetics [In Russian]. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1963, 829 p.
- [28] **Volkova VN, Denisov AA.** Theory of Systems [In Russian]. Minsk: Vysshaya Shkola Publ., 2006, 511 p.
- [29] **Stepin VS, Yelsukov AN.** Methods of scientific cognition [In Russian]. Moscow: Higher School, 1974, 152 p.
- [30] **Fayans FM.** On the ontology of designing from the standpoint of a transdisciplinary approach [In Russian]. *Ontology of designing.* 2025; 15(2): 163-173. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-163-173.

About the author

Dmitry J. Lobach (b. 1971) graduated from the Byelorussian State University (Minsk, USSR-Belarus) in 1993, Candidate of Technical Sciences (1998), from 2004 to 2024 he worked in the Department of Nuclear and Radiation Safety of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, the National Bank of the Republic of Belarus, OJSC Minsk Gear Plant, participated in the review of technical projects of nuclear installations on issues of their safety, functioning of safety systems. The list of scientific works includes more than 80 works. Author ORCID: 0000-0001-5512-0032; ResearcherID: HKN-7220-2023; SPIN 8838-3030; Author ID (RSCI): 1177269. lobachd@yandex.ru.

Received March 31, 2025. Revised May 26, 2025. Accepted June 16, 2025.



Формализация требований к показателям в задачах многомерного оценивания объектов

© 2025, С.В. Микони

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Создание модели многомерного оценивания объекта включает выполнение требований к каждому оцениваемому показателю. Трудоёмкость этого процесса пропорциональна числу показателей. Требования к показателю делятся на количественные и качественные. Количественные требования формализуются набором логических ограничений на значения показателей. Моделирование ограничений выполняется на языке предикатов первого порядка. Качественные требования учитывают склонности/несклонности лица, принимающего решение, к риску в задачах выбора предпочтительной сущности и в задачах аксиоматической классификации. В отсутствие информации о склонности/несклонности к риску и расплывчатости границ между смежными классами качественные требования моделируются монотонными и немонотонными линейными и кусочно-линейными функциями на шкале показателя. Склонность к риску моделируется функцией ценности/полезности, мало изменяющейся в начале шкалы и сильно изменяющейся в её конце. Функция, моделирующая несклонность к риску, имеет противоположные свойства. Для моделирования расплывчатости границ между смежными классами привлекаются оценочные функции с различной скоростью ухода за границу класса. В работе предлагается минимальный набор признаков, по значениям которых различаются все возможные варианты моделирования количественных и качественных требований к значениям показателей. Наборы признаков для решения задач упорядочения и классификации объектов различаются лишь количественно за счёт необходимости задания требований для каждого класса. Эта информация заносится в таблицу «Признаки / Показатели» табличного процессора, при вводе которой в систему автоматически строится модель оценивания каждого показателя по предъявленным к нему требованиям.

Ключевые слова: объект, класс, выбор, показатель, требования к показателю, оценочная функция, многомерное оценивание, автоматизация.

Цитирование: Микони С.В. Формализация требований к показателям в задачах многомерного оценивания объектов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.324-333. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-324-333.

Финансирование: исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF-2025-0020.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

«Насущнейшая человеческая потребность – искать связующие звенья между отдельными явлениями...»

Уильям Голдинг

Введение

Требования к показателю объекта делятся на количественные и качественные. Качественные требования формализуются набором логических ограничений на значения показателей. К ним относятся: «не менее и не более», «равно», «не менее», «не более». Как частные случаи ограничений «не менее» и «не более» рассматриваются максимизация и минимизация показателей. Моделирование ограничений выполняется на языке предикатов первого порядка. Качественные требования заключаются в учёте важности делений шкалы показателя для

лица, принимающего решение (ЛПР). Качественные требования к значениям показателей моделируются оценочными функциями (ОцФ).

В задачах многокритериальной оптимизации [1-3] экстремальное требование к значению показателя ($y \rightarrow \min / \max$) реализуется линейной (убывающей / возрастающей) ОцФ с областью значений $[0, 1]$. В задачах достижения заданной цели [4] используются кусочно-линейные функции с точкой перелома в целевом (промежуточном) значении на шкале показателя. Отклонение от этой цели моделируется функцией с областью значений $[-1, 1]$. Например, в задаче выполнения плана биполярная ОцФ может иметь область значений $[0, 200\%]$ с промежуточным значением 100%, соответствующим выполнению плана [5].

В теориях ценности и полезности на шкалах показателей строятся нелинейные соответственно униполярные и биполярные ОцФ. Их создание представляет собой трудоёмкую процедуру, что усложняет создание моделей многомерного оценивания (ММО) объектов.

Разнообразие моделей имеет место при решении задач ММО объектов в рамках одной системы. Примером такой системы является система выбора и ранжирования СВИРЬ-М, объединившая решение задач выбора предпочтительного объекта / класса по многим показателям на конечном множестве объектов / классов [6]. Для облегчения решения задачи создания моделей ММО сложных объектов в системе СВИРЬ-М создана библиотека типовых ОцФ. К типовым нелинейным ОцФ отнесены модели, отражающие различные варианты склонности / несклонности ЛПР к риску [7-9].

Применение библиотеки типовых ОцФ упрощает проектирование модели ММО объекта. Для осуществления полной автоматизации построения модели ММО объектов необходимо каждую функцию из библиотеки ОцФ охарактеризовать набором признаков, по которым её можно было бы найти и реализовать для каждого показателя. Требования к показателям целесообразно задавать в специальной таблице «Признаки / Показатели». Это позволяет формировать всю необходимую информацию для создания модели ММО сложного объекта (исходные данные и требования к показателям) в табличном процессоре *MS Excel*. Для этого требуется найти взаимосвязи между предикатами и между всеми ОцФ, применяемыми в задачах упорядочения и классификации объектов.

В работе обосновывается базовый набор признаков и его расширения, позволяющие решать различные задачи ММО объектов с применением библиотеки ОцФ.

1 Формализация требований к показателям оцениваемого объекта

Требования к значениям j -го показателя объекта формализуются следующими логическими ограничениями:

- принадлежность классу $y \in [c_1, c_2]$;
- равенство $y = c$, как частный случай принадлежности классу при $c_1 = c_2 = c$;
- не менее $y \geq c$;
- не более $y \leq c$.

Сложность выбора класса превосходит сложность выбора лучшего объекта на основе отношения порядка. Это утверждение подтверждается представлением интервального ограничения $y_j \in [c_{j,1}, c_{j,2}]$ через логическое произведение двух односторонних (полуинтервальных) ограничений:

$$y_j \in [c_{j,1}, c_{j,2}] = (y_j \geq c_{j,1}) \wedge (y_j \leq c_{j,2}). \quad (1)$$

В задаче оценивания объекта по многим показателям интервальное ограничение $[c_{j,1}, c_{j,2}]$ на шкале $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$ j -го показателя, $y_{j,\min} \leq c_{j,1} \leq c_{j,2} \leq y_{j,\max}$, $j = \overline{1, n}$, относительно других его значений названо нормой [10]. В префиксной записи выражение (1) представляется логическим произведением двух двухместных предикатов [11]:

$$Pr_{\in}(y_j, [c_{j,1}, c_{j,2}]) = Pr_{\geq}(y_j, c_{j,1}) \& Pr_{\leq}(y_j, c_{j,2}) \quad (2)$$

Трёхместный предикат $Pr_{\in}(y_j, [c_{j,1}, c_{j,2}])$ описывает принадлежность значения y_j отрезку $[c_{j,1}, c_{j,2}]$ шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$. Частным случаем интервального ограничения является *точечная* норма $c_{j,1} = c_{j,2} = c_j$. За точечную норму c_j может быть принято среднее значение интервальной нормы $c_j = (c_{j,1} + c_{j,2})/2$. В этом случае предикат принадлежности классу сводится к предикату $Pr_{=} (y_j, c_j)$ равенства точек y_j, c_j на шкале j -го показателя.

В частном случае одна из границ нормы $c_{j,1}$ или $c_{j,2}$ может совпадать с границей шкалы. Графическая трактовка рассмотренных случаев показана на рисунке 1 в виде четырёх вариантов ограничений на значение j -го показателя со шкалой $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$.

Верхний вариант представлен тремя отрезками шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$. Средний отрезок моделирует интервальную норму показателя. Остальные три варианта являются частными случаями интервальной нормы, представленными двумя отрезками шкалы. Третий вариант является графическим представлением первого сомножителя, а четвёртый вариант – второго сомножителя формулы (1).

В этих вариантах запрещённые значения показателя представлены только одним отрезком шкалы, а разрешённые значения расширяют норму до границы шкалы. Если же в предикате $Pr_{\geq}(y_j, c_{j,1})$ нижнюю границу нормы приравнять началу шкалы ($c_{j,1} = y_{j,\min}$), а в предикате $Pr_{\leq}(y_j, c_{j,2})$ верхнюю границу нормы приравнять концу шкалы ($c_{j,2} = y_{j,\max}$) j -го показателя, точка отсчёта соответственно максимизации и минимизации значения показателя совпадёт с границей шкалы, что обозначается как $y_j \rightarrow \max$ и $y_j \rightarrow \min$.

Таким образом, через соотношение границ шкалы и интервальной нормы показателя можно выразить не только четыре логических предиката: принадлежности интервалу, равенства точке и ограничения «не менее» и «не более» заданной величины, но и функции максимизации и минимизации. Это позволяет формализовать все требования к значениям показателя границами шкалы и интервальной нормы.

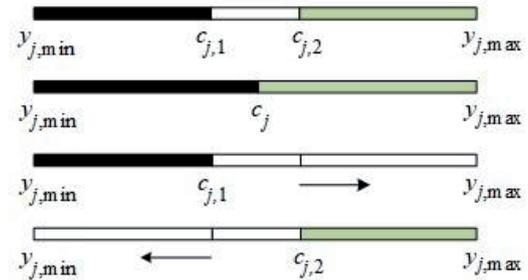


Рисунок 1 – Четыре варианта задания нормы

2 Линейные оценивающие функции показателей

При оценивании объекта по многим показателям возникает задача приведения шкал всех показателей к единой шкале. Универсальной для унификации требований к показателям является шкала $[0, 1]$. Требование к значениям показателя, заданное на исходной шкале, отображается в единую шкалу ОцФ $f(y)$. Её областью определения является шкала $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$ j -го показателя, $j = \overline{1, n}$, а областью значений $[0, 1]$.

Простейшим отображением нормы является прямоугольная характеристическая функция множества точек $[c_{j,1}, c_{j,2}]$. Она изображена пунктиром на рисунке 2. Однако в общем случае границы нормы расплывчаты [12]. В отсутствие информации о законе отклонения от нормы до допустимого значения в меньшую $c_{\text{дом},j}$ и большую $c_{\text{доб},j}$ стороны оно моделируется нисходящими линейными функциями с областями определения $[c_{\text{дом},j}, c_{j,1}]$ и $[c_{j,2}, c_{\text{доб},j}]$. Трапеция, изображённая на рисунке 2, представляет собой композицию трёх ли-

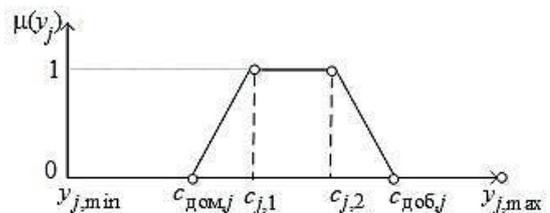


Рисунок 2 – Модель расплывчатой нормы

нейных функций: $f_1(y_j) = a \cdot y_j$; $f_2(y_j) = 1$; $f_3(y_j) = 1 - a \cdot y_j$ с областями определения $[c_{\text{дом},j}, c_{j,1}]$, $[c_{j,1}, c_{j,2}]$ и $[c_{j,2}, c_{\text{доб},j}]$. В случае $c_{j,1} = c_{j,2} = c_j$ область определения функции $f_2(y_j)$ вырождается в точку $c_j = (c_{j,1} + c_{j,2})/2$ (второй вариант шкалы на рисунке 1), а трапеция сводится к треугольнику. Кусочно-линейные функции $f_1(y_j)$ и $f_3(y_j)$ с точками перегиба $f_1(c_j) > 0$ и $f_3(c_j) > 0$ изображены на рисунках 3а и 3б.

Возрастающая функция $f_1(y_j)$ удовлетворяет ограничению $y_j \geq c_{j,1}$, начиная с точки $c_{j,1}$, а убывающая функция $f_3(y_j)$ удовлетворяет ограничению $y_j \leq c_{j,1}$ до точки c_j . В этой точке они удовлетворяют минимальному требованию к значению показателя [11]. При расширении области определения функций $f_1(y_j)$ и $f_3(y_j)$ на всю шкалу ($c_{j,1} = y_{j,\text{min}}$ для $f_1(y_j)$ и $c_{j,2} = y_{j,\text{max}}$ для $f_3(y_j)$) они сводятся к целевым функциям $y_j \rightarrow \text{max}$ и $y_j \rightarrow \text{min}$ задач оптимизации.

В качестве примера на рисунке 4 показана возрастающая кусочно-линейная функция (верхний график), порождённая на шкале $[0, 10]$ полуинтервальным ограничением $y_j \geq 4$.

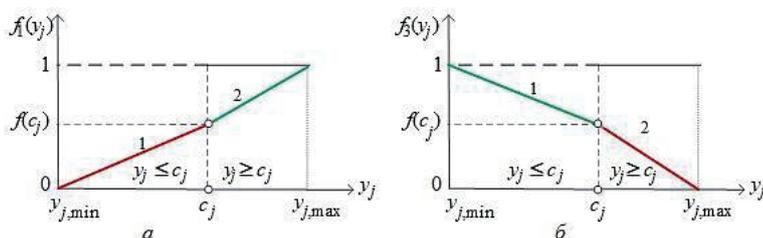


Рисунок 3 – а) оценочная функция f_1 ,
б) оценочная функция f_3

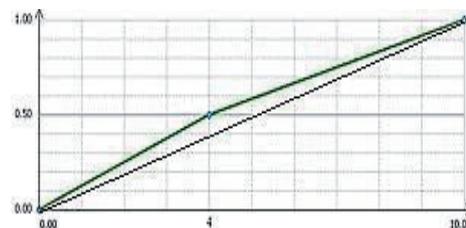


Рисунок 4 – Кусочно-линейная и линейная оценочные функции

Точке перегиба $c_j = 4$ соответствует минимальный уровень требования $f_1(c_j) = 0,5$ к значениям j -го показателя. При сведении точки перегиба к нулю ($c_j = 0$) кусочно-линейная функция преобразуется в линейную ОцФ $y_j \rightarrow \text{max}$. Аналогичным образом порождаются графики убывающей функции $f_3(y_j)$.

3 Нелинейные оценивающие функции показателей

Приведённые кусочно-линейные ОцФ моделируют безразличие ЛПР к делениям отрезков шкалы показателя. Оно проявляется в пропорциональном либо обратно пропорциональном изменении значений ОцФ с увеличением значений показателя. Эти функции не учитывают склонность / несклонность ЛПР к риску [9]. Склонность ЛПР к риску проявляется в медленном, а несклонность – в быстром увеличении ценности делений на начальном участке шкалы показателя. Эти свойства ЛПР моделируются формулой:

$$v(y_j) = ((y_j - y_{j,\text{min}}) / (y_{j,\text{max}} - y_{j,\text{min}}))^t \quad (3)$$

Параметр $t > 1$ (парабола) моделирует склонность, а $t < 1$ (обратная парабола) – несклонность ЛПР к риску. В качестве примера на рисунке 5¹ показан график ОцФ $v(y_j) = y_j^2$.

Сочетание склонности ЛПР к риску до точки c и несклонности – после неё моделируется логистической функцией. На рисунке 6 показана возрастающая логистическая функция.

Свойство нелинейности востребовано также применительно к немонотонным ОцФ, какими являются функции принадлежности классу. Линейные фронты трапеции (рисунок 2), моделирующие меру отклонения значения показателя от границы нормы (класса), применяются в отсутствие информации об отношении ЛПР к этим отклонениям. Поскольку фронты трапеции являются монотонными функциями, к ним применимы типы функций, изложенные выше, а именно, парабола, обратная парабола и логистическая функция. На рисунках 7-9 изображены функции принадлежности классу с соответствующими фронтами.

¹ Оценочные функции, приведённые на рисунках 5-10, из библиотеки ОцФ системы СВРЬ-М.

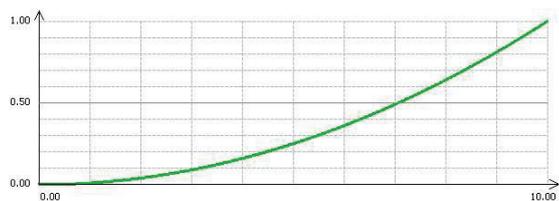


Рисунок 5 – Парабола как возрастающая выпуклая оценочная функция показателя

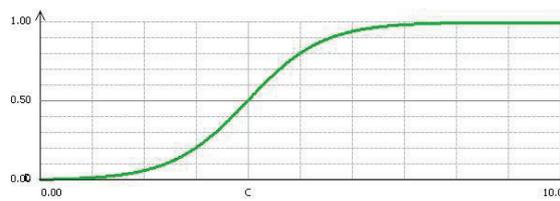


Рисунок 6 – Возрастающая логистическая функция показателя

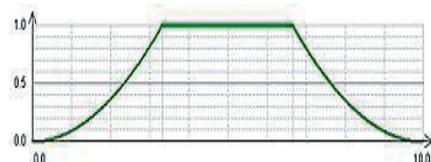


Рисунок 7 – Функция принадлежности классу с параболическими фронтами

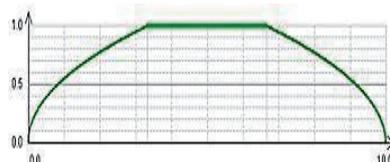


Рисунок 8 – Функция принадлежности классу с фронтами обратной параболы

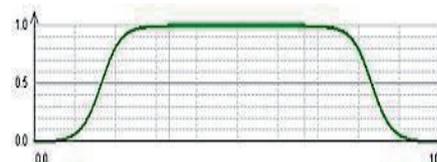
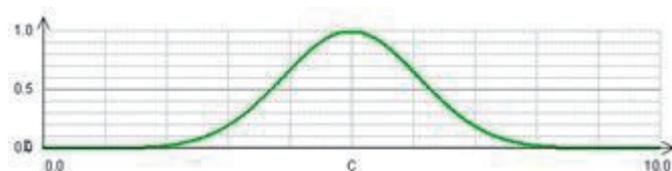


Рисунок 9 – Функция принадлежности классу с логистическими фронтами



Нелинейный вариант точечной нормы ($c_1 = c_2$) на рисунке 10 моделируется колоколом – функцией Гаусса.

Рисунок 10 – Функция принадлежности классу с точечной нормой

4 Кодирование требований к значениям показателей

Информацию кодируют с разными целями: от удобства представления до скрытия содержания [13, 14]. В данной работе объектом кодирования являются требования к значениям показателей оцениваемого объекта. С точки зрения количественных требований к значению показателя наиболее сложным является интервальное ограничение. Остальные требования сводятся к его частным случаям. Такая взаимосвязь требований позволяет принять интервальное ограничение за исходное требование и сформулировать правила вывода из него всех остальных.

В таблице 1 задан способ кодирования предикатов через соотношение границ шкалы $[a, b]$ и интервальной нормы $[c_1, c_2]$ согласно рисунку 1. Переменные в строках таблицы 1 расположены в направлении возрастания значений показателя. Первые четыре строки отражают графическое представление предикатов на рисунке 1. В строках 5 и 6 предикаты $y \geq c_1$, $c_1 = a$, и $c_2 \leq y$, $c_1 = b$ играют роль функций: $y \rightarrow \max$ и $y \rightarrow \min$.

Таблица 1 – Кодирование предикатов

$Pr_{\in} (y, [c_1, c_2])$	a	c_1	c_2	b
$Pr_{=} (y, c)$	a	c	c	b
$Pr_{\geq} (y, c_1)$	a	c_1		b
$Pr_{\leq} (y, c_2)$	a		c_2	b
$f(y) \rightarrow \max$	a	a		b
$f(y) \rightarrow \min$	a		b	b

В таблице «Признаки / Показатели» переменные a, b, c_1, c_2 обозначаются следующим образом: a – минимальная граница шкалы (МинГШ); b – максимальная граница шкалы (МаксГШ); c_1 – нижняя граница нормы (НГН); c_2 – верхняя граница нормы (ВГН).

Качественные требования к показателям реализуются через выбор ОцФ. Наиболее сложной является составная немонотонная функция принадлежности классу. В её состав входят восходящая и нисходящая монотонные функции. В качестве типовых нелинейных функций

приняты парабола (пар), обратная парабола (о.пар) и логистическая (лог) функции. Для моделирования принадлежности точечной норме дополнительно используется функция Гаусса.

Таким образом, для выбора нужной ОцФ необходимо знать класс ОцФ (линейная / нелинейная) и тип нелинейной функции («пар», «о.пар», «лог», «Гаусса»).

В таблице 2 приведены примеры кодирования шести предикатов в шкале $[a, b] = [0, 10]$.

В строках НГН и ВГН показателя П1 заданы границы нормы $[c_1, c_2] = [4, 6]$. В качестве ОцФ показателю П1 задана функция принадлежности классу с нелинейными (нл) логистическими фронтами (рисунок 9). Для показателя П2 в строках НГН и ВГН задана средняя точка 5 шкалы $[0, 10]$. В качестве ОцФ показателю П2 задана функция Гаусса (рисунок 10).

Применение одной значащей промежуточной переменной c_1 или c_2 на шкале показателя $[a, b]$ позволяет породить лишь монотонные ОцФ, поскольку используется только для задания их направленности (возрастания / убывания).

Полуинтервальные ограничения ≥ 4 и ≤ 6 кодируются одной из границ интервала $[4, 6]$. Этим точкам на шкалах показателей соответствуют точки перегиба кусочно-линейных ОцФ. Возрастающая кусочно-линейная функция показателя П3, реализующая ограничение $y_j \geq 4$, приведена на рисунках 3а и 4. Убывающая кусочно-линейная функция показателя П4, реализующая ограничение $y_j \leq 6$, приведена на рисунке 3б.

Кодирование показателей П5 и П6 иллюстрирует переход от ограничений \geq и \leq к их максимизации и минимизации приравниванием c_1 и c_2 соответственно к нижней и верхней границам шкалы $[0, 10]$. ОцФ П5 и П6 задана нелинейность – восходящая парабола показателю П5 (рисунок 5) и нисходящая обратная парабола показателю П6.

Пустая строка «Вес» в таблице 2 означает равенство важности показателей. В противном случае задаются веса показателей в зависимости от применяемого метода оценивания – либо в долях единицы, либо натуральными числами, начиная с единицы.

С помощью предложенного кодирования ОцФ на основе предикатов «не менее» и «не более» могут породиться монотонные ОцФ: пять базовых ОцФ (линейная, парабола, обратная парабола, логистическая и функция Гаусса) и три составных функции (кусочно-линейная, парабола-обратная парабола, обратная парабола-парабола). На основе предикатов $Pr_{\in}(y, [c_1, c_2])$ и $Pr_{=}(y, c)$ порождаются по пять немонотонных ОцФ (см. рисунки 2, 7-10): четыре составных функции (линейная, парабола, обратная парабола, логистическая) и одна элементарная ОцФ (функция Гаусса).

5 Кодирование классов

Границы классов могут совпадать, не совпадать и пересекаться. На рисунке 11 показаны варианты соотношения границ на примере трёх классов: «Ниже среднего» (НС), «Средний» (С), «Выше среднего» (ВС). Пересечение границ смежных классов означает частичную принадлежность показателя каждому из них, которая моделируется монотонно восходящим и нисходящим фронтами функции принадлежности (нижний вариант размещения границ).

В таблице 3 границы классов (норм) помечены именами (НС, С, ВС). Столбцы таблицы отражают границы трёх вариантов соотношения классов, изображённых на рисунке 11.

Таблица 2 - Пример кодирования требований к показателям

	П1	П2	П3	П4	П5	П6
МинГШ	0	0	0	0	0	0
МаксГШ	10	10	10	10	10	10
НГН	4	5	4		0	
ВГН	6	5		6		10
Линейность	нл	нл	л	л	нл	нл
Функция	лог	Гаусса			пар	о.пар
Вес						
	[4, 6]	равно 4	≥ 4	≤ 6	$\rightarrow 10$	$\rightarrow 0$

Общими для всех классов являются границы шкалы (верхние две строки таблицы). При задании числа классов по изложенной исходной информации автоматически могут строиться функции принадлежности классам каждого показателя.

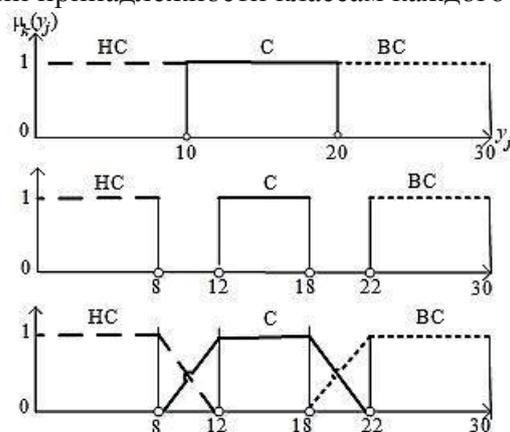


Рисунок 11 – Варианты границ между классами

Таблица 3 - Задание границ шкал и классов

Шкалы и классы	Общие границы	Нет общих границ	Нечёткие границы
МинГШ	0	0	0
МаксГШ	30	30	30
НГК НС	0	0	0
ВГК НС	10	8	12
НГК С	10	12	8
ВГК С	20	18	22
НГК ВС	20	22	18
ВГК ВС	30	30	30

Важным частным случаем классификации является определение отклонений от нормы в меньшую и большую стороны по величине функции принадлежности [15]. Ввиду зависимости классов «Меньше нормы» (МН) и «Больше нормы» (БН) от класса «Норма» (Н) создание функций принадлежности этим классам не требует оформления их как отдельных классов. Для создания их функций принадлежности используются параметры, заданные для класса «Норма».

На примере показателя «Число ошибок» в таблице 4 приведена информация, востребованная в задаче оценивания отклонения от нормы. Для моделирования расплывчатости границ между классом Н и классами МН и БН таблица 4 дополнена строками – ДОМ (допустимое отклонение от нормы в меньшую сторону) и ДОБ (допустимое отклонение от нормы в большую сторону).

Для вычисления индикатора состояния объекта [15] в таблицу 4 введена строка «Лучший класс» с возможными значениями «Норма», «Меньше нормы» и «Больше нормы». Эта информация востребована для оценивания улучшаемых показателей, отклонение которых в одну сторону от нормы является желательным.

Таким образом, кодирование требований к показателям объекта (см. пример в таблице 2), можно считать универсальным средством для построения моделей ММО объектов.

Заключение

Формализация количественных и качественных требований к значениям показателей позволила найти минимальный набор признаков, необходимый и достаточный для различения всех рассмотренных видов ОцФ, применяемых при ММО сложных объектов. Все варианты количественных требований представлены как частные случаи задания принадлежности классу на шкале показателя. Кодирование качественных требований к значениям показателей позволило различить все ОцФ.

Предложенный «язык» для обозначения ОцФ позволил формировать требования к значениям показателей в виде таблицы «Признаки / Показатели». Для этой цели выбран таблич-

Таблица 4 – Требования к показателю в задаче оценивания отклонения от нормы

Шкала	Число ошибок
МинГШ	0
МаксГШ	3
НГК Норма	1
ВГК Норма	1
ДОМ	0,5
ДОБ	1,5
Линейность	нл
Фронт	лг
Лучший класс	Меньше нормы

ный процессор *MS Excel*. В системе СВІРЬ-М модель ММО сложного объекта создается автоматически после ввода таблицы «Признаки / Показатели».

Результаты исследования позволили значительно снизить трудоёмкость создания модели ММО объекта, а подготовку исходных данных (таблица «Объекты / Показатели») и условий задачи (таблица ««Признаки / Показатели»») вынести за пределы системы СВІРЬ-М на табличный процессор *MS Excel*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [2] Ehrgott M., Gandibleux X. A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization. *OR Spektrum*, 2000. 22, P.425–460.
- [3] Yamamoto Y. Optimization over the efficient set: Overview. *Journal of Global Optimization*, 2002, 22(1), P.285–317. DOI: 10.1023/A:1013875600711.
- [4] Wierzbicki A.P. The Use of Reference Objectives in Multiobjective Optimization. In: Fandel G., Gal T. (eds) Multiple Criteria Decision Making Theory and Application. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. 1980. Vol.177. P.468-486.
- [5] Микони С.В., Тихомиров В.О., Тришанков В.В., Сорокина М.И. Определение рейтинга подразделений железной дороги по итогам выполнения планов // Труды X-й СПб. конференции «РИ-2004». 24-26.10.2006. СПб.: СПОИСУ. 2006. С.266-273.
- [6] Микони С.В., Соколов Б.В., Бураков Д.П. Система выбора и ранжирования альтернатив СВІРЬ-М: теоретические основы и практика применения. *Онтология проектирования* 2024. Т.14, №3(53). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-3-167-180.
- [7] Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, Wiley. 1976. 569 p.
- [8] Нейман Д., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. Пер. с англ. Н.Н. Воробьева. М.: Наука, 1970. 708 с.
- [9] Фишберн П.С. Теория полезности для принятия решений / Пер. с англ. В.Н. Воробьевой, А.Я. Кируты; Под ред. Н.Н. Воробьева. М.: Наука, 1978. 352 с.
- [10] Карпович В.Н. Норма и описание как категории эпистемологии: рациональность как вид и основание нормативности. *Сибирский философский журнал*. 2013. Т.11. №4. С.5-11. EDN: PZJFEP.
- [11] Ершов Ю.Л., Палютин Е.А. Математическая логика. М.: Физматлит. 2011. 356 с.
- [12] Zadeh L.A. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: selected papers. World Scientific Press. 1996. 826 p.
- [13] Верещагин Н.К., Щепин Е.В. Информатика, кодирование и предсказание. М.: Фонд математического образования и просвещения. 2016. 240 с.
- [14] Белоногов Г.Г., Новоселов А.П. Автоматизация процессов накопления, поиска и обобщения информации. М.: Наука, 2017. 256 с.
- [15] Микони С.В. Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.

Сведения об авторе



Микони Станислав Витальевич, 1936 г. рождения. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова в 1963 г., д.т.н. (1992), профессор (1994), ведущий научный сотрудник СПИИРАН. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (1998). В списке публикаций 360 работ, из них две монографии и семь учебных пособий в области технической диагностики, дискретной математики, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. smikoni@mail.ru.

Поступила в редакцию 23.01.2025, после рецензирования 16.06.2025. Принята к публикации 30.06.2025.



Formalization of indicator requirements in multidimensional evaluation of objects

© 2025, S.V. Mikoni

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

The development of a multidimensional evaluation model for an object involves meeting specific requirements for each assessed indicator. The complexity of this process is proportional to the number of indicators. The requirements for an indicator are divided into quantitative and qualitative ones. Quantitative requirements are formalized as a set of logical constraints on indicators values. These constraints are modeled using first-order predicate logic. Qualitative requirements account for the decision maker's inclination or disinclination toward risk in tasks involving the selection of a preferred option and in axiomatic classification problems. When information about risk preferences is unavailable, and the boundaries between adjacent classes are vague, qualitative requirements are modeled using monotonic or non-monotonic linear and piecewise-linear functions defined over the indicator's scale. The propensity to take risks is represented by a value or utility function that changes slowly at the lower end of the scale and more rapidly toward the upper end. Conversely, risk aversion is modeled by a function with the opposite behavior. To reflect the fuzziness of class boundaries, evaluation functions with varying rates of transition across class borders are employed. The paper proposes a minimum set of features that distinguish all possible approaches to modeling both quantitative and qualitative requirements for indicator values. The sets of features for solving the problems of ordering and classifying objects differ only quantitatively due to the need to specify requirements for each class. This information is entered into the "Features / Indicators" table of the spreadsheet processor; once imported into the system, an assessment model for each indicator is automatically generated based on the specified requirements.

Keywords: *object, class, choice, indicator, indicator requirements, evaluation function, multidimensional evaluation, automation.*

Citation: Mikoni SV. Formalization of indicator requirements in multidimensional evaluation of objects [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 324-333. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-324-333.

Financial support: Research carried out on this topic was carried out under budget topic FFZF-2025-0020.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and table

Figure 1 – 4 variants for setting the norm

Figure 2 – Fuzzy Norm Model

Figure 3 – a) evaluation function f_1 , b) evaluation function f_3

Figure 4 – Piecewise linear and linear evaluation functions

Figure 5 – Increasing convex evaluation function of the indicator

Figure 6 – Increasing logistic function of the indicator

Figure 7 – Class membership function with parabolic fronts

Figure 8 – Class membership function with inverse hyperbolic fronts

Figure 9 – Class membership function with logistic fronts

Figure 10 – Class membership function with point norm

Figure 11 – Variants of boundaries between classes

Table 1 – Predicate coding

Table 2 – Example of coding indicator requirements

Table 3 – Setting the boundaries of scales and classes

Table 4 – Indicator requirements in assessing deviation from the norm

References

- [1] **Samarsky AA, Mikhailov AP.** Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples. 2nd ed., corrected. [In Russian] Moscow: Fizmatlit, 2001. 320 p.
- [2] **Ehrgott M., Gandibleux X.** A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization. OR Spektrum, 2000. 22, 425–460.
- [3] **Yamamoto Y.** Optimization over the efficient set: Overview. Journal of Global Optimization, 2002; 22(1): 285–317. DOI: 10.1023/A:1013875600711.
- [4] **Wierzbicki A.P.** The Use of Reference Objectives in Multiobjective Optimization. In: Fandel G., Gal T. (eds) Multiple Criteria Decision Making Theory and Application. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Vol. 177. Springer, Berlin, Heidelberg. 1980. pp. 468-486.
- [5] **Mikoni SV, Tikhomirov VO, Trishankov VV, Sorokina MI.** Determining the ranking of railway divisions based on plan fulfillment results [In Russian]. Proceedings of the 10th St. Petersburg conference "RI-2004". 24-26.10.2006. St. Petersburg: SPOISU. 2006. P.266-273.
- [6] **Mikoni SV, Sokolov BV, Burakov DP.** SVIR-M, selection and ranking alternatives system: theoretical foundations and practice of application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-167-180.
- [7] **Keeney RL, Raiffa H.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, Wiley. 1976. 569 p.
- [8] **Neumann JV, Morgenstern O.** Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, NJ. Princeton University Press. 1953.
- [9] **Fishburne PS.** Utility theory for decision making [In Russian]. Transl. from English V.N. Vorobyova, A.Ya. Kiruti; Ed. N.N. Vorobyova. Moscow: Nauka, 1978. 352 p.
- [10] **Karpovich VN.** Norm and description as categories of epistemology: rationality as a type and basis of normativity [In Russian]. *Siberian Journal of Philosophy*. 2013; 11(4): 5-11.
- [11] **Ershov YuL, Palyutin EA.** Mathematical logic [In Russian]. Moscow: Fizmatlit. 2011. 356 p.
- [12] **Zadeh LA.** Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: selected papers. World Scientific Press. 1996. 826 p.
- [13] **Vereshchagin NK, Shchepin EV.** Information, coding and prediction [In Russian] Moscow: Foundation for Mathematical Education and Enlightenment, 2016. 240 p.
- [14] **Belonogov GG, Novoselov AP.** Automation of processes of accumulation, search and generalization of information. [In Russian] Moscow: Nauka, 2017. 256 p.
- [15] **Mikoni SV.** Modeling deviations of object quality indicators from the norm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.

About the author

Stanislav Vitalievich Mikoni (b. 1936) graduated from the Obraztsov Institute of Engineers of Railway Transport (Leningrad) in 1963, D. Sc. Eng. (1992), Professor (1994), Leading Researcher of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence (1998). He is the author and a co-author of 360 publications, including 2 monographs and 7 textbooks in the field of technical diagnostic, discrete mathematics, system analyses, artificial intelligence, and decision making theory. AuthorID (РИИЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. smikoni@mail.ru.

Received January 23, 2025, Revised June 16, 2025. Accepted June 30, 2025.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-334-350



Обнаружение аномальных транзакций криптовалюты с помощью нейронных сетей и онтологий

© 2025, И.В. Котенко ✉, Д.С. Левшун, К.Н. Жернова, А.А. Чечулин

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Выполнен поиск эффективного подхода к выявлению аномалий в транзакциях криптовалют с помощью нейронных сетей (свёрточных, глубоких, управляемых рекуррентных блоков) и сравнение с другими подходами, применяемыми к задаче поиска нелегальных транзакций в сети криптовалют. Проведён анализ работ в областях анализа данных транзакций в сети криптовалют, визуализации данных для анализа транзакций и поиска аномальных транзакций с помощью компьютерного зрения. Определена предметная область исследования. Проблема выявления аномалий в транзакциях криптовалют основывается на том, что в наборах данных транзакций нет прямых указаний на личность отправителя и получателя. Актуальность и значимость работы заключается в предлагаемом в ней способе выявления с высокой точностью аномальных транзакций в режиме, приближенном к реальному времени. Выполнены экспериментальные исследования набора данных транзакций криптовалют с помощью нейронных сетей и не нейросетевых классификаторов с последующим сравнением полученных результатов с другими исследованиями. Эксперименты показали, что управляемые рекуррентные блоки позволили справиться с задачей лучше других сравниваемых нейросетевых подходов: аккуратность 0.94, точность 0.95, полнота 0.93 и F -мера 0.94, что доказывает высокую эффективность предложенной модели. Однако данная модель уступает традиционным алгоритмам машинного обучения, таким как оптимизированный распределённый градиентный бустинг. Новизной предложенного подхода является то, что он основан на анализе статистической информации о графе транзакций и использовании для этого технологии глубокого обучения и градиентного бустинга. Областью применения предложенного подхода является создание программных средств для поиска нелегальных транзакций криптовалюты в системах информационной безопасности и в задачах цифровой криминалистики.

Ключевые слова: поиск аномалий, компьютерная безопасность, машинное обучение, нейронные сети, визуальный анализ данных, криптовалюта, онтологии.

Цитирование: Котенко И.В., Левшун Д.С., Жернова К.Н., Чечулин А.А. Обнаружение аномальных транзакций криптовалюты с помощью нейронных сетей и онтологий. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.334-350. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-334-350.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке совместного гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 24-21-20058, <https://rscf.ru/project/24-21-20058/>.

Вклад авторов: Котенко И.В. – постановка проблемы, общее руководство работой и планирование экспериментов; Левшун Д.С. – проведение эксперимента и интерпретация результатов; Жернова К.Н. – поиск и описание набора данных для эксперимента, обзор релевантных работ; Чечулин А.А. – разработка концепции исследования, подготовка набора данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Криптовалюта, как удобный способ осуществления платежей без участия посредников, имеет недостатки, в т.ч. в контексте информационной безопасности. Использование криптовалют имеет устойчивый рост, в т.ч. и преступлений, связанных с их использованием. В 2022 году был зафиксирован очередной всплеск киберпреступлений с их участием, а в 2023 и 2024 годах уровень таких инцидентов оставался высоким¹. Таким образом, данная область требует принятия как дополнительных законодательных мер², так и новых решений в области информационной безопасности.

Выявление аномальных транзакций в режиме реального времени остаётся сложной задачей. В связи с этим обнаружение нелегальных цепочек транзакций, как правило, осуществляется постфактум и становится предметом исследования в области цифровой криминалистики. Основные методы выявления подозрительных транзакций в цифровой криминалистике включают: применение алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), мониторинг сетевой активности и анализ графов транзакций или пользователей.

В данной работе предложен подход к обнаружению нелегальных транзакций, основанный на анализе статистической информации о графе транзакций и использовании для этого технологии глубокого обучения и градиентного бустинга над решающими деревьями.

1 Онтологическая схема связей

Для описания предлагаемого подхода необходимо очертить границы предметной области (ПрО) в терминах понятий, их атрибутов и взаимосвязей. Это позволит сформировать концептуальную модель ПрО, которая может быть использована в т.ч. для решения других подобных задач. Схема взаимосвязей сущностей, относящихся к данной ПрО, и их атрибутов приведена на рисунке 1.

Криптовалюта – цифровая валюта, которая создаётся с помощью криптографических алгоритмов и содержится в специальном виртуальном *кошельке* пользователя, посредством которого можно совершать оплату или на который можно принимать средства, используя *приватный ключ* для авторизации. Цифровая валюта создаётся посредством криптографических вычислений на основе *хэш-функции*. Основными атрибутами криптовалюты являются *хэш* (результат вычислений с помощью хэш-функции), а для кошелька атрибутами являются *идентификатор* владельца (отправителя или получателя) и его *приватный ключ*.

Хэш-функция транзакции – специальный алгоритм для вычисления определённой буквенно-цифровой последовательности заданной длины на основе данных о транзакциях в предыдущем блоке. Полученная буквенно-цифровая последовательность называется *хэш*, который создаётся с помощью хэш-функции, и при его вычислении создаётся криптовалюта (отношения 1 и 2 см. рисунок 1).

Сеть криптовалют – сеть адресов кошельков пользователей, по которой могут осуществляться транзакции криптовалюты. С одной стороны, сеть обеспечивает быстроту и безопасность денежных переводов, с другой – позволяет использовать криптовалюту для оплаты нелегальных схем ввиду сложности выявления юридической личности отправителя и получателя.

Транзакция криптовалюты – операция платежа, получения или обмена криптовалюты. Осуществление транзакции криптовалюты происходит следующим образом³: начало транзакции, проверка приватного ключа, отправка/получение, подтверждение правильности транзакции, завершение транзакции. Атрибуты транзакции – это *идентификаторы отправителя и получателя*, *интервал* между транзакциями и *количество транзакций*. *Псевдонимность* криптовалютных транзакций достигается тем, что они записываются с использованием криптографических адресов – случайных наборов символов, выступающих в роли цифровых идентификаторов пользователей.

¹ 2024 Crypto Crime Trends: Illicit Activity Down as Scamming and Stolen Funds Fall, But Ransomware and Darknet Markets See Growth. 2024. January 18, 2024. <https://www.chainalysis.com/blog/2024-crypto-crime-report-introduction/>.

² Лузгин Андрей. В России готовятся принять регулирование криптовалют. Что нужно знать. 17 июля 2024 г. <https://www.rbc.ru/crypto/news/6697b1f79a794796605a1a81>.

³ Что такое криптовалютная транзакция и как она работает. 18 декабря 2024 г. <https://cryptomus.com/ru/blog/what-is-a-cryptocurrency-transaction-and-how-does-it-work>.

Приватный ключ – код, который требуется для авторизации в сети криптовалют для отправки и получения криптовалюты.

Паттерн транзакций – набор характеристик, присущий цепочке транзакций: интервал между транзакциями и их количество.

Нормальная транзакция – транзакция, характеристики которой соответствуют типичным значениям, присущим законным операциям в сети криптовалют.

Аномальная транзакция – транзакция, характеристики которой отличаются от обычных характеристик транзакций. Аномальные транзакции могут оказаться нелегальными.

Нелегальная транзакция – аномальная транзакция, которая направлена на финансирование незаконной деятельности.

Отмывание денег на основе криптовалюты – совершение транзакций криптовалюты для придания правомерного вида владению, пользованию или распоряжению имуществом, приобретённым преступным путём, либо помощи лицу, совершившему преступление, избежать уголовной ответственности за его совершение.

Блокчейн – это технология выстраивания цепочки *блоков*, в которых совершаются вычисления посредством криптографических алгоритмов, и с помощью хэш-функции шифруется информация о предыдущем блоке. *Децентрализованность* обеспечивается принципами технологии блокчейна: сеть криптовалюты представляет собой распределённый реестр данных, поддерживаемый в актуальном состоянии. Особенностью блокчейна является то, что каждый последующий блок содержит информацию о предыдущем – в частности, хэш-значение, вычисленное на основе данных о транзакциях, зафиксированных в предыдущем блоке.

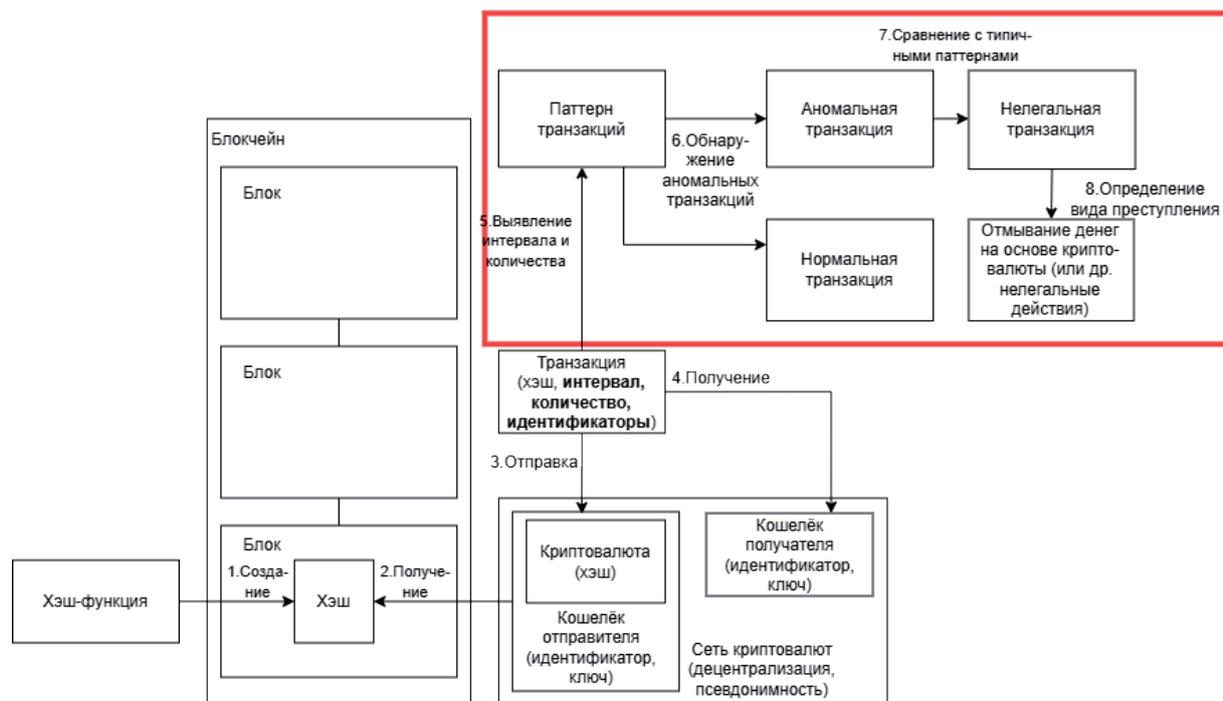


Рисунок 1 – Онтологическая схема связей в области обнаружения аномальных транзакций криптовалюты

На рисунке 1 ключевые понятия представлены в виде прямоугольных блоков; в круглых скобках указаны значимые их атрибуты. Взаимосвязи между понятиями обозначены стрелками и пронумерованы для удобства обращения к ним. Отношения иерархической принадлежности одного понятия другому отражены графически с помощью вложенности блоков (например, хэш принадлежит блоку, блок – блокчейну; криптовалюта – виртуальному кошельку, а кошелек – сети криптовалют).

В большом прямоугольнике сверху справа показан участок области используемого в данной работе подхода, который основан на отношениях 5–8. Цель подхода заключается в выявлении аномальных транзакций на основе их статистических данных (отношение 6). Под статистическими данными транзакции понимаются данные, которые вычислены на основе таких важных для полученной схемы атрибутов транзакции, как интервал между транзакци-

ями, количество транзакций и идентификаторы отправителя и получателя. Чтобы обнаружить аномалию, необходимы статистические данные о транзакции, поэтому важно отношение 5 – выявление интервала между транзакциями и их количества. При этом не любая аномальная транзакция может оказаться нелегальной. Для того чтобы достоверно определить её нелегальность, нужно сравнить её поведение с паттернами, типичными для нелегальных транзакций (отношение 7). Отношение 8 показывает, что последующий анализ позволит определить конкретный тип операции с криптовалютой.

2 Релевантные работы

Приведён анализ литературы, связанной с отслеживанием незаконных транзакций биткоина с помощью машинного обучения (МО), в т.ч. посредством нейронных сетей (НС). Представлены работы в данной области, в которых изучаются методы обнаружения легализации доходов, полученных преступным путём. Криптовалюта используется в разных преступных схемах, среди которых: финансирование терроризма¹; шантаж, торговля на чёрном рынке оружием и нелегальными препаратами, финансовые пирамиды [1]; распространение вредоносного программного обеспечения [2] и т.д. Для определения степени легальности транзакции существуют реестры легитимных и нелегитимных адресов^{4, 5}, однако количество адресов постоянно увеличивается, что ограничивает эффективность подобных списков.

Для обнаружения аномалий в сетях криптовалют используются четыре основных метода: поведенческий анализ на основе построения графа транзакций и применение алгоритмов МО; визуальный анализ графа транзакций; статистический анализ на основе проверки выполнения наборами данных определённого правила; применение методов МО к несвязанным данным о транзакциях. Часто эти методы объединяются.

Большая часть работ, в которых исследовалась возможность обнаружения преступлений, связанных с криптовалютой, посвящена способам их обнаружения с помощью методов ИИ, таких как использование различных классификаторов.

В [1] используются ориентированные графы для отображения графов сети биткоина, основываясь на предположении, что характеристики подграфов этого графа, содержащих адреса, расположенные близко к какому-либо адресу, отражают некоторую информацию об этом адресе. Применяются ансамблевые методы. Так, в [3] применено ансамблевое обучение путём объединения моделей МО, таких как деревья решений, наивный байесовский классификатор, k ближайших соседей (k -NN) и случайный лес (*Random Forest*, *RF*) для обнаружения мошенничества в транзакциях биткоина. В целях балансировки данных используется генерация синтетических данных и случайное удаление данных. В [4] предложена модель из ансамбля деревьев решений, которая обучается на отличительных признаках различных групп нелегальных пользователей с целью отличить их от законных.

В [5] использовано построение графа транзакций, по которому определяются пути переводов криптовалюты с одного адреса на другой. Этот метод включает сравнение адресов со списком, представленным как результат кампаний по борьбе с киберпреступностью. В [6] применены неразмеченные данные, приближенные к реальной ситуации, когда нет доступа к ярлыкам. Используются методы обучения без учителя для обнаружения транзакций, связанных с отмыванием денег.

Исследование [7] посвящено обнаружению программ-вымогателей. Для этой цели проводится сравнение эффективности логистической регрессии, алгоритма *RF* и экстремального градиентного бустинга, при этом последняя модель оказалась наиболее точной.

⁴Chainabuse. <https://www.chainabuse.com>.

⁵WalletExplorer. *Smart Bitcoin block explorer*. <https://www.walletexplorer.com>.

В [8] предложена модель обнаружения кражи биткоинов на основе признаков транзакций при краже криптовалюты. Сравнивались различные алгоритмы, основанные на обучении с учителем и без него. Результаты использования методов на основе обучения с учителем в целом оказались лучше. В качестве набора данных использовался направленный граф транзакций, где вершины – это хэш транзакции, рёбра – потоки криптовалюты, вес ребра – количество переведённой криптовалюты. При этом временной интервал между созданием транзакции и переводом максимально большого количества криптовалюты был взят в качестве основного признака.

Система обнаружения мошенничества, представленная в [9], основана на алгоритмах *RF* и градиентного бустинга. С помощью построенной модели, обученной на основе данных, содержащих паттерны мошеннических транзакций, спроектирована система, которая может прогнозировать связанность новых транзакций с мошенничеством. Рассматриваются такие мошеннические схемы, как, например, возможность потратить одни и те же биткоины дважды [10].

Исследуется также выявление бесфайловых атак для осуществления майнинга [11]. В предложенном классификаторе используются модели: метод опорных векторов, *k-NN* и *RF*.

Часть работ посвящена поиску аномалий в транзакциях с помощью искусственных НС. Чаще всего подобные методы основаны на анализе графа транзакций. Для обнаружения незаконных транзакций используются графовые НС и графовые сети на внимании [12].

В [13] для анализа поведения транзакций биткоина используются графовые НС, в которые добавляются линейные слои. Предложено использовать модифицированную версию графовой свёрточной сети, которая способна работать с ориентированными графами.

В [14] для выявления отличительных черт транзакций программ-вымогателей используются алгоритмы ИИ, такие как НС и оптимизируемые деревья решений.

В [15] собран набор данных и построен граф транзакций, к которому применён алгоритм глубокого обучения, основанный на графовой свёрточной сети. В [16] используется метод, основанный на графовой свёрточной сети [17], позволяющий осуществить поиск схожих узлов на одном уровне вложенности с получением векторов, в которые входят такие узлы, а с ними можно обращаться как с отдельным признаком данных. Затем эти признаки вместе с полученными векторами классифицируются с помощью алгоритма *RF*.

Для нарушения анонимности транзакций биткоина в целях обнаружения нелегальных транзакций в [18] используется НС обратного распространения ошибки.

Работа [19] включает поведенческий анализ данных о криптовалюте, т.е. обнаружение подозрительных адресов, основываясь на структуре транзакций и некоторых их признаках — поиск адресов, совпадающих с паттерном. Примером такого признака может служить большое количество входящих и исходящих адресов. Для повышения точности предполагается использование визуализации при устранении ложноположительных результатов.

В большинстве работ визуализация используется в качестве вспомогательного средства для иллюстрации применяемых методов (например, графовых НС), а не как инструмент обнаружения аномалий [20, 21]. В [22] данные о транзакциях преобразуются в графовую структуру, после чего возможен визуальный анализ полученных графов с целью выявления подозрительных паттернов. Так, мошеннические кошельки, как правило, характеризуются множеством входящих транзакций и одной выходящей, тогда как для легитимных кошельков типично наличие нескольких выходных транзакций.

В [23] применены методы визуализации для анализа сетей транзакций. В [24] графы транзакций визуализируются, а затем полученные изображения анализируются различными алгоритмами. В работах [25–28] используются различные методы визуализации к выявлению мошенничества в сфере мобильных денежных переводов.

Анализ показывает, что в большинстве работ применяется граф транзакций. Однако использование графовой модели может быть неэффективно в системах, функционирующих в режиме реального времени. В связи с этим актуальной задачей является создание подхода, способного прогнозировать легитимность транзакции на основе данных об одной отдельной операции, без необходимости формирования полной графовой структуры.

3 Предлагаемый метод

Ключевыми характеристиками криптовалютного обмена являются *децентрализованность* и *псевдонимность*. Поскольку одним из принципов блокчейна является его прозрачность, все транзакции доступны для просмотра другими пользователями, что исключает полную анонимность. Тем не менее, идентификаторы не содержат персональных данных, что позволяет говорить именно о псевдонимности транзакций.

Благодаря псевдонимности операций с биткоином, транзакции сложно отследить. Этим пользуются злоумышленники и используют криптовалюту для реализации различных противозаконных схем. Поскольку данные блоков в блокчейне не связаны с реальными юридическими данными людей, транзакция сама по себе может ничего не говорить об уровне легитимности действия пользователя. Однако цепочки транзакций могут свидетельствовать о применении мошеннических схем. Например, пользователь может использовать цепочку вводов и выводов криптовалюты для перевода средств на счёт запрещённой организации, скрыв при этом источник и назначение средств. Схожие схемы применяются при легализации доходов, полученных преступным путём.

При наличии знаний о типичных паттернах криптовалютных транзакций становится возможным с определённой вероятностью предположить назначение конкретной транзакции. Например, в случае оплаты множество входящих транзакций может консолидироваться в два выходных адреса, в то время как при операциях на криптовалютных биржах один адрес может инициировать одновременную отправку большого числа транзакций с целью снижения затрат на комиссии⁶. Для выявления нелегальных цепочек в большинстве исследований используется граф транзакций. Однако такой подход затрудняет обнаружение аномальных транзакций в режиме реального времени и не позволяет своевременно реагировать на инциденты. Возможным компромиссным решением может стать обогащение информации о транзакциях дополнительными графовыми признаками.

3.1 Описание набора данных

Выявление интервала и количества транзакций (отношение 5 см. рисунок 1) происходит на основе набора данных о транзакциях. Набор данных *BABD (Bitcoin Address Behavior Dataset*, набор данных о поведении адресов сети биткоин), использованный в данной работе, загружен с сайта *Kaggle*⁷. Размеченные данные этого набора можно разделить на две условные группы [1]: данные о легитимных адресах (*Cyber-Security Service – Сервисы кибербезопасности; Centralized Exchange – централизованный обмен; P2P Financial Infrastructure Service – сервис финансовой инфраструктуры сети Peer-to-peer, где Peer-to-peer – децентрализованная сеть, в которой все участники равноправны; P2P Financial Service – финансовый сервис P2P; Individual Wallet – индивидуальные кошельки*) и нелегитимных (*Blackmail – шантаж; Darknet Market – рынок сети Darknet; Gambling – азартные игры; Government Criminal Blacklist – государственный чёрный список; Money Laundering – отмы-*

⁶ Типы криптовалютных адресов и их транзакций в сети биткоин. 22.02.2023.

https://shard.ru/article/types_of_cryptocurrency_addresses_and_transactions_in_the_bitcoin_network.

⁷ *Kaggle*. Bitcoin Address Behavior Dataset (BABD-13). <https://www.kaggle.com/datasets/lemonx/babd13>.

вание денег; *Ponzi Scheme* – финансовые пирамиды). Майнеры (*Mining Pool*) можно отнести к условно легитимным, а криптовалютные тумблеры (*Tumbler*) к условно подозрительным, так как последние, повышая анонимность транзакций, могут использоваться для реализации нелегальных схем.

Предобработка данных заключалась в следующих преобразованиях.

Были удалены поля данных, которые не являются признаками категории транзакции, а именно *account* и *SW*. Поле *account* позволяет отличить один кошелек от другого и строить графы транзакций. Поле *SW* отражает тип данных – имеет слабое (*weak address, WA*) или сильное (*strong address, SA*) подтверждение предоставленной авторами набора данных разметки. Удалены дубликаты экземпляров данных и убраны классы транзакций, которые содержат меньше 500 экземпляров данных – *P2P Financial Infrastructure Service, Government Criminal Blacklist, Money Laundering* и *Ponzi Scheme*. Собранный набор данных содержит девять классов транзакций, для которых в совокупности предоставлено 502416 экземпляров данных. Количество и распределение экземпляров набора данных по различным классам транзакций до и после предобработки представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение экземпляров данных по классам транзакций

Класс транзакции	До предварительной обработки		После предварительной обработки	
	Количество	Процент	Количество	Процент
<i>Blackmail</i>	8686	1.5953	8148	1.6218
<i>Cyber-Security Service</i>	91617	16.8271	90995	18.1115
<i>Darknet Market</i>	13861	2.5458	13857	2.7581
<i>Centralized Exchange</i>	300000	55.1003	260039	51.7577
<i>P2P Financial Infrastructure Service</i>	180	0.0331	0	0.0000
<i>P2P Financial Service</i>	9309	1.7098	9284	1.8479
<i>Gambling</i>	105257	19.3323	104605	20.8204
<i>Government Criminal Blacklist</i>	27	0.0050	0	0.0000
<i>Money Laundering</i>	16	0.0029	0	0.0000
<i>Ponzi Scheme</i>	15	0.0028	0	0.0000
<i>Mining Pool</i>	1580	0.2902	1580	0.3145
<i>Tumbler</i>	12412	2.2797	12406	2.4693
<i>Individual Wallet</i>	1502	0.2759	1502	0.2990
Всего	544462	1.0000	502416	1.0000

Анализируемый набор данных является несбалансированным и в основном представлен тремя классами транзакций – *Centralized Exchange* (51.76%), *Gambling* (20.82%) и *Cyber-Security Service* (18.11%), которые представляют всего 90.69 % данных. Весь набор данных содержит 151 признак.

3.2 Описание подходов

Предлагаемый метод для обнаружения аномальных транзакций криптовалют основан на онтологической схеме связей, представленной в разделе 1, и включает два основных подхода, направленных на отбор моделей НС и их совместное применение для обнаружения.

Подход для отбора моделей в задаче классификации транзакций криптовалюты.

Шаг 1. Предобработка данных о криптографических транзакциях.

Как правило, данные о криптографических транзакциях представляют собой структуру типа ключ-значение. В основе данных лежат различные поля, связанные с отправителем и получателем транзакций. На основе всей совокупности транзакций возможно извлечение дополнительных признаков, связанных с различными статистическими или графовыми метриками каждой отдельной транзакции. Итоговый набор данных представляет собой набор численных признаков и метку, связанные с каждой из транзакций.

Шаг 2. Разделение данных на обучающую, валидационную и тестовую выборки.

Для проверки однородности данных используются методы кросс-валидации. Поэтому для оценки эффективности принято решение использовать 80% данных для кросс-валидации моделей, и 20% – для их тестирования. Данные делятся в соответствии с распределением по классам транзакций. Тестовые данные недоступны моделям в процессе обучения. При кросс-валидации данные делились на части: 60% от изначального набора данных использовались для обучения, а 20% для валидации. Т.е. итоговое соотношение данных: 60/20/20.

Шаг 3. Использование обучающей и валидационной выборки для оптимизации гиперпараметров моделей.

Оптимизация гиперпараметров моделей происходит на 80% данных с помощью кросс-валидации. Каждая итерация данного процесса ставится на моделях с фиксированными гиперпараметрами. Результатом каждого эксперимента являются усреднённые результаты метрик эффективности и их среднеквадратичное отклонение. По результатам проверки различных комбинаций гиперпараметров выбираются их лучшие комбинации для каждой модели.

Шаг 4. Проверка оптимизированных моделей на тестовой выборке.

Лучшие модели по результатам кросс-валидации проверяются на тестовых данных, составляющих 20% от начального набора данных. Именно метрики эффективности, полученные на тестовых данных, являются итоговой оценкой производительности моделей.

Шаг 5. Отбор и выгрузка лучших моделей, их передача в систему обнаружения аномальных транзакций криптовалюты.

Лучшие модели сохраняются для дальнейшего использования при обнаружении подозрительных транзакций. Формат сохранения моделей зависит от итоговой реализации системы обнаружения, однако для предотвращения возможных атак предпочтительнее использовать защищённые форматы данных.

Подход для обнаружения аномальных транзакций криптовалюты.

Шаг 1. Предобработка данных.

Обученные модели предоставляют ответ на входные данные определённого типа. Они ожидают получить некоторый вектор, содержащий признаки транзакции в определённом порядке со значениями заданного типа (отношение 5 на рисунке 1). Важным является преобразование с помощью специальных адаптеров данных о транзакциях в формат, понятный моделям.

Шаг 2. Получение ответов от моделей.

Модели, получив на вход данные с шага 1, предоставляют ответ, содержащий вероятность соответствия полученной транзакции одному из известных модели классов – т.е. определяют, есть ли аномалия (отношение 6 на рисунке 1). В соответствии с определёнными в системе обнаружения пороговыми значениями определяется итоговый класс транзакции (отношение 7 на рисунке 1). Если транзакция является аномальной, информация об этом передается на шаг 3.

Шаг 3. Оценка обнаруженных транзакций оператором.

Оператор получает информацию обо всех транзакциях, признанных аномальными. Если оператор согласен с выводами модели, формируется задача для расследования инцидента (отношение 8 на рисунке 1). Мнение оператора используется для разметки и расширения наборов данных. Оценка оператора используется для анализа производительности моделей.

Шаг 4. Расширение обучающих данных, дообучение или переобучение моделей.

Этот шаг направлен на мониторинг производительности моделей с последующим их дообучением или переобучением. Данные процессы могут быть связаны со значительным расширением обучающего набора данных и значительным падением эффективности обнаружения аномальных транзакций.

Для оценки качества процессов выбраны следующие метрики: аккуратность, полнота, точность и F -мера [29].

4 Эксперименты

В рамках экспериментов⁸ проанализированы следующие модели:

- *CNN (Convolutional Neural Network)* – свёрточная НС;
- *DNN (Deep Neural Network)* – глубокая НС;
- *GRU (Gated Recurrent Units)* – управляемые рекуррентные блоки.

⁸ Все эксперименты выполнялись на компьютере с *Windows 11 Pro 23H2*. Для экспериментальной проверки моделей написан скрипт на языке *Python* в среде разработки *PyCharm 2024.1*. В качестве интерпретатора использовался *Python 3.12*.

- *CNN-DNN* – НС, представляющая собой комбинацию *CNN* и слоёв *DNN*;
- *CNN-GRU* – НС, представляющая собой комбинацию *CNN* и слоёв *GRU*.

Выбор моделей *CNN*, *DNN* и *GRU* обусловлен тем, что *CNN* эффективно выявляет пространственные зависимости, *DNN* хорошо обобщает сложные структуры данных, а *GRU* эффективно работает с последовательными временными данными. Гиперпараметры НС моделей и их значения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Гиперпараметры нейросетевых моделей

Модель	Гиперпараметры и их диапазоны
<i>CNN</i>	dropout: [0.00; 0.30], шаг 0.05; blocks: [1; 6], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64
<i>DNN</i>	dropout: [0.00; 0.30], шаг 0.05; blocks: [1; 6], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64
<i>GRU</i>	dropout: [0.00; 0.30], шаг 0.05; blocks: [1; 6], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64
<i>CNN-DNN</i>	dropout: [0.00; 0.30], шаг 0.05; cnn_blocks: [1; 3], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64; dnn_blocks: [1; 3], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64
<i>CNN-GRU</i>	dropout: [0.00; 0.30], шаг 0.05; cnn_blocks: [1; 3], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64; gru_blocks: [1; 3], шаг 1; units: [64; 512], шаг 64

Для анализа обобщающей способности моделей данные разделены в соотношении 60/20/20 на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Оптимизация гиперпараметров моделей осуществлялась на обучающей и валидационной выборках. Данные из тестовой выборки моделям не предоставлялись. Эта выборка использовалась только для проверки эффективности моделей с наилучшими параметрами. Лучшие результаты работы НС моделей и значения гиперпараметров, при которых они были получены, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты работы нейросетевых моделей в задаче классификации транзакций

Модель	Гиперпараметры	Процесс	Аккуратность	Точность	Полнота	F-мера
<i>CNN</i>	dropout: 0.05, blocks: 1, units: 384	Обучение	0.8235	0.8817	0.7355	0.8020
		Тест	0.8224	0.8821	0.7344	0.8015
<i>DNN</i>	dropout: 0.05, blocks: 6, units: 256	Обучение	0.8860	0.8788	0.8999	0.8869
		Тест	0.8894	0.9026	0.8772	0.8898
<i>GRU</i>	dropout: 0.05, blocks: 5, units: 512	Обучение	0.9361	0.9461	0.9288	0.9374
		Тест	0.9352	0.9456	0.9280	0.9367
<i>CNN-DNN</i>	dropout: 0.10, cnn_blocks: 1, dnn_blocks: 3, cnn_units: 128, dnn_units: 256	Обучение	0.8745	0.8988	0.8475	0.8724
		Тест	0.8758	0.9009	0.8502	0.8749
<i>CNN-GRU</i>	dropout: 0.10, cnn_blocks: 1, gru_blocks: 3, cnn_units: 256, gru_units: 256	Обучение	0.8780	0.9051	0.8526	0.8780
		Тест	0.8791	0.9051	0.8536	0.8786

В задаче классификации транзакций лучшие результаты показала модель *GRU*. *GRU* представляет собой тип рекуррентной НС с относительно простой структурой, которая позволяет эффективно решать проблему исчезающего градиента за счёт улучшения сходимости и производительности. Наиболее близкие к *GRU* результаты у *DNN*, самые слабые – у *CNN*. Комбинирование моделей показало средние результаты, что позволяет сделать вывод о преимуществе более простых моделей в решаемой задаче.

Для сравнения результатов НС с результатами методов ансамблевого МО, представленных в оригинальной работе по составлению набора данных *BABD*, были проанализированы следующие методы: *RF*; *CB* (*CatBoost*) – градиентный бустинг в деревьях решений; *XGB* (*Extreme Gradient Boosting*) – оптимизированный распределённый градиентный бустинг.

Гиперпараметры моделей и их значения представлены в таблице 4. Условия экспериментов для ансамблевых методов были аналогичны тем, что применялись для нейросетевых.

Лучшие результаты работы ансамблевых моделей и значения гиперпараметров, при которых они были получены, представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Гиперпараметры ансамблевых моделей

Модель	Гиперпараметры и их диапазоны
<i>RF</i>	n_estimators: [100, 500], шаг 100; criterion: [gini, entropy, log_loss]; max_features: [sqrt, log2]
<i>CB</i>	iterations: [1000, 3000], шаг 500; learning_rate: [0.001, 0.03, 0.1]; grow_policy: [SymmetricTree, Depthwise, Lossguide]
<i>XGB</i>	n_estimators: [100, 500], шаг 100; learning_rate: [0.1, 0.01, 0.001]; booster: [gbtree, gblinear, dart]

Таблица 5 – Результаты работы ансамблевых моделей в задаче классификации транзакций

Модель	Гиперпараметры	Процесс	Аккуратность	Точность	Полнота	F-мера
<i>RF</i>	criterion: gini, max_features: sqrt, n_estimators: 400	Обучение	0.9535	0.9497	0.9535	0.9510
		Тест	0.9570	0.9570	0.9570	0.9570
<i>CB</i>	grow_policy: SymmetricTree, iterations: 3000, learning_rate: 0.1	Обучение	0.9630	0.9602	0.9630	0.9614
		Тест	0.9643	0.9643	0.9643	0.9643
<i>XGB</i>	booster: gbtree, learning_rate: 0.1, n_estimators: 500	Обучение	0.9659	0.9632	0.9659	0.9644
		Тест	0.9673	0.9673	0.9673	0.9673

Лучшие результаты показала модель *XGB*. Особенностью данной модели является обеспечение параллельного бустинга деревьев. Близкие результаты у модели *CB*, худшие – у *RF*. Результаты *RF* выше результатов *GRU*, что позволяет сделать вывод о преимуществе ансамблевых методов над нейросетевыми в проведённом эксперименте.

5 Обсуждение результатов

Метрики эффективности моделей *XGB* и *GRU* представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Эффективность обнаружения отдельных классов транзакций

Класс транзакции	Модель	Точность	Полнота	F-мера	Количество экз-земпляров данных
<i>Blackmail</i>	<i>XGB</i>	0.61	0.53	0.57	1 641
	<i>GRU</i>	0.53	0.48	0.51	
<i>Cyber-Security Service</i>	<i>XGB</i>	0.94	0.96	0.95	18 130
	<i>GRU</i>	0.88	0.90	0.89	
<i>Darknet Market</i>	<i>XGB</i>	0.98	0.99	0.99	2 701
	<i>GRU</i>	0.89	0.81	0.85	
<i>Centralized Exchange</i>	<i>XGB</i>	0.98	0.99	0.99	51 848
	<i>GRU</i>	0.96	0.97	0.97	
<i>P2P Financial Service</i>	<i>XGB</i>	0.99	0.93	0.96	1 870
	<i>GRU</i>	0.93	0.88	0.90	
<i>Gambling</i>	<i>XGB</i>	0.98	0.98	0.98	21 105
	<i>GRU</i>	0.94	0.95	0.94	
<i>Individual Wallet</i>	<i>XGB</i>	1.00	0.96	0.98	327
	<i>GRU</i>	0.78	0.80	0.79	
<i>Tumbler</i>	<i>XGB</i>	0.89	0.85	0.87	2 535
	<i>GRU</i>	0.90	0.75	0.82	
<i>Mining Pool</i>	<i>XGB</i>	0.08	0.02	0.03	327
	<i>GRU</i>	0.67	0.01	0.01	
<i>Среднее (макро)</i>	<i>XGB</i>	0.83	0.80	0.81	100 484
	<i>GRU</i>	0.83	0.73	0.74	
<i>Среднее (взвешенное)</i>	<i>XGB</i>	0.96	0.97	0.97	
	<i>GRU</i>	0.94	0.93	0.93	

Из таблицы 6 видно, что добиться высокой эффективности обнаружения для всех представленных классов не удалось. Это явно проявляется на таких типах транзакций, как *Mining Pool* и *Blackmail*, а также *Tumbler*. Точность классификации *Mining Pool* у *GRU* значительно выше, чем у *XGB*, однако данное преимущество нивелируется низкой полнотой обнаружения. Для улучшения результатов в этих классах необходимо рассмотреть методы балансировки данных или разработать специализированные архитектуры. Эффективность *GRU* схожа с *XGB*, а результаты *XGB* по *F*-мере выше для всех классов транзакций.

В [30] применены статистические методы (критерий согласия Колмогорова, критерий Андерсона-Дарлинга, критерий Крамера-Мизеса-Смирнова [31]) при сравнении двух наборов данных: только нелегальные транзакции и легальные вместе с нелегальными. Таблица 7 содержит результаты исследований с использованием набора данных *BABD*.

Таблица 7 – Результаты исследований, использующих набор данных *BABD*

Метод	Аккуратность	Точность	Полнота	F-мера
критерий согласия Колмогорова	0.85	1.00	0.85	0.92
критерий Андерсона-Дарлинга	0.79	1.00	0.79	0.88
критерий Крамера-Мизеса-Смирнова	0.80	1.00	0.80	0.89
Наш нейросетевой метод (<i>GRU</i>)	0.94	0.95	0.93	0.94
Наш ансамблевый метод (<i>XGB</i>)	0.97	0.97	0.97	0.97

Результаты проведённых экспериментов показали, что предложенные в данной статье решения показывают более сбалансированные результаты по полноте и точности, чем рассмотренные аналоги. Результаты работы нейросетевых методов уступают ансамблевым, но их более высокая обобщающая способность может дать им преимущество.

Заключение

Предложен подход к обнаружению аномальных транзакций в сети криптовалют с применением ИИ. Экспериментально проведено сравнение трёх подходов к анализу данных о криптовалютных транзакциях на примере биткоина: классификаторы, основанные на алгоритмах МО; статистические алгоритмы; предложенный подход, основанный на НС. Получены следующие результаты для модели *GRU* НС: аккуратность 0.94, точность 0.95, полнота 0.93 и *F*-мера 0.94, что свидетельствует о высокой эффективности предложенной модели по сравнению с альтернативными решениями, основанными на традиционных алгоритмах МО.

Выявлены ограничения, связанные с классификацией отдельных типов транзакций (*Blackmail*, *Tumbler*), что указывает на необходимость дальнейших исследований, направленных на повышение точности и полноты обнаружения нелегальных операций.

Предложенный метод может быть использован в системах цифровой криминалистики, в частности для мониторинга подозрительной активности в режиме реального времени.

Список источников

- [1] *Xiang Y., Lei Y., Bao D., Li T., Yang Q., Liu W., Ren W., Choo K.K.R.* BABD: A Bitcoin Address Behavior Dataset for Pattern Analysis. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2024. Vol.19. P.2171-2185. DOI: 10.1109/TIFS.2023.3347894.
- [2] *Kovalchuk O., Shevchuk R., Banakh S.* Cryptocurrency Crime Risks Modeling: Environment, E-Commerce, and Cybersecurity Issue. *IEEE Access*, 2024. Vol.12. P.50673- 50688. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3386428.
- [3] *Nayyer N., Javaid N., Akbar M., Aldegheishem A., Alrajeh N., Jamil M.* A new framework for fraud detection in bitcoin transactions through ensemble stacking model in smart cities. *IEEE Access*. 2023. Vol.11. P.90916- 90938. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3308298.

- [4] **Nerurkar P., Busnel Y., Ludinard R., Shah K., Bhirud S., Patel D.** Detecting illicit entities in bitcoin using supervised learning of ensemble decision trees // In: Proceedings of the 10th international conference on information communication and management (Paris, France, 2020). 2020. P.25-30. DOI: 10.1145/3418981.3418984.
- [5] **Gomez G., Moreno-Sanchez P., Caballero J.** Watch your back: identifying cybercrime financial relationships in bitcoin through back-and-forth exploration // In: Proceedings of the 2022 ACM SIGSAC conference on computer and communications security (Los Angeles, CA, USA, 2022). P.1291-1305. DOI: 10.1145/3548606.3560587.
- [6] **Lorenz J., Silva M.I., Aparício D., Ascensão J.T., Bizarro P.** Machine learning methods to detect money laundering in the bitcoin blockchain in the presence of label scarcity // In: Proceedings of the first ACM international conference on AI in finance (New York, NY, USA, 2020). P.1-8. DOI: 10.1145/3383455.3422549.
- [7] **Alsaif S.A.** Machine Learning- Based Ransomware Classification of Bitcoin Transactions. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2023. Vol.2023. №1. P.6274260. DOI: 10.1155/2023/6274260.
- [8] **Chen B., Wei F., Gu C.** Bitcoin theft detection based on supervised machine learning algorithms. *Security and Communication Networks*. 2021. Vol.2021. №1. P.6643763. DOI: 10.1155/2021/6643763.
- [9] **Ashfaq T., Khalid R., Yahaya A.S., Aslam S., Azar A.T., Alsafari S., Hameed I.A.** A machine learning and blockchain based efficient fraud detection mechanism. *Sensors*. 2022. Vol.22. №19. P.7162. DOI: 10.3390/s22197162.
- [10] **Jang J., Lee H.N.** Profitable double-spending attacks. *Applied Sciences*. 2020. Vol.10. №23. P.8477. DOI: 10.3390/app10238477.
- [11] **Handaya W.B.T., Yusoff M.N., Jantan A.** Machine learning approach for detection of fileless cryptocurrency mining malware. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. Vol.1450. №1. P.012075. DOI: 10.1088/1742-6596/1450/1/012075.
- [12] **Pocher N., Zichichi M., Merizzi F., Shafiq M.Z., Ferretti S.** Detecting anomalous cryptocurrency transactions: An AML/CFT application of machine learning-based forensics. *Electronic Markets*. 2023. Vol.33. №1. P.37. DOI: 10.1007/s12525-023-00654-3.
- [13] **Alarab I., Prakoowit S., Nacer M.I.** Competence of graph convolutional networks for anti-money laundering in bitcoin blockchain // In: Proceedings of the 2020 5th international conference on machine learning technologies (New York, NY, USA, 2020). P.23-27. DOI: 10.1145/3409073.
- [14] **Al-Haija Q.A., Alsulami A.A.** High performance classification model to identify ransomware payments for heterogeneous bitcoin networks. *Electronics*. 2021. Vol.10. №17. P.2113. DOI: 10.3390/electronics10172113.
- [15] **Nerurkar P.** Illegal activity detection on bitcoin transaction using deep learning. *Soft Computing*. 2023. Vol.27. №9. P.5503-5520. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1454891/v1.
- [16] **Lo W.W., Kulatilleke G.K., Sarhan M., Layeghy S., Portmann M.** Inspection-L: self-supervised GNN node embeddings for money laundering detection in bitcoin. *Applied Intelligence*. 2023. Vol.53. №16. P.19406-19417. <https://arxiv.org/pdf/2203.10465>.
- [17] **Velickovic P., Fedus W., Hamilton W.L., Lio P., Bengio Y., Hjelm R.D.** Deep graph infomax // In: Proceedings of International Conference on Learning Representations (New Orleans, Louisiana, USA, 2019), 2019. P.1-17. <https://openreview.net/pdf?id=rklz9iAcKQ>.
- [18] **Saxena R., Arora D., Nagar V.** Integration of back-propagation neural network to classify of cybercriminal entities in blockchain // In: Proceedings of Trends in Electronics and Health Informatics: TEHI 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. P.523-532. DOI: 10.1007/978-981-16-8826-3_45.
- [19] **Wu Y., Tao F., Liu L., Gu J., Panneerselvam J., Zhu R., Shahzad M.N.** A bitcoin transaction network analytic method for future blockchain forensic investigation. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2020. Vol.8. №2. P.1230-1241. DOI: 10.1109/TNSE.2020.2970113.
- [20] **Wu J., Liu J., Chen W., Huang H., Zheng Z., Zhang Y.** Detecting mixing services via mining bitcoin transaction network with hybrid motifs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2021. Vol.52. №4. P.2237-2249. <https://arxiv.org/pdf/2001.05233>.
- [21] **Nicholls J., Kuppa A., Le-Khac N.A.** FraudLens: Graph Structural Learning for Bitcoin Illicit Activity Identification // In: Proceedings of the 39th Annual Computer Security Applications Conference (Austin, TX, USA, 2023). 2023. P.324-336. DOI: 10.1145/3627106.3627200.
- [22] **Tharani J. S., Charles E.Y.A., Hóu Z., Palaniswami M., Muthukkumarasamy V.** Graph based visualisation techniques for analysis of blockchain transactions // In: 2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN) (Edmonton, AB, Canada, 2021). IEEE, 2021. P.427-430. DOI: 10.1109/LCN52139.2021.9524878.
- [23] **Xiong H., Yiu S. M., Lam, K.Y.** Bitanalysis: A visualization system for bitcoin wallet investigation // *IEEE Transactions on Big Data*. 2022. Vol.9. №2. P.621-636. DOI: 10.1109/TBDATA.2022.3188660.
- [24] **Wu F., Wei Y., Luo X.** Abnormal Trading Visualized Detection on Bitcoin Transaction Based on Semi-Supervised Machine Learning and Graph Database. 2024. <https://ssrn.com/abstract=4769024>. DOI: 10.2139/ssrn.4769024.
- [25] **Novikova E., Kotenko I., Fedotov E.** Interactive Multiview Visualization for Fraud Detection in Mobile Money Transfer Services. *International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications*, Vol.6, No.4, 2015. P.72-97. DOI: 10.4018/IJMCMC.2014100105.

- [26] **Novikova E., Kotenko I.** Visualization-Driven Approach to Fraud Detection in the Mobile Money Transfer Services. *Algorithms, Methods and Applications in Mobile Computing and Communications*. IGI Global. 2019. P.205-236. DOI: 10.4018/978-1-5225-5693-0.ch009.
- [27] **Novikova E., Bestuzhev M., Kotenko I.** Anomaly Detection in the HVAC System Operation by a RadViz Based Visualization-Driven Approach // Katsikas S. et al. (eds) *Computer Security. ESORICS 2019 International Workshops, CyberICPS, SECPRE, SPOSE, and ADIoT, Luxembourg, September 26–27, 2019 Revised Selected Papers / Lecture Notes in Computer Sciences, Vol.11980, 2020*. Springer, Cham. P.402-418. DOI: 10.1007/978-3-030-42048-2_26.
- [28] **Novikova E., Kotenko I., Murenin I.** The Visual Analytics Approach for Analyzing Trajectories of Critical Infrastructure Employers. *Energies (MDPI) 2020, Vol.13, №15, P.3936*. DOI: 10.3390/en13153936.
- [29] **Левшун Д.А., Левшун Д.С., Котенко И.В.** Обнаружение и объяснение аномалий в промышленных системах Интернета вещей на основе автокодировщика. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.96-113. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.
- [30] **Maheshwari R., Sriram Praveen V.A., Shobha G., Shetty J., Chala A., Watanuki H.** Illicit activity detection in bitcoin transactions using timeseries analysis. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023. Vol.14. №3. P.13-18. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140302.
- [31] **Samsudeen F., Perera H.** Behavioral analysis of bitcoin users on illegal transactions. *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol.4. №2. P.402-412. DOI: 10.25046/aj040250.

Сведения об авторах



Котенко Игорь Витальевич, 1961 г. рождения. С отличием окончил Военный инженерный Краснознамённый институт им. А.Ф. Можайского в 1983 г. и Военную академию связи в 1987 г., д.т.н. (1999), профессор (2001), заслуженный деятель науки Российской Федерации (2023). Главный научный сотрудник и руководитель Лаборатории проблем компьютерной безопасности СПб ФИЦ РАН, профессор Университета ИТМО, УрФУ, Харбинского политехнического университета (КНР) и Хэйлунцзянского университета (КНР), заместитель директора Института информационной безопасности Университета Иннополис. В списке научных трудов более 800 работ в области защиты информации и искусственного интеллекта, включая 25 монографий, и более 100 патентов на изобретения и зарегистрированных программ. ORCID: 0000-0001-6859-7120; Author ID (РИНЦ): 110102; Author ID (Scopus): 15925268000. ivkote@comsec.spb.ru. ✉.

Левшун Дмитрий Сергеевич, 1993 г. рождения. Выпускник СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2017), к.т.н. (2021). Старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности СПб ФИЦ РАН. Доцент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) и Европейского университета в Санкт-Петербурге. В списке научных трудов более 100 работ в области информационной безопасности, проектирования защищённых систем, Интернета вещей, искусственного интеллекта. ORCID: 0000-0003-1898-6624; Author ID (РИНЦ): 840344; Author ID (Scopus): 57189306576; Researcher ID (WoS): C-1566-2018. levshun@comsec.spb.ru.



Жернова Ксения Николаевна, 1994 г. рождения. Окончила СПбГУТ в 2018 г., к.т.н. (2022). Старший научный сотрудник Международного центра цифровой криминалистики СПб ФИЦ РАН. Доцент Европейского университета в Санкт-Петербурге. В списке научных трудов более 50 работ в области информационной безопасности, визуального анализа данных, проблем искусственного интеллекта. ORCID: 0000-0003-0161-3645; Author ID (РИНЦ): 1035947; Author ID (Scopus): 57216946658. zhernova@comsec.spb.ru.

Чечулин Андрей Алексеевич, 1983 г. рождения. Окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого в 2005 г., к.т.н. (2013), доцент (2018). Руководитель Международного центра цифровой криминалистики СПб ФИЦ РАН. Доцент СПбГУТ и Университета ИТМО. Автор более 300 научных публикаций в области сетевой безопасности, обнаружения вторжений, цифровой криминалистики, анализа социальных сетей и визуализации данных. ORCID: 0000-0001-7056-6972; Author ID (РИНЦ): 608765; Author ID (Scopus): 55248184200; Researcher ID (WoS): K-7971-2012. chchulin@comsec.spb.ru.



Поступила в редакцию 12.11.2024, после рецензирования 17.04.2025. Принята к публикации 26.05.2025.



Detection of anomalous cryptocurrency transactions using neural networks and ontologies

© 2025, I.V. Kotenko ✉, D.S. Levshun, K.N. Zhernova, A.A. Chechulin

Saint-Petersburg Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Science, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article explores an effective approach to detecting anomalies in cryptocurrency transactions using neural network models, including convolutional, deep, and gated recurrent units (GRUs), and compares their performance with other existing methods for identifying illicit transactions in cryptocurrency networks. A research of relevant studies is conducted in the fields of transaction data analysis in the cryptocurrency network, data visualization for transaction analysis, and the use of computer vision techniques for detecting anomalous behavior. The subject area of the study is defined. The problem of detecting anomalies in cryptocurrency transactions is based on the fact that these transactions are pseudonymous, i.e. there are no direct indications of the identity of the sender and recipient. The relevance and contribution of this work lie in the development of a method capable of identifying anomalous transactions with high accuracy in near real-time. Experimental studies were conducted using a dataset of cryptocurrency transactions, applying both neural and non-neural classifiers. The results are compared against existing approaches in the field. The experiments demonstrated that gated recurrent units outperformed other neural models in this task, achieving an accuracy of 0.94, precision of 0.95, recall of 0.93, and F1-score of 0.94, indicating the high effectiveness of the proposed model. Nonetheless, this approach showed slightly lower performance compared to traditional machine learning algorithms, such as optimized distributed gradient boosting. The novelty of the proposed approach lies in its use of statistical characteristics derived from the transaction graph, combined with deep learning and gradient boosting techniques. The approach can be applied in the development of software tools for detecting illicit cryptocurrency transactions within information security systems and digital forensics.

Keywords: anomaly detection, computer security, machine learning, neural networks, visual data analysis, cryptocurrency, digital forensics.

For citation: Kotenko IV, Levshun DS, Zhernova KN, Chechulin AA. Detection of anomalous cryptocurrency transactions using neural networks and ontologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 334-350. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-334-350.

Financial Support: The study was supported by a joint grant from the Russian Science Foundation and the St. Petersburg Science Foundation No. 24-21-20058, <https://rscf.ru/project/24-21-20058/>.

Authors' contributions: Kotenko I.V. – problem statement, general guidance on the work and planning of experiments; Levshun D.S. – conducting the experiment and interpreting the results; Zhernova K.N. – search and description of the data set for the experiment, review of relevant works; Chechulin A.A. - development of the research concept, preparation of the data set.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Ontology diagram of relationships in the field of cryptocurrency anomalous transaction detection

Table 1 - Distribution of data instances across transaction classes

Table 2 - Hyperparameters of neural network models

Table 3 - Results of neural network models in the transaction classification problem

Table 4 - Hyperparameters of ensemble models

Table 5 - Results of ensemble models in the transaction classification problem

Table 6 - Detection efficiency of individual transaction classes

Table 7 - Research results using BABD dataset

References

- [1] **Xiang Y, Lei Y, Bao D, Li T, Yang Q, Liu W, Ren W, Choo KKR.** BABD: A Bitcoin Address Behavior Dataset for Pattern Analysis. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2024; 19: 2171-2185. DOI: 10.1109/TIFS.2023.3347894.
- [2] **Kovalchuk O, Shevchuk R, Banakh S.** Cryptocurrency Crime Risks Modeling: Environment, E-Commerce, and Cybersecurity Issue. *IEEE Access*. 2024; 12: 50673- 50688. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3386428.
- [3] **Nayyer N, Javaid N, Akbar M, Aldegheishem A, Alrajeh N, Jamil M.** A new framework for fraud detection in bitcoin transactions through ensemble stacking model in smart cities. *IEEE Access*. 2023; 11: 90916- 90938. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3308298.
- [4] **Nerurkar P, Busnel Y, Ludinard R, Shah K, Bhirud S, Patel D.** Detecting illicit entities in bitcoin using supervised learning of ensemble decision trees. *Proceedings of the 10th international conference on information communication and management* (Paris, France, 2020). 2020: 25-30. DOI: 10.1145/3418981.3418984.
- [5] **Gomez G, Moreno-Sanchez P, Caballero J.** Watch your back: identifying cybercrime financial relationships in bitcoin through back-and-forth exploration. *Proceedings of the 2022 ACM SIGSAC conference on computer and communications security* (Los Angeles, CA, USA, 2022). 2022: 1291-1305. DOI: 10.1145/3548606.3560587.
- [6] **Lorenz J, Silva MI, Aparício D, Ascensão JT, Bizarro P.** Machine learning methods to detect money laundering in the bitcoin blockchain in the presence of label scarcity. *Proceedings of the first ACM international conference on AI in finance* (New York, NY, USA, 2020). 2020: 1-8. DOI: 10.1145/3383455.3422549.
- [7] **Alsaif SA.** Machine Learning- Based Ransomware Classification of Bitcoin Transactions. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2023; 2023(1): 6274260. DOI: 10.1155/2023/6274260.
- [8] **Chen B, Wei F, Gu C.** Bitcoin theft detection based on supervised machine learning algorithms. *Security and Communication Networks*. 2021; 2021(1): 6643763. DOI: 10.1155/2021/6643763.
- [9] **Ashfaq T, Khalid R, Yahaya AS, Aslam S, Azar AT, Alsafari S, Hameed IA.** A machine learning and blockchain based efficient fraud detection mechanism. *Sensors*. 2022; 22(19): 7162. DOI: 10.3390/s22197162.
- [10] **Jang J, Lee HN.** Profitable double-spending attacks. *Applied Sciences*. 2020; 10(23): 8477. DOI: 10.3390/app10238477.
- [11] **Handaya WBT, Yusoff MN, Jantan A.** Machine learning approach for detection of fileless cryptocurrency mining malware. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020; 1450(1): 012075. DOI: 10.1088/1742-6596/1450/1/012075.
- [12] **Pocher N, Zichichi M, Merizzi F, Shafiq MZ, Ferretti S.** Detecting anomalous cryptocurrency transactions: An AML/CFT application of machine learning-based forensics. *Electronic Markets*. 2023; 33(1): 37. DOI: 10.1007/s12525-023-00654-3.
- [13] **Alarab I, Prakoonwit S, Nacer MI.** Competence of graph convolutional networks for anti-money laundering in bitcoin blockchain. *Proceedings of the 2020 5th international conference on machine learning technologies* (New York, NY, USA, 2020). 2020: 23-27. DOI: 10.1145/3409073.
- [14] **Al-Hajja QA, Alsulami AA.** High performance classification model to identify ransomware payments for heterogeneous bitcoin networks. *Electronics*. 2021; 10(17): 2113. DOI: 10.3390/electronics10172113.
- [15] **Nerurkar P.** Illegal activity detection on bitcoin transaction using deep learning. *Soft Computing*. 2023; 27(9): 5503-5520. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1454891/v1.
- [16] **Lo WW, Kulatilleke GK, Sarhan M, Layeghy S, Portmann M.** Inspection-L: self-supervised GNN node embeddings for money laundering detection in bitcoin. *Applied Intelligence*. 2023; 53(16): 19406-19417. <https://arxiv.org/pdf/2203.10465>.
- [17] **Velickovic P, Fedus W, Hamilton WL, Lio P, Bengio Y, Hjelm RD.** Deep graph infomax. *Proceedings of International Conference on Learning Representations* (New Orleans, Louisiana, USA, 2019), 2019: 1-17. <https://openreview.net/pdf?id=rklz9iAcKQ>.
- [18] **Saxena R, Arora D, Nagar V.** Integration of back-propagation neural network to classify of cybercriminal entities in blockchain. *Proceedings of Trends in Electronics and Health Informatics: TEHI 2021*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 523-532. DOI: 10.1007/978-981-16-8826-3_45.
- [19] **Wu Y, Tao F, Liu L, Gu J, Panneerselvam J, Zhu R, Shahzad MN.** A bitcoin transaction network analytic method for future blockchain forensic investigation. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2020; 8(2): 1230-1241. DOI: 10.1109/TNSE.2020.2970113.
- [20] **Wu J, Liu J, Chen W, Huang H, Zheng Z, Zhang Y.** Detecting mixing services via mining bitcoin transaction network with hybrid motifs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2021; 52(4): 2237-2249. <https://arxiv.org/pdf/2001.05233>.
- [21] **Nicholls J, Kuppaa A, Le-Khac NA.** FraudLens: Graph Structural Learning for Bitcoin Illicit Activity Identification. *Proceedings of the 39th Annual Computer Security Applications Conference* (Austin, TX, USA, 2023). 2023: 324-336. DOI: 10.1145/3627106.3627200.

- [22] **Tharani JS, Charles EYA, Hóu Z, Palaniswami M, Muthukkumarasamy V.** Graph based visualisation techniques for analysis of blockchain transactions. *IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN)*. IEEE, 2021: 427-430. DOI: 10.1109/LCN52139.2021.9524878.
- [23] **Xiong H, Yiu SM, Lam KY.** Bitanalysis: A visualization system for bitcoin wallet investigation. *IEEE Transactions on Big Data*. 2022; 9(2): 621-636. DOI: 10.1109/TBDATA.2022.3188660.
- [24] **Wu F, Wei Y, Luo X.** Abnormal Trading Visualized Detection on Bitcoin Transaction Based on Semi-Supervised Machine Learning and Graph Database. 2024. <https://ssrn.com/abstract=4769024>. DOI: 10.2139/ssrn.4769024.
- [25] **Novikova E, Kotenko I, Fedotov E.** Interactive Multiview Visualization for Fraud Detection in Mobile Money Transfer Services. *International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications*, 2015; 6(4): 72-97. DOI: 10.4018/IJMCMC.2014100105.
- [26] **Novikova E, Kotenko I.** Visualization-Driven Approach to Fraud Detection in the Mobile Money Transfer Services. *Algorithms, Methods and Applications in Mobile Computing and Communications*. IGI Global. 2019: 205-236. DOI: 10.4018/978-1-5225-5693-0.ch009.
- [27] **Novikova E, Bestuzhev M, Kotenko I.** Anomaly Detection in the HVAC System Operation by a RadViz Based Visualization-Driven Approach // Katsikas S. et al. (eds) *Computer Security. ESORICS 2019 International Workshops, CyberICPS, SECPRE, SPOSE, and ADIoT*, Luxembourg, September 26–27, 2019 Revised Selected Papers / Lecture Notes in Computer Sciences. Springer, Cham. 2020; 11980: 402-418. DOI: 10.1007/978-3-030-42048-2_26.
- [28] **Novikova E, Kotenko I, Murenin I.** The Visual Analytics Approach for Analyzing Trajectories of Critical Infrastructure Employers. *Energies (MDPI)*. 2020; 13(15): 3936. DOI: 10.3390/en13153936.
- [29] **Levshun D, Levshun D, Kotenko I.** Detecting and explaining anomalies in industrial Internet of things systems using an autoencoder [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2025; 1(55): 96-113. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.
- [30] **Maheshwari R, Sriram Praveen VA, Shobha G, Shetty J, Chala A, Watanuki H.** Illicit activity detection in bitcoin transactions using timeseries analysis. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023; 14(3): 13-18. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140302.
- [31] **Samsudeen F, Perera H.** Behavioral analysis of bitcoin users on illegal transactions. *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*. 2019; 4(2): 402-412. DOI: 10.25046/aj040250.

About the authors

Igor Vitalyevich Kotenko (b. 1961) graduated with honors from the St. Petersburg Academy of Space Engineering in 1983 and St. Petersburg Signal Academy in 1987, D. Sc. Eng. (1999), professor (2021), Honored Scientist of the Russian Federation (2023), Chief Researcher and Head of the Laboratory of Computer Security Problems at St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, professor at ITMO University, Saint Petersburg State University of Telecommunications, Ural Federal University, Harbin Institute of Technology (China) and Heilongjiang University (China), Deputy Director of the Institute of Information Security at Innopolis University. He is a co-author of more than 800 publications in the field of information security and artificial intelligence, including 25 monographs, and more than 100 patents for inventions and registered programs. ORCID: 0000-0001-6859-7120; Author ID (RSCI): 110102; Author ID (Scopus): 15925268000. ivkote@comsec.spb.ru. ✉.

Dmitry Sergeevich Levshun (b 1993) graduated from the Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" in 2017, Ph.D. (2021). He is a senior researcher at the Laboratory of Computer Security Problems at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is an associate professor at the Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich and at the European University at St. Petersburg. His list of scientific publications includes more than 100 works in the field of information security, design of security systems, Internet of Things, and artificial intelligence. ORCID: 0000-0003-1898-6624; Author ID (RSCI): 840344; Author ID (Scopus): 57189306576; Researcher ID (WoS): C-1566-2018. levshun@comsec.spb.ru.

Ksenia Nikolayevna Zhernova (b. 1994) graduated from the Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich (Saint-Petersburg, Russia) in 2018, Can. Sc. Eng. in Information Security (2022). Senior Researcher at the International Digital Forensics Center at the Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Associate Professor at the European University at Saint-Petersburg. The list of scientific publications includes more than 50 works in the field of information security, visual data analysis, and artificial intelligence problems. ORCID: 0000-0003-0161-3645; Author ID (RSCI): 1035947; Author ID (Scopus): 57216946658. zhernova@comsec.spb.ru.

Andrey Alekseevich Chechulin (b. 1983), graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University in 2005, holds a Can.Sc. Eng. in Information Security (2013), and Associate Professor (2018). Lead Researcher and Head

of the International Digital Forensics Center at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Associate Professor at St. Petersburg State University of Telecommunications and ITMO University. He is the author of over 300 scientific publications in the fields of network security, intrusion detection, digital forensics, social network analysis, and data visualization. ORCID: 0000-0001-7056-6972; Author ID (RSCI): 608765; Author ID (Scopus): 55248184200; Researcher ID (WoS): K-7971-2012. *chechulin@comsec.spb.ru*.

Received November 12, 2024. Revised April 17, 2025. Accepted May 26, 2025.



Применение методов машинного обучения при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей

© 2025, Д.С. Борисов¹, К.К. Симовин², Д.Р. Юкина¹✉, А.В. Благов¹, И.В. Чечет¹, С.Г. Матвеев¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет), Самара, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье рассматривается применение рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью и алгоритма градиентного бустинга для определения основных геометрических размеров диффузора камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя. Выполнено численное моделирование физических процессов в диффузоре на основе метода конечных элементов и расчёт потерь полного давления. Сформирована база данных геометрических параметров рассматриваемой модели диффузора и соответствующих им результатов расчёта потерь полного давления. Вариант с минимальными потерями полного давления использован в качестве эталона. Проведено сравнение метода градиентного бустинга и нейронной сети с долгой краткосрочной памятью на данных о потерях полного давления, полученных в результате численного моделирования диффузора с различными значениями его геометрических размеров. Погрешность метода градиентного бустинга составила 1,64%, для рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью – 7,28%. Применённый подход позволяет формировать базу данных вариантов конструкций диффузоров, результаты расчётов использовать для обучения нейронных сетей и в дальнейшем дообучать модели на других конструкциях для использования полученного результата при проектировании камер сгорания.

Ключевые слова: машинное обучение, градиентный бустинг, рекуррентная нейронная сеть, проектирование, диффузор камеры сгорания, метод конечных элементов.

Цитирование: Борисов Д.С., Симовин К.К., Юкина Д.Р., Благов А.В., Чечет И.В., Матвеев С.Г. Применение методов машинного обучения при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3(57). С.351-362. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-351-362.

Вклад авторов: Борисов Д.С. – выбор методов машинного обучения и моделей нейронных сетей; Симовин К.К. – подготовка данных, построение и апробация нейросетевых моделей; Юкина Д.Р. – подготовка модели, сбор и систематизация данных; Благов А.В. – постановка задачи, анализ результатов обучения нейросетей; Чечет И.В. – параметризация модели, анализ результатов моделирования и машинного обучения; Матвеев С.Г. – разработка структуры и редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Задачи проектирования элементов, узлов и конструкций авиационных двигателей решаются с использованием методов вычислительной газодинамики, специализированных программных комплексов (*Ansys Fluent*¹, *STAR-CCM+*², *OpenFOAM*³, *FLOW-3D*⁴ и др.) и больших вычислительных ресурсов [1]. К такой задаче можно отнести проектирование элементов

¹ <https://www.ansys.com/>.

² <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/star-ccm/>.

³ <https://www.openfoam.com/>.

⁴ <https://www.flow3d.com/>.

камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД). Важным требованием к КС ГТД является обеспечение потерь полного давления (ППД), не превышающих значений, установленных техническим заданием на проектирование КС [2, 3]. Примерно две трети ППД в КС обусловлены процессами горения и смешения. Остальные потери приходятся на диффузор, который обеспечивает торможение потока воздуха, выходящего из компрессора и его распределение по кольцевым каналам КС. Снижение ППД в диффузоре улучшает характеристики КС и повышает эффективность двигателя в целом [2-5].

Первичный облик КС определяется выбранным прототипом. Проектировочный расчёт прототипа КС позволяет установить: габариты диффузора, геометрию фронтального устройства, объём и габариты жаровой трубы, длину газосборника и т.д. Упрощённая геометрическая модель КС используется для трёхмерного моделирования процессов средствами вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) [1]. В результате итеративного процесса *CFD*-расчётов получается окончательный вариант проекта конструкции.

Целью данной работы является попытка применения методов интеллектуального анализа данных (ИАД) [6-10] к проектированию проточной части диффузора КС ГТД. В практике проектирования КС используется специализированное программное средство «*Optimization*» в *Ansys*¹, с помощью которого определяют геометрию диффузора, обеспечивающую минимальные ППД и его распределение по каналам КС. Время поиска решения может составлять от нескольких дней до нескольких недель. В результате создаётся большой объём данных, который можно использовать для обучения нейронной сети (НС). Предиктивная аналитика, базирующаяся на использовании нейросетевых моделей, способна быстро и точно прогнозировать различные результаты и явления. Количество и структура данных, по которым проходит обучение моделей, оказывает существенное влияние на их прогностическую способность. Например, недостаточное количество данных влияет на качество и точность прогноза, а увеличение количества данных позволит повысить точность, но может привести к переобучению [11].

1 Выбор методов машинного обучения

Предиктивная аналитика объединяет методы ИАД и прогнозного моделирования с целью прогнозирования будущих событий [6]. Она представляет собой набор инструментов, включающий методы анализа больших данных и статистические методы. Использование различных алгоритмов ИАД позволяет обнаруживать скрытые закономерности, выявлять неизвестные зависимости и обучаться [7].

На начальных этапах ИАД выполняют подготовку и преобразование данных [7, 12]. Частью преобразования является очистка данных, в процессе которой устраняются дубликаты, многозначность, аномалии, пропущенные значения и т.п. Одним из распространённых алгоритмов преобразования является *нормализация* [13]. Другим важным алгоритмом преобразования является *обобщение*, позволяющее объединить данные в категории для более глубокого понимания зависимостей [14].

Перед обучением нейросетевой модели данные необходимо *разделить на выборки* [13]. Обычно используются два типа выборок: контрольная и тренировочная. На контрольную выборку отводится 20%, на тренировочную 80%. Тренировочная выборка разделяется ещё на две: 70% – обучающая и 30% – тестовая выборки. Обучающая выборка используется для обучения модели, тестовая – для оценки её качества, а контрольная – для выбора наилучшей модели.

Следующим этапом определяется тип задачи, решаемой ИАД. Среди основных задач: регрессия, классификация и кластеризация [15]. После этого данные могут обрабатываться посредством построения моделей, онтологических конструкций и других методов. В данной работе применены рекуррентная НС (РНС) с долгой краткосрочной памятью (*Long Short-Term Memory, LSTM*), способная обучаться долгосрочным зависимостям [16], и алгоритм машинного обучения с применением градиентного бустинга над деревьями решений (*Categorical Boosting, CatBoost*) [17].

РНС с долгой краткосрочной памятью способна хранить информацию на протяжении продолжительного времени. На рисунке 1 представлена схема искусственной НС, которая состоит из трёх типов слоёв [18]:

- входной – получает данные;

- скрытый – обрабатывает информацию и может состоять из нескольких скрытых слоёв, количество которых зависит от сложности задачи;
- выходной – генерирует результат.

Каждый нейрон, называемый также сумматором, получает входные сигналы с весами, отражающими их значимость [19]. Нейрон суммирует входные сигналы, умножая их на соответствующие веса. РНС представляют собой последовательность одинаковых сетей, позволяющих запоминать и передавать информацию [20]. Схема работы РНС приведена на рисунке 2.

РНС демонстрируют высокую эффективность при решении задач многомерного прогнозирования и моделирования нелинейных взаимосвязей и не требуют большого количества данных, как глубокие НС [21].

РНС имеют ограниченную способность запоминать информацию на протяжении длительных периодов. Поэтому применяется архитектура *LSTM*, которая позволяет НС хранить и обрабатывать информацию в течение длительного времени. *LSTM*-сети сохраняют состояние ячейки, содержащее информацию, необходимую для запоминания. Управление доступом к информации, хранящейся в состоянии ячейки, осуществляется посредством фильтров, включающих сигмоидальный слой [21]. Схематическое представление архитектуры *LSTM* приведено на рисунке 3.

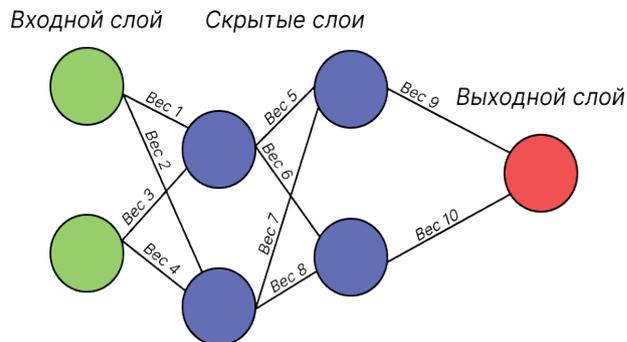
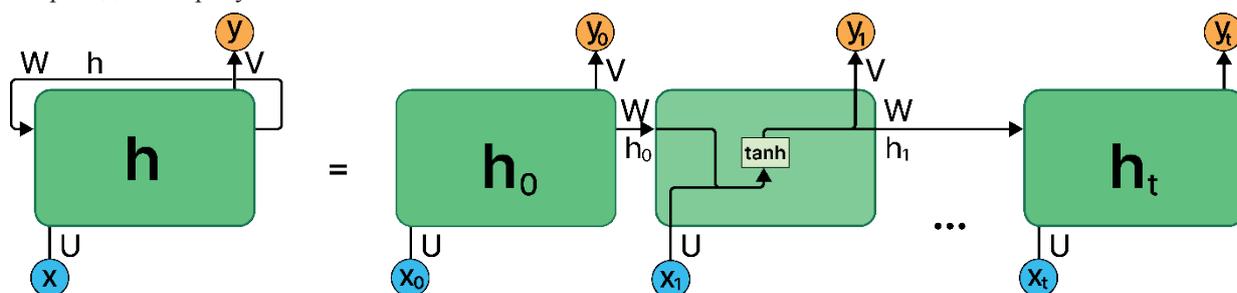


Рисунок 1 – Схема модели искусственной нейронной сети



U — матрица весов для входных данных; V — матрица весов для выходных данных; W — матрица весов для рекуррентных входных данных; x_t — входное значение в момент времени t ; y_t — выходное значение в момент времени t ; h_t — вектор результата активации скрытых нейронов в момент времени t

Рисунок 2 – Схема рекуррентной нейронной сети

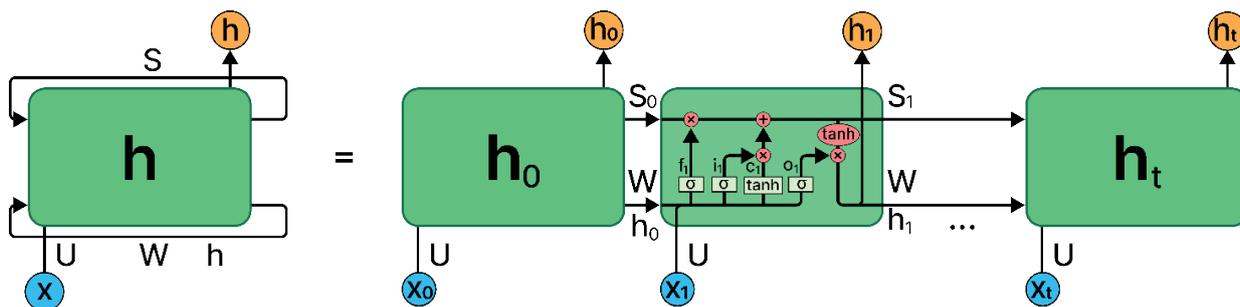


Рисунок 3 – Схема нейронной сети с долгой краткосрочной памятью

В условиях ограниченного объема обучающей выборки целесообразно использовать алгоритмы машинного обучения с применением градиентного бустинга. Градиентный бустинг отличается устойчивостью при недостаточном объеме данных и эффективностью работы с табличными данными. В качестве входных данных принимаются множества X , Y и используется пространство вещественных чисел в качестве оценок. Описать принцип градиентного бустинга можно следующей формулой [22]: $a(x) = C(b(x))$, где $b : X \rightarrow R$ – алгоритмический оператор (базовый алгоритм), а функция $C : R \rightarrow Y$ называется решающим правилом.

Схема алгоритм градиентного бустинга представлена на рисунке 4. В отличие от НС алгоритм градиентного бустинга может обрабатывать данные разных типов. Он применим для прогнозирования числовых значений (регрессия) и для классификации объектов. *CatBoost* эффективно обрабатывает нелинейные зависимости в дан-

ных, а применение $L2$ -регуляризации, осуществляющей штрафование больших весов модели, способствует улучшению обобщающей способности алгоритма [23]:

$$L2 = \lambda \sum_{i=1}^n w_i^2,$$

где λ – коэффициент регуляризации, n – количество элементов в векторе весов, w_i – i -тый элемент вектора весов.

Оценка качества построенной модели осуществляется посредством анализа метрик, релевантных решаемой задаче. Для задач классификации применяется метрика точности, а для задач регрессии – среднеквадратичная ошибка (*Mean Squared Error, MSE*). Другим методом оценки является кросс-валидация, в частности, метод *k-Fold* [13], который включает разделение исходного набора данных на k непересекающихся частей (фолдов). В ходе k итераций каждый из k фолдов поочередно используется в качестве тестовой выборки, а оставшиеся $k-1$ фолды – в качестве обучающей выборки. По завершении k итераций формируется k оценок качества, усреднённое значение которых характеризует общую эффективность модели.

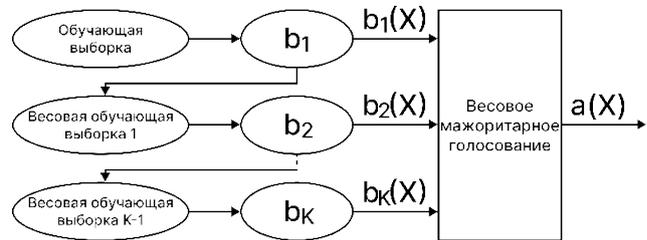


Рисунок 4 – Схема алгоритма градиентного бустинга

2 Задача проектирования диффузора камеры сгорания ГТД

Уровень ППД современных КС лежит в диапазоне 4,5-6,5% и определяется по формуле:

$$\Delta p^* = \frac{P_{\text{ВХ}}^* - P_{\text{ВЫХ}}^*}{P_{\text{ВХ}}^*} 100\%, \quad (1)$$

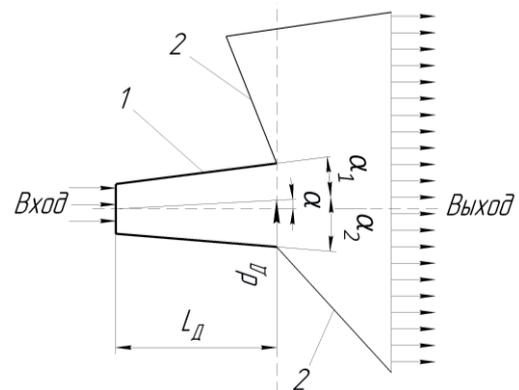
где $P_{\text{ВХ}}^*$ – полное давление на входе в диффузор; $P_{\text{ВЫХ}}^*$ – полное давление на выходе из КС.

Около 3-3,5% ППД возникают в процессах смесеобразования, горения и смешения в жаровой трубе КС, 1-3% – при торможении потока воздуха, выходящего из компрессора, и его распределении по кольцевым каналам КС [2, 3].

Объектом исследования является диффузор КС с внезапным расширением, схема которого представлена на рисунке 5. Для трёхмерного *CFD*-расчёта рассмотрен сектор диффузора (10°) кольцевой КС. В процессе расчёта положения входного и выходного сечений и их размеры оставались неизменными. Элементы внутреннего и внешнего корпусов приняты линейными для упрощения автоматического построения конечно-элементной модели (КЭМ). Геометрия диффузора определена следующими параметрами: $L_{\text{д}}$ – длина диффузора, $d_{\text{д}}$ – диаметр до точки пересечения линии угла нацеливания α с выходным сечением диффузора, α_1 и α_2 – углы раскрытия стенок диффузора.

Линейные и угловые размеры варьировались в диапазонах, основанных на экспериментальных данных, включённых в методики одномерного проектирования [3, 24, 25]: угол раскрытия диффузора $9^\circ \dots 11^\circ$; $L_{\text{д}} = 63 \dots 77$ мм; $d_{\text{д}} = 456 \dots 558$ мм.

Для *CFD*-расчёта создана КЭМ с максимальным размером элемента 1,2 мм и минимальным 0,15 мм. Количество элементов в модели во всех вариантах расчёта составило около 200 тыс. элементов. Ортогональное качество элементов модели 0,2.



1 – диффузор, 2 – элементы корпуса

Рисунок 5 – Схема конструкции диффузора КС с внезапным расширением

Расчёты выполнялись для значений давления на входе в КС в диапазоне 3,2- 5,2 МПа, что соответствовало режимам работы ГТД во время взлёта и посадки.

Выполнены расчёты 2142 вариантов геометрии диффузора. На каждом шаге автоматического расчёта записывались значения всех геометрических параметров диффузора, давления на выходе и рассчитывались ППД. Минимальное значение ППД принято за эталон. На полученных значениях обучены нейросетевая модель и алгоритм градиентного бустинга. Результаты прогнозов верифицированы по *CFD*-расчёту.

Для сравнения потерь, предсказанных методами РНС и *CatBoost*, и потерь, полученных в результате *CFD*-расчёта, определена относительная погрешность

$$\delta = \frac{|\Delta p^*_{predicted} - \Delta p^*_{CFD}|}{\Delta p^*_{CFD}} 100\%, \quad (2)$$

где $\Delta p^*_{predicted}$ – предсказанные ППД; Δp^*_{CFD} – ППД, полученный в результате *CFD*-расчёта.

3 Реализация методов *LSTM* и *CatBoost*

Для реализации методов *LSTM* и *CatBoost* на *Python* использовались данные, полученные при трёхмерном численном моделировании диффузора. Набор данных содержит восемь столбцов значений: входное и выходное давления, процент потерь и пять геометрических параметров диффузора. После предварительной обработки данных (2142 варианта), включающей удаление дубликатов и строк с пропущенными значениями, он был сокращён до 1720. Нормализация данных выполнена тремя методами: минимума-максимума; *Z*-масштабирования; на основе среднего значения [26]. Данные были разделены на обучающую, тестовую и контрольную выборки и преобразованы в формат, совместимый с используемыми методами машинного обучения.

Для построения и оценки моделей *LSTM* использовался фреймворк *Keras* [27]. Архитектура модели включала входной слой, заданное количество скрытых слоёв и выходной слой, оптимизированный с помощью алгоритма *Adam* [28]. Перебор гиперпараметров, включая точность обучения, размер пакета данных, тип нормализации и количество скрытых слоёв, проводился с использованием кросс-валидации и отрицательной среднеквадратичной ошибки в качестве функции потерь. Обучение модели осуществлялось с использованием лучших параметров, определённых в процессе перебора, и последующим восстановлением исходных значений для оценки результатов.

Для оценки влияния предобработки данных на эффективность алгоритма градиентного бустинга деревья решений были протестированы на данных с различными типами нормализации, а также на исходном, ненормализованном наборе данных. С целью оптимизации гиперпараметров каждой модели *CatBoost* (обученной на данных с различными типами нормализации) был реализован поиск по сетке с варьированием скорости обучения, глубины дерева, количества итераций и коэффициента *L2*-регуляризации. Оценка качества моделей производилась посредством кросс-валидации с использованием *MultiRMSE* [17]:

$$MultiRMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{d=1}^{dim} (y_{id} - \hat{y}_{id})^2},$$

где N — количество наблюдений в выборке; dim – количество зависимых переменных; y_{id} — истинное значение d -го признака для i -го наблюдения; \hat{y}_{id} — предсказанное моделью значение d -го признака для i -го наблюдения.

Перед проведением вычислительного эксперимента выполняется настройка моделей. Из набора данных выделена тестовая выборка, на которой методом *grid search* [29] определены гиперпараметры моделей: тип нормализации данных; количество скрытых слоёв; размеры

пакетов данных; количество итераций; коэффициенты регуляризации; глубина и точность обучения. Гиперпараметры для методов *LSTM* и *CatBoost* представлены в таблице 1. Тип нормализация для метода *LSTM* был выбран максимально-минимальный, точность обучения составила 0,001, а для метода *CatBoost* – 0,1. Схемы моделей, применённые для каждого метода, представлены на рисунках 6-8.

Таблица 1 – Гиперпараметры методов *LSTM* и *CatBoost*

Метод	<i>LSTM</i>		<i>CatBoost</i>		
	Количество скрытых слоев	Размер пакета данных	Количество итераций	Коэффициент регуляризации	Глубина
По проценту потерь	5	1	1000	5	4
По углам	3	1	3000	7	10
По линейным параметрам	5	15	3000	7	15

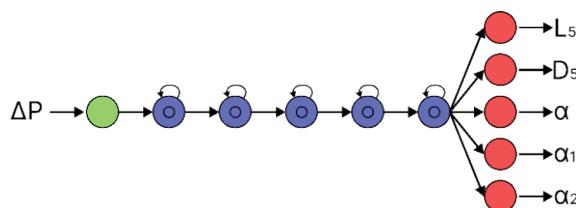


Рисунок 6 – Схема модели, предиктором которой является потеря полного давления в диффузоре

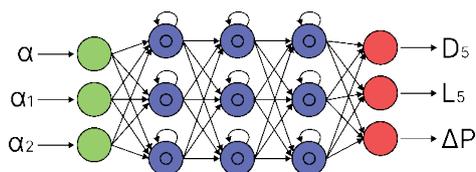


Рисунок 7 – Схема модели, предикторами которой являются углы раскрытия диффузора и наклона осевой линии

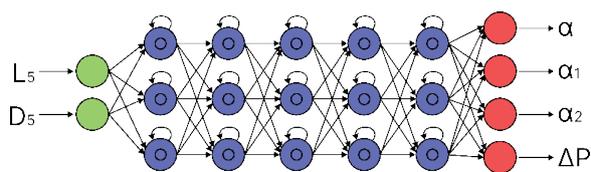


Рисунок 8 – Схема модели, предикторами которой являются линейные параметры диффузора

4 Вычислительный эксперимент и анализ результатов

В ходе вычислительного эксперимента верифицировались значения ППД, предсказанные методами *LSTM* и *CatBoost* со значениями ППД, полученными в результате численного моделирования диффузора в *Ansys Fluent*. Модель диффузора строилась по спрогнозированным геометрическим параметрам. Значения входных параметров для каждой модели задавались случайным образом из принятых диапазонов (см. раздел 2). В модели, предиктором которой был процент ППД, задаваемый диапазон ограничен максимальным значением 1,1%.

В таблице 2 представлены примеры трёх строк из набора данных, полученного в результате расчётов в *Ansys Fluent*. Входные параметры для моделей *LSTM* и *CatBoost* брались из этих строк, выходные – предсказывались. По ним строилась геометрия диффузора и проводился верификационный расчёт прогноза по моделям *LSTM* и *CatBoost*.

Вычислительный эксперимент повторен 12 раз. Определены погрешности спрогнозированных процентов ППД от эталонных, полученных в результате расчётов в *Ansys Fluent*. Построены графики зависимости погрешности от спрогнозированного процента потерь (рисунки 9 и 10). Для каждой модели определено среднее значение погрешности предсказанных ППД. Метод *CatBoost* обеспечивает наилучшую точность предсказания геометрических параметров диффузора по проценту потерь (средняя погрешность 1,64%). Сводные данные приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Полученные параметры диффузора с помощью разных алгоритмов на трёх наборах предикторов

Методы	Набор X	$L_{Д}$, мм	$d_{Д}$, мм	α , град	α_1 , град	α_2 , град	$P_{ВЫХ}^*$, МПа	$P_{ВХ}^*$, МПа	Δp^* , %
Ansys	По проценту потерь	72,69	466,26	2,39	5,80	6,10	5,230	5,249	0,36
	По углам	77,70	522,00	2,50	4,57	5,77	3,179	3,205	0,80
	По линейным параметрам	75,00	542,00	1,50	3,60	5,40	3,183	3,205	0,66
CatBoost	По проценту потерь	73,20	468,80	2,30	6,10	6,20	5,230	5,249	0,36
	По углам	77,20	538,40	2,50	4,57	5,77	3,176	3,205	0,90
	По линейным параметрам	75,00	542,00	1,90	4,50	5,80	3,186	3,205	0,56
Верификация прогноза CatBoost	По проценту потерь	73,20	468,80	2,30	6,10	6,20	5,227	5,249	0,37
	По углам	77,20	538,40	2,50	4,57	5,77	3,175	3,205	0,93
	По линейным параметрам	75,00	542,00	1,90	4,50	5,80	3,186	3,205	0,58
LSTM	По проценту потерь	79,00	453,60	2,74	6,64	6,90	3,190	3,202	0,36
	По углам	79,67	491,08	2,50	4,57	5,77	4,587	4,641	1,17
	По линейным параметрам	75,00	542,00	2,50	4,57	5,77	4,458	4,508	1,12
Верификация прогноза LSTM	По проценту потерь	79,00	453,60	2,74	6,64	6,90	3,190	3,202	0,38
	По углам	79,67	491,08	2,50	4,57	5,77	4,580	4,641	1,30
	По линейным параметрам	75,00	542,00	2,50	4,57	5,77	4,450	4,509	1,29

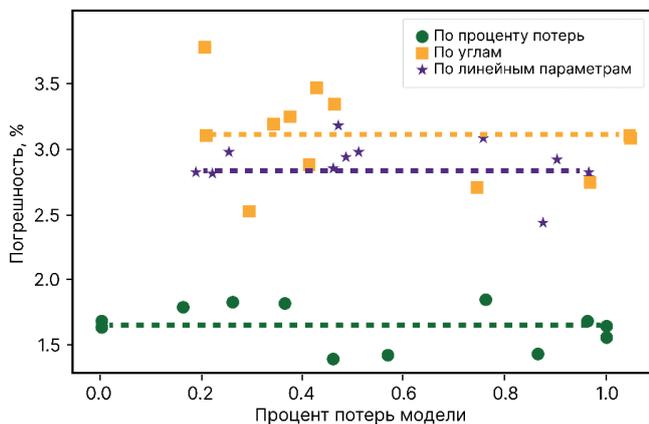


Рисунок 9 – Зависимости погрешности моделей CatBoost, среднее значение погрешности модели (пунктирная линия)

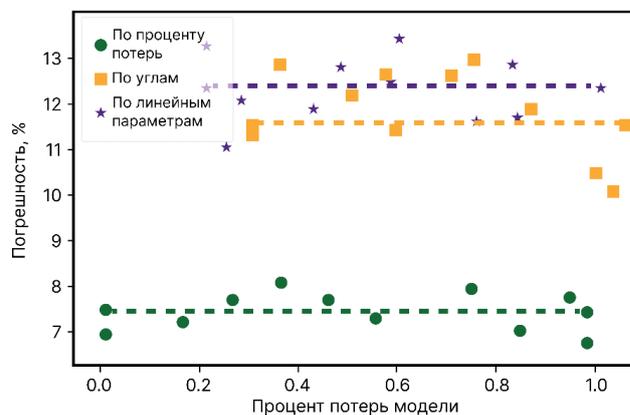


Рисунок 10 – Зависимости погрешности моделей LSTM, среднее значение погрешности модели (пунктирная линия)

Таблица 3 – Средние значения погрешностей методов

Методы	Модели		
	По потерям, $X=\Delta p^*$	По углам, $X= \{ \alpha, \alpha_1, \alpha_2 \}$	По линейным параметрам $X= \{ L_{Д}, d_{Д} \}$
CatBoost	1,64%	3,11%	2,84%
LSTM	7,28%	11,39%	12,19%

Для взаимодействия с обученными моделями создан веб-интерфейс с использованием следующих технологий.

- *React*⁵: библиотека *JavaScript*, обеспечивающая динамическое обновление пользовательского интерфейса.
- *Material UI (MUI)*⁶: библиотека готовых компонентов пользовательского интерфейса.
- *React-hot-toast*⁷: инструмент для визуализации.
- *Flask*⁸: фреймворк для разработки серверной часть системы.

⁵ <https://react.dev/>

⁶ <https://mui.com/material-ui/>

⁷ <https://react-hot-toast.com/>

⁸ <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/>

Заключение

В работе проведено сравнение вариантов применения методов, использующих нейросетевую *LSTM* модель и алгоритм градиентного бустинга *CatBoost*, для проектирования диффузора КС ГТД. Анализ полученных результатов показал, что *CatBoost* предпочтителен при имеющемся объёме обучающих данных. Средняя погрешность *CatBoost* составила 1,64%.

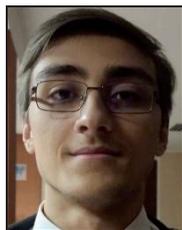
Формирование базы данных, полученных с помощью *CFD*-расчётов, позволило на основе машинного обучения существенно сократить время предварительной оценки геометрических параметров диффузора КС ГТД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Parkov V., Shadyrov N., Pashchenko D.* CFD-modeling of fluid flow in Ansys Fluent using Python-based code for automation of repeating calculations. *International Journal of Modern Physics C*. 2023. Vol.34. Iss.09. P.1-15. DOI: 10.1142/S0129183123501140.
- [2] *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир. 1986. 566 с.
- [3] *Григорьев А.В., Митрофанов В.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д.* Теория камеры сгорания. Под ред. О.А. Рудакова. Санкт-Петербург: Наука. 2010. 227 с.
- [4] *Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г.* Формы, режимы течения и критерии эффективности диффузоров камер сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2013. Т.197. С.16-19.
- [5] *Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г.* Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2016. 260 с.
- [6] *Klimberg R.* Fundamentals of Predictive Analytics with JMP, Third Edition. *SAS Institute*. 2023. 494 p.
- [7] *Chen M.-S., Han J., Yu P.S.* Data mining: an overview from a database perspective. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 1996. Vol.8. Iss.6. P.866–883. DOI: 10.1109/69.553155.
- [8] *Ghahramani M., Qiao Y., Zhou M.C., O'Hagan A., Sweeney J.* AI-based modeling and data-driven evaluation for smart manufacturing processes. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2020. Vol.7. Iss.4. P.1026–1037. DOI: 10.1109/jas.2020.1003114.
- [9] *Voulodimos A., Doulamis N., Doulamis A., Protopapadakis E.* Deep Learning for Computer Vision: a Brief Review. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2018. Vol.2018. P.1–13. DOI: 10.1155/2018/7068349.
- [10] *Gareev A., Protsenko V., Stadnik D., Greshniakov P., Yuzifovich Yu., Minaev E., Gimadiev A., Nikonorov A.* Improved Fault Diagnosis in Hydraulic Systems with Gated Convolutional Autoencoder and Partially Simulated Data. *Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2021. Vol.21. Iss.13. P.4410. DOI: 10.3390/s21134410.
- [11] *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep Learning. *Cambridge, Massachusetts: The MIT Press*. 2016. 781 p.
- [12] *Kusiak A.* Feature transformation methods in data mining. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2001. Vol.24. Iss.3. P.214–221. DOI: 10.1109/6104.956807.
- [13] *Xu Y., Goodacre R.* On Splitting Training and Validation Set: A Comparative Study of Cross-Validation, Bootstrap and Systematic Sampling for Estimating the Generalization Performance of Supervised Learning. *Journal of Analysis and Testing*. 2018. Vol.2. Iss.3. P.249–262. DOI: 10.1007/s41664-018-0068-2.
- [14] *Zhou K., Liu Z., Qiao Y., Xiang T., Loy C.C.* Domain Generalization: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol.45. Iss.4. P.4396–4415. DOI: 10.1109/tpami.2022.3195549.
- [15] *Bzdok D., Altman N., Krzywinski M.* Statistics versus machine learning. *Nature Methods*. 2018. Vol.15. Iss.4. P.233-234. DOI: 10.1038/nmeth.4642.
- [16] *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997. Vol.9. Iss.8. P.1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [17] *Dorogush A.V., Ershov V., Gulin A.* CatBoost: gradient boosting with categorical features support. *arXiv.org*. 2018. 7 p. DOI: 10.48550/arXiv.1810.11363
- [18] *Ryskova D., Nikonorov A., Pirogov A., Makarov A., Skidanov R., Muzyka A., Podlipnov V., Firsov N., Ivliev N., Lobanov V.* Neural network classification of soils with different carbon and calcium content based on hyperspectral data. *2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. IEEE, 2023. P.1–4. DOI: 10.1109/itnt57377.2023.10139139.
- [19] *Wu Y., Feng J.* Development and Application of Artificial Neural Network. *Wireless Personal Communications*. 2017. Vol.102. P.1645–1656. DOI: 10.1007/s11277-017-5224-x.
- [20] *Sharkawy A.-N.* Principle of Neural Network and Its Main Types: Review. *Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics*. 2020. Vol.7. Iss.1. P.8–19. DOI: 10.15377/2409-5761.2020.07.2.

- [21] *Yu Y., Si X., Hu C., Zhang J.* A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures. *Neural Computation*. 2019. Vol.31. Iss.7. P.1235–1270. DOI: 10.1162/neco_a_01199.
- [22] *Арзамасцев С.А., Бгатов М.В., Кармышева Е.Н., Деркунский В.А., Семенчиков Д.Н.* Предсказание оттока абонентов: сравнение методов машинного обучения. *Computer Tools in Education*. 2018. Т.5. С.5–23. DOI: 10.32603/2071-2340-2018-5-5-23.
- [23] *Bühlmann P., Yu B.* Boosting. *WIREs Computational Statistics*. 2009. Vol.2. Iss.1. P.69–74. DOI: 10.1002/wics.55.
- [24] *Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В., Ковылов Ю. Л., Резник В. Е., Цыбизов Ю. И.* Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. Самара: СНЦ РАН. 2002. 527 с.
- [25] *Давлетишин Ф.М., Овчинников А.А., Николаев Н.А.* Интенсификация теплообмена при дисперсно-кольцевом течении газожидкостного потока в каналах. Казань: КФУ. 2001. С.87.
- [26] *Старовойтов В.В., Голуб Ю.И.* Нормализация данных в машинном обучении. *Информатика*. 2021. Т.18(3). С.83–96. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.
- [27] *John J., Nonsiri S., Monsakul A.* Keras and TensorFlow: A Hands-On Experience. *Advanced Deep Learning for Engineers and Scientists*. 2021. Vol.4. P.85–111. DOI: 10.1007/978-3-030-66519-7-4.
- [28] *Kingma D., Ba J.* Adam: A Method for Stochastic Optimization. *Computer Science*. 2014. P.15. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
- [29] *Syarif I., Prugel-Bennett A., Wills G.* SVM Parameter Optimization Using Grid Search and Genetic Algorithm Improve Classification. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2016. Vol.14. Iss.4. P.1502-1509. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v14i4.3956.

Сведения об авторах



Борисов Дмитрий Сергеевич, 1999 г. рождения. Аспирант кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов сосредоточена на разработке программных средств для интеллектуального анализа данных. Author ID (Scopus): 57202978154, Author ID (ORCID): 0009-0007-5315-2357. dimbaborisov290699@yandex.ru.

Симовин Кирилл Константинович, 2003 г. рождения. Окончил Самарский университет (2024). Студент магистратуры ИТМО. Author ID (РИНЦ): 1275296, Author ID (ORCID): 0009-0005-3928-7218. ksimovin@bk.ru.



Благов Александр Владимирович, 1985 г. рождения. Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева в 2008 г., к.т.н. (2011), доцент (2023). Доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: интеллектуальный анализ, кластеризация и классификация данных. Author ID (Scopus): 56641501400, Author ID (РИНЦ): 623124. blagov@ssau.ru.

Юкина Дарья Романовна, 2000 г. рождения. Аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета. Область научных интересов: рабочие процессы в камерах сгорания ГТД. Author ID (РИНЦ): 1261698, Author ID (ORCID): 0009-0001-2478-9646. bobkova.dr@ssau.ru. ✉.



Чет Иван Викторович, 1975 г. рождения. Окончил аспирантуру Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева в 2000 г., к.т.н. (2018). Доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета. Область научных интересов: рабочие процессы в камерах сгорания ГТД. Author ID (Scopus): 57057784900, Author ID (РИНЦ): 590961. Author ID (ORCID): 0000-0002-0439-1921. chechet@ssau.ru.

Матвеев Сергей Геннадьевич, 1959 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королева в 1982 г., к.т.н. (1989), доцент (2002). Профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета. Область научных интересов: рабочие процессы в камерах сгорания ГТД. Author ID (Scopus): 7005054165, Author ID (ORCID): 0000-0002-2865-241X, Author ID (РИНЦ): 379745. msg@ssau.ru.



Поступила в редакцию 23.01.2025, после рецензирования 27.06.2025. Принята к публикации 01.07.2025.



Application of machine learning methods in designing combustion chambers of gas turbine engines

© 2025, D.S. Borisov¹, K.K. Simovin², D.R. Yukina¹✉, A.V. Blagov¹, I.V. Chechet¹, S.G. Matveev¹

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

² ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article considers the application of a recurrent neural network with long short-term memory (LSTM) and a gradient boosting algorithm for determining the key geometric dimensions of the diffuser of the combustion chamber of an aircraft gas turbine engine. Numerical modeling of physical processes in the diffuser is performed based on the finite element method, and total pressure losses are subsequently calculated. A database is compiled containing various geometric configurations of the diffuser model alongside the corresponding total pressure loss values. The configuration with the lowest total pressure loss is selected as the reference. The performance of the gradient boosting method is compared with that of the LSTM neural network, based on the total pressure loss data obtained from numerical modeling of the diffuser across a range of geometric configurations. The gradient boosting approach yielded an error of 1.64%, whereas the LSTM network demonstrated an error of 7.28%. This approach enables the creation of a design database for diffuser configurations, facilitates the use of simulation data to train neural networks, and allows for subsequent training on alternative designs. The results can be applied in the design and optimization of combustion chambers in aircraft engines.

Keywords: machine learning, gradient boosting, recurrent neural network, designing, combustion chamber diffuser, finite element method.

For citation: Borisov D.S., Simovin K.K., Yukina D.R., Blagov A.V., Chechet I.V., Matveev S.G. Application of machine learning methods in designing combustion chambers of gas turbine engines [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 351-362. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-351-362.

Authors' contributions: Borisov D.S. – selection of machine learning methods and neural network models; Simovin K.K. – data preparation, development and testing of neural network models; Yukina D.R. – model preparation, data collection and systematization; Blagov A.V. – problem statement, analysis of neural network training results; Chechet I.V. – model parameterization, analysis of modeling and machine learning results; Matveev S.G. – development of the article structure and editorial revision.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 – Diagram of the artificial neural network model
- Figure 2 – Diagram of the recurrent neural network
- Figure 3 – Diagram of the long short-term memory (LSTM) neural network
- Figure 4 – Diagram of the gradient boosting algorithm
- Figure 5 – Diagram of the diffuser design of the combustion chamber with sudden expansion
- Figure 6 – Diagram of the model with total pressure loss in the diffuser as the predictor
- Figure 7 – Diagram of the model with the diffuser expansion angles and the axial line inclination as predictors
- Figure 8 – Diagram of the model with the diffuser linear parameters as predictors
- Figure 9 – Graph of the error dependence of CatBoost models, average model error (dashed line)
- Figure 10 – Graph of the error dependence of LSTM models, average model error (dashed line)
- Table 1 - Hyperparameters of LSTM and CatBoost methods
- Table 2 - Diffuser parameters obtained using different algorithms on three sets of predictors
- Table 3 - Average error values of the methods (in percent)

References

- [1] **Papkov V, Shadymov N, Pashchenko D.** CFD-modeling of fluid flow in Ansys Fluent using Python-based code for automation of repeating calculations. *International Journal of Modern Physics C.* 2023; 34(09): 1-15. DOI: 10.1142/S0129183123501140.
- [2] **Lefevre A.** Gas Turbine Engine Combustion Processes [In Russian]. Moscow: Mir Publ.; 1986. 566 p.
- [3] **Grigoriev AV, Mitrofanov VA, Rudakov OA, Salivon ND.** Combustion Chamber Theory [In Russian]. Ed. by O.A. Rudakov. Saint Petersburg: Nauka; 2010. 227 p.
- [4] **Lansky AM, Lukachev SV, Matveev SG.** Forms, flow modes and efficiency criteria of combustion chamber diffusers of small-size gas turbine engines [In Russian]. *Scientific Bulletin of MSTU GA.* 2013; 197: 16-19.
- [5] **Lansky AM, Lukachev SV, Matveev SG.** Combustion chamber workflow of small-size GTEs [In Russian]. Samara: Publishing of SamNC RAS.; 2016. 260 p.
- [6] **Klimberg R.** Fundamentals of Predictive Analytics with JMP, Third Edition. SAS Institute; 2023. 494 p.
- [7] **Chen MS, Han J, Yu PS.** Data mining: an overview from a database perspective. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.* 1996; 8(6): 866–883. DOI: 10.1109/69.553155.
- [8] **Ghahramani M, Qiao Y, Zhou MC, O'Hagan A, Sweeney J.** AI-based modeling and data-driven evaluation for smart manufacturing processes. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica.* 2020; 7(4): 1026–1037. DOI: 10.1109/jas.2020.1003114.
- [9] **Voulodimos A, Doulamis N, Doulamis A, Protopapadakis E.** Deep Learning for Computer Vision: a Brief Review. *Computational Intelligence and Neuroscience.* 2018; 2018: 1–13. DOI: 10.1155/2018/7068349.
- [10] **Gareev A, Protsenko V, Stadnik D, Greshniakov P, Yuzifovich Yu, Minaev E, Gimadiev A, Nikonorov A.** Improved Fault Diagnosis in Hydraulic Systems with Gated Convolutional Autoencoder and Partially Simulated Data. *Sensors.* Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2021; 21(13): 4410. DOI: 10.3390/s21134410.
- [11] **Goodfellow I, Bengio Y, Courville A.** Deep Learning. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.; 2016. 781 p.
- [12] **Kusiak A.** Feature transformation methods in data mining. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing.* 2001; 24(3): 214–221. DOI: 10.1109/6104.956807.
- [13] **Xu Y, Goodacre R.** On Splitting Training and Validation Set: A Comparative Study of Cross-Validation, Bootstrap and Systematic Sampling for Estimating the Generalization Performance of Supervised Learning. *Journal of Analysis and Testing.* 2018; 2(3): 249–262. DOI: 10.1007/s41664-018-0068-2.
- [14] **Zhou K, Liu Z, Qiao Y, Xiang T, Loy CC.** Domain Generalization: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2022; 45(4): 4396–4415. DOI: 10.1109/tpami.2022.3195549.
- [15] **Bzdok D, Altman N, Krzywinski M.** Statistics versus machine learning. *Nature Methods.* 2018; 15(4): 233-234. DOI: 10.1038/nmeth.4642.
- [16] **Hochreiter S, Schmidhuber J.** Long short-term memory. *Neural Computation.* 1997; 9(8): 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [17] **Dorogush AV, Ershov V, Gulin A.** CatBoost: gradient boosting with categorical features support; 2018. 7 p. DOI: 10.48550/arXiv.1810.11363
- [18] **Ryskova D, Nikonorov A, Pirogov A, Makarov A, Skidanov R, Muzyka A, Podlipnov V, Firsov N, Ivliev N, Lobanov V.** Neural network classification of soils with different carbon and calcium content based on hyperspectral data. 2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE. 2023: 1–4. DOI: 10.1109/itnt57377.2023.10139139.
- [19] **Wu Y, Feng J.** Development and Application of Artificial Neural Network. *Wireless Personal Communications.* 2017; 102: 1645–1656. DOI: 10.1007/s11277-017-5224-x.
- [20] **Sharkawy AN.** Principle of Neural Network and Its Main Types: Review. *Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics.* 2020; 7(1): 8–19. DOI: 10.15377/2409-5761.2020.07.2.
- [21] **Yu Y, Si X, Hu C, Zhang J.** A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures. *Neural Computation.* 2019; 31(7): 1235–1270. DOI: 10.1162/neco_a_01199.
- [22] **Arzamastsev SA, Bgatov MV, Kartysheva EN, Derkunsky VA, Semenchikov DN.** Prediction of subscriber churn: comparison of machine learning methods [In Russian]. *Computer Tools in Education.* 2018; 5: 5-23. DOI: 10.32603/2071-2340-2018-5-5-23.
- [23] **Bühlmann P, Yu B.** Boosting. *WIREs Computational Statistics.* 2009; 2(1): 69–74. DOI: 10.1002/wics.55.
- [24] **Gritsenko EA, Danilchenko VP, Lukachev SV, Kovylov YL, Reznik VE, Tsybizov YI.** Some issues of designing aircraft gas turbine engines [In Russian]. Samara: SSC RAS; 2002. 527 p.
- [25] **Davletshin FM, Ovchinnikov AA, Nikolaev NA.** Intensification of heat exchange at dispersed-ring flow of gas-liquid flow in channels [In Russian]. Kazan: Kazan Federal University; 2001. 87 p.
- [26] **Starovoitov VV, Golub YI.** Data Normalization in Machine Learning [In Russian]. *Informatics.* 2021; 18(3): 83–96. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.

- [27] **John J, Nonsiri S, Monsakul A.** Keras and TensorFlow: A Hands-On Experience. *Advanced Deep Learning for Engineers and Scientists*. 2021; 4: 85–111. DOI: 10.1007/978-3-030-66519-7-4.
- [28] **Kingma D, Ba J.** Adam: A Method for Stochastic Optimization. *Computer Science*. 2014: 1-15. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
- [29] **Syarif I, Prugel-Bennett A, Wills G.** SVM Parameter Optimization Using Grid Search and Genetic Algorithm Improve Classification. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2016; 14(4): 1502-1509. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v14i4.3956.
-

About the authors

Dmitry Sergeevich Borisov (b. 1999) is a postgraduate student of the Department of Technical Cybernetics at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. The research interests include development of software tools for intelligent data analysis. Author ID (Scopus): 57202978154, Author ID (ORCID): 0009-0007-5315-2357. dimaborisov290699@yandex.ru.

Kirill Konstantinovich Simovin (b. 2003) graduated from Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev in 2024. A first-year Master's student at ITMO University. Author ID (RSCI): 1275296, Author ID (ORCID): 0009-0005-3928-7218. ksimovin@bk.ru.

Alexander Vladimirovich Blagov (b. 1985) graduated from the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev in 2008, Ph.D. (2011), Associate Professor (2023). He is currently an associate professor of the Department of Technical Cybernetics at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. His research interests include intelligent analysis, clustering, and data classification. Author ID (Scopus): 56641501400, Author ID (RSCI): 623124. blagov@ssau.ru.

Daria Romanovna Yukina (b. 2000) is a postgraduate student of the Department of Heat Engineering and Heat Engines at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. Her research interests include operating processes in gas turbine combustion chambers. Author ID (ORCID): 0009-0001-2478-9646, Author ID (RSCI): 1261698. bobkova.dr@ssau.ru. ✉.

Ivan Viktorovich Chechet (b. 1975) graduated from the postgraduate program of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev in 2000, Ph.D. (2018). He is an associate professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. The research interests include operating processes in gas turbine engine combustion chambers. Author ID (Scopus): 57057784900, Author ID (ORCID): 0000-0002-0439-1921. Author ID (RSCI): 590961. chechet@ssau.ru.

Sergey Gennadievich Matveev (b. 1959) graduated from the Kuibyshev Aviation Institute named after Academician S.P. Korolev in 1982, Ph.D. (1989), Associate Professor (2002). He is a professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. His research interests include operating processes in gas turbine engine combustion chambers. Author ID (Scopus): 7005054165, (ORCID): 0000-0002-2865-241X, Author ID (RSCI): 379745. msg@ssau.ru.

Received January 21, 2025. Revised June 27, 2024. Accepted July 01, 2025.



Развитие системы информационного обеспечения административного органа территориального управления

© 2025, М.С. Максимов^{1,2} ✉, В.Н. Волкова¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

² Администрация Калининского района Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассматривается развитие системы информационного обеспечения административного органа территориального управления. Опубликованные работы, в которых поставлены задачи исследования особенностей информационного обеспечения административных органов территориального управления уровня районов города, практически отсутствуют. Применительно к системе информационного обеспечения административного управления районом города адаптированы концепции многоуровневого информационно-управляющего комплекса и сервис-ориентированной архитектуры. Для обоснования выбора инновационных технологий и сервисов при развитии информационного обеспечения административного органа территориального управления предложены методы и модели, основанные на применении системно-целевого подхода. Проведены структуризация и анализ целей и задач территориального управления. Предложены модели организации экспертиз, базирующиеся на оценке влияния инновационных технологий и программных продуктов на реализацию целей и задач, решаемых органом административного управления, с учётом взаимного влияния нововведений и существующего информационного обеспечения. Разработанные методы и модели позволяют оценивать значимость инновационных технологий для выполнения основных функций информационно-управляющего комплекса административного управления на уровне района города.

Ключевые слова: инновационные технологии, информационно-управляющий комплекс, информационные оценки, методы организации сложных экспертиз, системно-целевой подход, административно-территориальное управление.

Цитирование: Максимов М.С., Волкова В.Н. Развитие системы информационного обеспечения административного органа территориального управления. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.363-375. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-363-375.

Вклад авторов: Максимов М.С. – разработал модели и процедуры оценки инновационных технологий в территориальном управлении. Волкова В.Н. – предложила подход к адаптации системы информационного обеспечения органа административного управления к уровню района города.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В статье рассматривается разработка методов и моделей для оценки инновационных технологий и программных продуктов при развитии системы информационного обеспечения административного территориального управления. Решаются следующие задачи:

- анализ существующих подходов и методов автоматизации информационного обеспечения систем организационного управления;
- разработка концепции развития системы информационного обеспечения административного органа территориального управления;
- разработка методов и моделей обоснования выбора инновационных технологий и программных продуктов в информационном обеспечении административного территориального управления на уровне района города.

В начале развития автоматизации организационного управления создавалась теория, определяющая подходы и методы организации разработок, были подготовлены руководящие методические материалы [1], справочники [2–4], монографии и учебные издания [5–7 и др.], в которых введены понятия и подходы, используемые и в настоящее время.

Постоянно внедряются инновационные технологии, вводятся специализированные информационные системы. Например, в органах административного управления Санкт-Петербурга основным средством поддержки оказания государственных услуг является развитие Межведомственной автоматизированной информационной системы предоставления государственных и муниципальных услуг в электронном виде, включающей портал «Государственные и муниципальные услуги (функции) в Санкт-Петербурге» (*gu.spb.ru*), внутренний электронный документооборот многофункциональных центров и различные цифровые решения для сотрудников административного органа (подсистема «Электронный кабинет должностного лица» и др.). Развивается информационная система «Единый портал государственных и муниципальных услуг (функций)», появляются новые онлайн-сервисы и мобильные платформы («Госуслуги. Решаем вместе», «Госуслуги.Дом» и др.).

Руководителям подразделений, обеспечивающих информацией лиц, принимающих решения (ЛПР), важно ориентироваться в происходящих изменениях, для чего необходимы постановка и решение задачи развития системы информационного обеспечения административного органа территориального управления.

1 Постановка задачи развития системы информационного обеспечения административного органа территориального управления

Автоматизированные системы информационного обеспечения административных органов управления районами города начали создаваться с использованием теории разработки автоматизированных информационных систем (АИС), которая в основном развивалась на основе предприятий. Применялся системно-целевой подход, в соответствии с которым формировалась структура целей системы управления районом. Для полноты анализа применялись методики структуризации целей (напр., [6, 8]). На основе оценки целей и функций управления формировалась структура функциональной части АИС и планировалось определение состава информационных массивов для обеспечения функций управления.

Однако опыт показал, что такой подход позволяет создать информационное обеспечение структурных подразделений администрации, выполняющих функции материально-технического, кадрового, финансового обеспечения, учётно-отчётную деятельность. А информационное обеспечение задач управления районом имеет принципиальные особенности. Проблема обеспечения информацией процессов территориального управления многоаспектна (недвижимость, энергетика, транспорт, строительство, благоустройство и т.д.), собирать и хранить информацию по всем сферам деятельности района в одной автоматизированной информационной системе невозможно, что зависит не только от технических средств и ограниченных возможностей отдела информатизации, но и от законодательных ограничений, проблем безопасности. Для управления недвижимостью, энергетикой, транспортом и т.д. существуют специализированные комитеты, в которых формируются соответствующие базы данных. Но отвечает за все сферы деятельности района орган административного управления, который при необходимости запрашивает информацию из внешних источников, из хранилищ специализированных комитетов и из общих информационных баз города. Поэтому необходима единая база населения города, единые постоянно актуализируемые системы нормативно-правовой информации и т.п.

Автоматизация информационного обеспечения стала развиваться практически стихийно, на основе инициатив и запросов сотрудников администрации. Но вскоре было обнаружено, что накапливаемые средства автоматизации и информационные массивы необходимо упорядочивать. Для целей административного органа стали приобретаться готовые программные продукты – информационные системы типа бухгалтерских, кадровых, учётно-отчётных и др. Разрабатывались и собственные информационные системы. Возникла неудобная ситуация – «система систем». Понадобился какой-то термин для названия объединённой структуры. Была предложена идея создания *информационного комплекса*, объединяющего внутренние и внешние информационные ис-

точники. Но программные продукты для автоматизации информационного обеспечения административных органов по-прежнему приобретаются по мере возникновения потребности и не упорядочены.

С учётом полученного опыта предлагается применить концепцию создания информационно-управляющего комплекса, объединяющего внутренние, внешние информационные источники и создаваемые или приобретаемые новые технологии и сервисы. Концепция основана на представлении структуры в виде страт в понимании теории иерархических структур М. Месаровича [9].

Для разработки модели системы информационного обеспечения органа административного управления предложено использовать определение системы, основанное на системно-целевом подходе [10]:

$$S_{def} \equiv \langle Z, STR, TECH, COND, N \rangle,$$

где $Z = \{z\}$ – структура целей и функций системы управления, потребности / запросы пользователей; $STR: Z \times IM$ – структура, объединяющая Z и информационные источники / информационные массивы IM ; $TECH$ – технологии (методы, технические и программные средства, алгоритмы и т.п.); $COND$ – условия существования системы, т.е. факторы, влияющие на её создание и функционирование; N – «наблюдатели» (термин введён У. Эшби [11]), стейкхолдеры (в теории информационных систем [12]), т.е. ЛПР, принимающие участие в формировании системы.

Полученная на основе этой концепции модель стратифицированной системы названа многоуровневым информационно-управляющим комплексом (МИУК).

Модель МИУК можно представить в виде четырёх страт (таблица 1): *пользовательской (N)*, *функциональной (Z)*, *информационной (IM)*, *технологической (TECH)*, включая технические, программные средства, средства телекоммуникации, интернет.

Таблица 1 – Модель многоуровневого информационно-управляющего комплекса

N	Страта 1. Пользовательская		
	Сотрудники подразделений административного органа	Вышестоящие органы административного управления	Население и предприятия
Z	Страта 2. Функциональная		
	Информационные потребности пользователей и правила взаимодействия с информационной системой		
	Запросы сотрудников административного органа	Запросы вышестоящих административных органов	Запросы населения и предприятий
IM	Страта 3. Информационная		
	Совокупность информационных массивов, создаваемых и хранящихся в МИУК		
	Внутренние	Внешние	
	Население района	Базы данных города	
	Материально-техническое обеспечение	Население	
	Кадры администрации	Энергетика	
	Документооборот	Транспорт	
	
TECH	Страта 4. Технологическая		
	Технические и программные средства, телекоммуникации и интернет		
	Технические средства	Программные средства	Телекоммуникации и интернет

Форму МИУК можно считать «виртуальной». Но она позволяет структурному подразделению, осуществляющему информационное обеспечение процессов органа административного управления, отвечать на запросы сотрудников других подразделений административного органа или помогать им самостоятельно искать ответы на эти запросы, что становится

возможным в условиях внедрения инновационных технологий, и, таким образом, развивать обобщённое информационное пространство и разрабатывать соответствующие рекомендации и алгоритмы поиска.

Стратифицированное представление помогает ставить и решать задачи управления развитием МИУК, разработки новых сервисов, распределения ресурсов, определения состава компонентов каждой из страт. В состав информационной страты включаются программы, реализующие модели и алгоритмы принятия решений.

Для принятия решений по развитию МИУК используются методы и модели системного анализа: методики структуризации целей и функций систем управления, методы организации сложных экспертиз [13], для реализации которых разрабатываются автоматизированные диалоговые процедуры [14].

Структура целей МИУК органа административного управления определяет выбор задач, технологий и сервисов, соответствующих целям развития системы информационного обеспечения администрации. Взаимосвязь структуры целей и организационной структуры позволит более обоснованно выбирать экспертов для оценки нововведений.

Стратифицированная структура упрощает постановку различных задач: исследование взаимосвязи между уровнями стратифицированного комплекса; формирование соответствующих структуре МИУК многоуровневых моделей «информационные потребности – информационное обеспечение (информационные массивы, источники) – технические / программные средства».

При оценке значимости нововведений необходимо вводить разнородные критерии, применять методы организации экспертиз: оценки методики ПАТТЕРН [15], метод анализа иерархий Т. Саати [16], метод решающих матриц Г.С. Поспелова [17, 18], метод комбинаторной топологии [19], модели, основанные на информационной теории А.А. Денисова [20, 21].

В данной работе предложено применить модели, основанные на информационной теории А.А. Денисова: на оценках, которые получают от единичных экспертов, разрабатывающих предлагаемые нововведения или имеющих опыт их применения, и обобщают их с помощью преобразования в информационные оценки.

2 Модели оценки и выбора нововведений для развития информационно-управляющего комплекса

На развитие МИУК административного органа территориального управления влияют два вида нововведений.

Первые – это нововведения, которые просит оценить администрация города или области, в которую входит орган административного управления районом. Список таких нововведений (например, благоустройство парковых и дворовых территорий, строительство и модернизация социальных объектов, объектов инфраструктуры, внедрение информационных и бережливых технологий в учреждениях, и т.п.) постоянно рекомендуется органу административного управления районом для принятия решений о целесообразности внедрения или отклонения нововведений. Оценка делается в виде «принять – отклонить» с обоснованием принимаемых решений. Для подготовки обоснований нужна соответствующая информация о состоянии, истории развития территории, объекта. Такую информацию нужно запрашивать в различных внешних информационных источниках (специализированных информационных системах, базах данных, архивах и т.п.). Для сбора, анализа и обобщения информации необходима постановка задачи с учётом технических, технологических, программных, кадровых ресурсов, разработка алгоритмов и программного обеспечения для сбора и обработки информации, представления её ЛПР.

Второй – приобретение или разработка новых технологий и сервисов, необходимых для развития МИУК.

Подобные задачи решаются на основе обсуждений и предложений экспертов, определяемых с помощью анализа предшествующего опыта. Прежде всего, нужно определить – каким подразделениям административного органа поручить разработку проекта процесса принятия решений. Помощь в разработке и реализации планов такой работы может оказать предварительно проведённая работа по определению подразделений организаци-

онной структуры административного органа, ответственных за выполнение целей и функций системы управления территориальным образованием.

Для постановки и решения выбора инноваций предлагается использовать системно-целевой подход, который заключается в построении структуры целей и оценке влияния нововведений на реализацию целей:

$$Z \Psi INN, \tag{1}$$

где $Z = \langle z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_m \rangle$ – подцели и задачи органа административного управления, запросы пользователей; $INN = \langle inn_1, inn_2, \dots, inn_i, \dots, inn_k \rangle$ – нововведения; Ψ – функционал, реализуемый в диалоговом режиме с применением разработанных алгоритмов и автоматизированных диалоговых процедур [14].

Функционал Ψ удобнее представлять графической моделью. Иллюстративный пример модели представлен на рисунке 1.

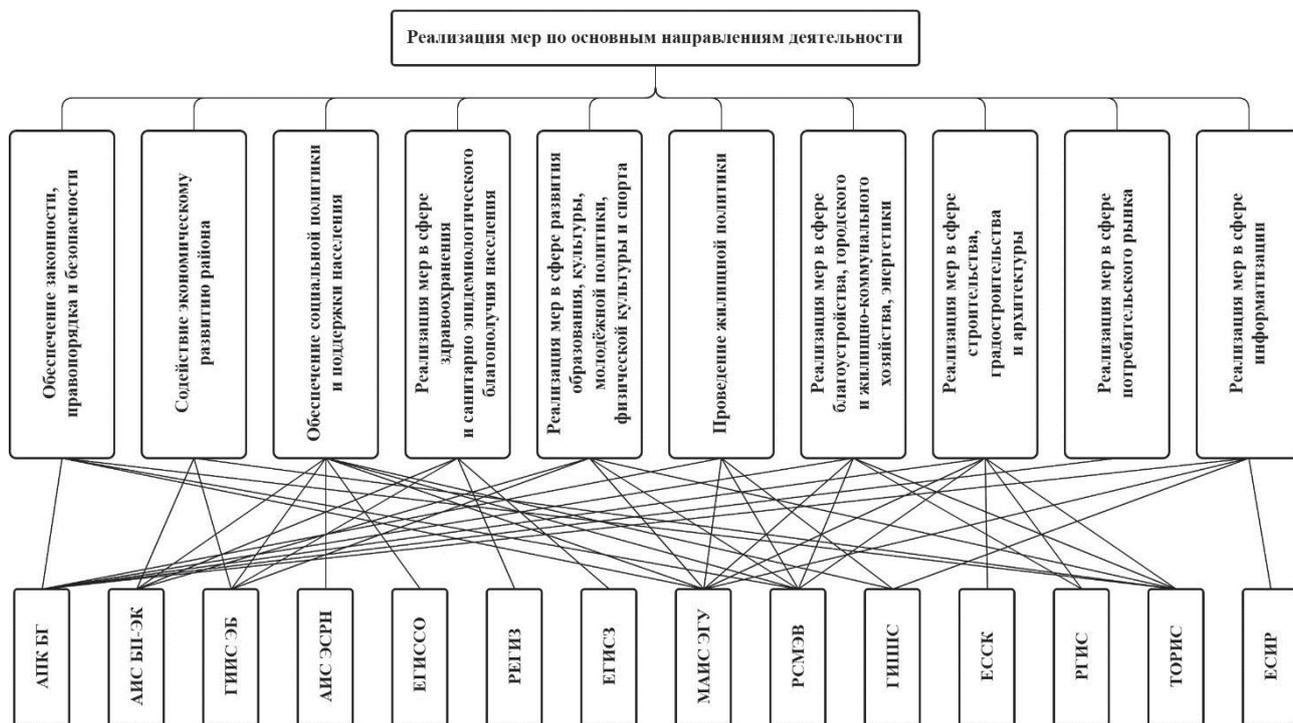


Рисунок 1 – Графическое представление модели взаимосвязи информационных баз, для доступа к которым разрабатываются нововведения / сервисы, и подцелей / задач

Вверху – структура целей и задач z_j , которые в приведённом примере определяются нормативным документом, регламентирующим необходимые меры по развитию системы информатизации администрации. Внизу – приведены информационные источники, для доступа к которым имеются (и их нужно осваивать) или нужно разрабатывать сервисы, которые рассматриваются в администрации как нововведения или инновации inn_i (расшифровка аббревиатур приведена в таблице 2).

Графическое представление помогает лучше понять задачу выбора инноваций. Однако применять его на практике, использовать в формализованной постановке задачи и корректировать сложно. Поэтому для отображения взаимосвязей между информационными источниками, для доступа к которым нужны сервисы / нововведения inn_i , и целями z_j в формируемом пространстве взаимосвязей предлагается использовать бинарные структурные отношения – синтагмы $r_{ij} (inn_i, z_j)$ – подобно отображению пространства в теории ситуационного управления Д.А. Поспелова – Л.С. Загадской (Болотовой) (см. ссылки в [22]).

Таблица 2 – Информационные базы, для доступа к которым разрабатываются нововведения / сервисы

Аббревиатура	Расшифровка
АПК БГ	Аппаратно-программный комплекс «Безопасный город»
АИС БП-ЭК	Автоматизированная информационная система бюджетного процесса – электронное казначейство
ГИИС ЭБ	Государственная интегрированная информационная система управления общественными финансами «Электронный бюджет»
АИС ЭСРН	Автоматизированная информационная система «Электронный социальный регистр населения Санкт-Петербурга»
ЕГИССО	Единая государственная информационная система социального обеспечения
РЕГИЗ	Региональный фрагмент единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения
ЕГИСЗ	Единая государственная информационная система здравоохранения
МАИС ЭГУ	Межведомственная автоматизированная информационная система предоставления в Санкт-Петербурге государственных и муниципальных услуг в электронном виде
РСМЭВ	Государственная информационная система Санкт-Петербурга «Система межведомственного электронного взаимодействия Санкт-Петербурга»
ГИПС	Городская информационно-поисковая подсистема «Население. Жилой фонд»
ЕССК	Государственная информационная система Санкт-Петербурга «Единая система строительного комплекса Санкт-Петербурга»
РГИС	Региональная информационная система «Геоинформационная система Санкт-Петербурга»
ТОРИС	Государственная информационная система Санкт-Петербурга «Территориальная отраслевая региональная информационная система»
ЕСИР	Государственная информационная система Санкт-Петербурга «Единая система информационных ресурсов официальных сайтов исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга и государственных учреждений Санкт-Петербурга»

Для формирования пространства взаимосвязей разработана и применяется автоматизированная диалоговая процедура, основанная на операции линейной алгебры «размещение с повторениями», с помощью которой формируется и хранится пространство синтагм, а экспертам для оценки выбираются и представляются фрагменты модели, связанные с нововведениями inn_i).

Проводить сравнительную оценку разнородных нововведений методами нормирования или ранжирования, применяемыми в различных вариантах методов коллективных экспертных оценок, в т.ч. при организации сложных экспертиз (многокритериальные оценки с учётом весовых коэффициентов критериев в методике ПАТТЕРН [15], оценки в методе решающих матриц Г.С. Поспелова [16, 17]), затруднительно без привлечения экспертов, хорошо знающих достоинства и недостатки используемых технологий и сервисов.

Поэтому предлагается использовать модели организации сложных экспертиз, основанные на информационной теории А.А. Денисова [21]. Эти методы основаны на оценках единичных экспертов, хорошо знающих предлагаемые нововведения. Эксперты оценивают степень влияния нововведения на реализацию задачи или функции в структуре целей органа административного управления и вероятность реализации нововведения:

$$H_i = -q_i \log(1 - p_i'), \quad (2)$$

где p_i' – степень влияния нововведения на достижение цели (оценивают эксперты, хорошо знающие предлагаемые сервисы); q_i – вероятность / полезность реализации оцениваемого нововведения (оценивают пользователи – сотрудники органа административного управления, которые будут применять сервисы; вначале оценивают интерфейс, удобство пользования, в перспективе – полезность сервиса на основе накопления этих оценок).

В одной оценке объединены два критерия, оценки по которым дают разные эксперты. Оценки должны удовлетворять следующим условиям: $\begin{cases} 0.7 < p'_i < 0.99 \\ \sum_i q_i = 1. \end{cases}$

Совокупное влияние нововведения на несколько подцелей: $H_i = -\sum_{j=1}^m q_{ij} \log(1 - p'_{ij})$. Полученные оценки можно представить в виде гистограмм, что иногда достаточно для ЛПР. Можно получить относительные оценки ξ :

$$H_S = \sum_{i=1}^n H_i \rightarrow \xi_i = H_i/H_S \rightarrow \sum_{i=1}^n \xi_i = 1. \tag{3}$$

Алгоритм оценки представлен на рисунке 2.

При оценке нововведений предлагается учесть значимость задач, для решения которых необходимы приобретаемые технологии / сервисы. Выполнить это позволяет метод решающих матриц: $inn_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}z_j$, где z_j – относительная значимость задачи в структуре целей / меры по развитию МИУК; inn_i – нововведения; a_{ij} – оценки относительной значимости i -х нововведений для каждой j -ой задачи. Оцениваются только те нововведения, которые связаны с задачей. При объединении метода решающих матриц и информационных оценок H_{ij} нужно оценки, полученные на основе соотношения (2), нормировать в соответствии с (3), а затем вместо H_i подставить оценки ξ .

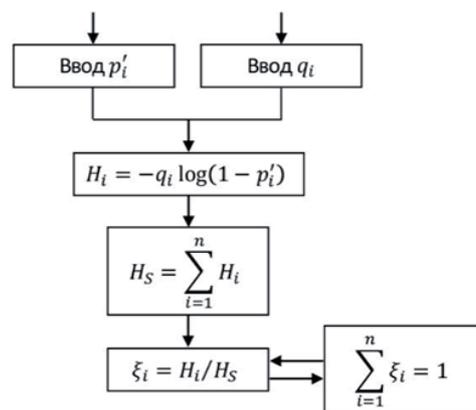


Рисунок 2 – Алгоритм реализации метода

В результате объединяются возможности метода, основанного на оценке степени влияния нововведения на решение задачи, полученной от экспертов, и метода решающих матриц, позволяющего учитывать оценки значимости задач.

На рисунке 3 представлен пример фрагмента модели для задачи: пользователем является руководитель подразделения, обеспечивающего информатизацией орган административного управления; задачей – развитие информатизации этого органа. Аналогично строятся модели для постоянно возникающих запросов от населения, предприятий, органов местного самоуправления, иных исполнительных органов государственной власти, функции и информационные базы которых вынесены за пределы рассматриваемого органа административного управления.

Как правило, возникающие запросы связаны с координацией деятельности различных структурных подразделений органа административного управления. Поэтому в каждом случае необходимо формировать модель и проводить оценки и анализ. Для выполнения этих функций разработаны автоматизированные диалоговые процедуры, интерфейс которых постоянно обновляется с учётом специфики запросов пользователей [14].

Рассмотренную модель организации сложных экспертиз, основанную на информационной теории А.А. Денисова, можно применять и для оценки и выбора инноваций первого вида, т.е. инноваций, связанных с использованием территории района, с строительством новых объектов и памятников культуры и т.п. Тогда структура целей формируется не на основе нормативных документов, регламентирующих деятельность отдела информатизации по развитию системы информационного обеспечения, а на основе целей развития района с учётом требований города / страны и потребностей жителей района. Задачи выбора инноваций такого рода в настоящее время решаются на основе организации соответствующих комиссий, организации обсуждений, нередко с длительными дискуссиями. Для организации таких процессов принятия решений предлагаемые информационные оценки влияния на достижение

целей и вероятности реализации (наличие средств и исполнителей) начали учитываться лишь как содержательные рекомендации. Перспективными являются исследования потребностей в информационном обеспечении и разработка моделей и сервисов для таких процессов принятия решений по выбору инноваций.

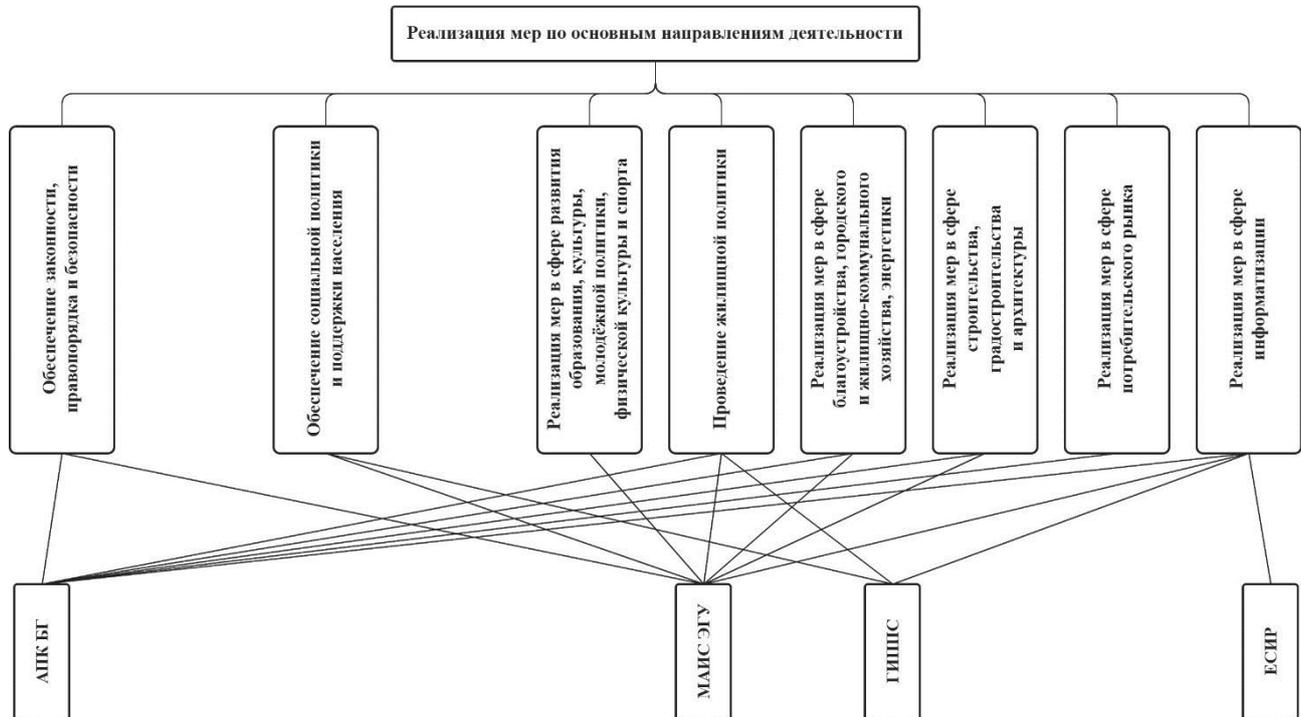


Рисунок 3 – Фрагмент модели, представленной на рисунке 1

3 Управление пространством нововведений

При внедрении в любую систему новых элементов необходимо контролировать сохранение устойчивости системы. При анализе устойчивости территориального пространства после включения нововведений можно контролировать состояние пространства, оценивая степень целостности системы [23]. Предлагается следующая модель пространства состояний с учётом взаимного влияния компонентов системы:

$$H_i = f(H_{ii}, H_{ij}), \quad (4)$$

где H_i – значимость i -й части системы (части территории в регионе / городе; члены команды, выполняющие отдельные работы, необходимые для задания; инновационные технологии и сервисы и т.п.); H_{ii} , – собственная значимость i -й части системы при отсутствии влияния других частей; H_{ij} – изменение потенциала i -й части системы при учёте влияния j -й части.

Модель оценки ситуаций с учётом взаимного влияния нововведений имеет вид:

$$\begin{aligned} H_1 &= f(H_{11}, H_{12}, H_{13}) \\ H_2 &= f(H_{21}, H_{22}, H_{23}) \\ H_3 &= f(H_{31}, H_{32}, H_{33}) \\ &\dots \end{aligned} \quad (5)$$

где $H_1, H_2, \dots, H_i, \dots$ – значимость 1-го, 2-го и т.д. нововведения; $H_{11}, H_{22}, \dots, H_{ii}, \dots$ – собственная значимость i -го нововведения при отсутствии других нововведений, влияющих на

его ценность; $H_{12}, H_{13}, H_{21}, \dots, H_{ij}, \dots$ – изменение ценности i -го нововведения при наличии взаимосвязи с j -м.

Модель может быть представлена с использованием вероятностных (2) и детерминированных оценок H , что зависит от конкретной ситуации (см. информационные оценки в [21]). Предлагается с использованием формализованного представления законов диалектической логики [21] представить (5) в виде детерминированных информационных оценок:

$$\begin{aligned} H_1 &= J_1/n_{11} + J_2/n_{12} + \dots + \tau_{11} dJ_1/dt + \tau_{12} dJ_2/dt + L_{11} d^2J_1/dt^2 + L_{12} d^2J_2/dt^2 + \dots \\ H_2 &= J_1/n_{21} + J_2/n_{22} + \dots + \tau_{21} dJ_1/dt + \tau_{22} dJ_2/dt + L_{21} d^2J_1/dt^2 + L_{22} d^2J_2/dt^2 + \dots \\ &\dots \\ H_i &= J_i/n_{ii} + J_j/n_{ij} + \dots + \tau_{ii} dJ_i/dt + \tau_{ij} dJ_j/dt + L_{ii} d^2J_i/dt^2 + L_{ij} d^2J_j/dt^2 + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

где J_i – информация об i -м параметре пространства, $i = 1, \dots, n$, J может измеряться детерминированно как $J_i = A_i / \Delta A_i$, A_i – оценка параметра, ΔA – единица измерения; d обозначает отрицание «не» (в соответствии с нотацией, принятой в теории А.А. Денисова); n_{ii} – объём влияния i -го параметра в пространстве; n_{ij} – изменение объёма при взаимном влиянии i -го и j -го параметров; τ_{ii} – собственное информационное сопротивление параметра изменениям, τ_{ij} – изменение информационных сопротивлений при взаимодействии i -го и j -го параметров; L_{ii} – собственная ригидность, инерционность i -го параметра; L_{ij} – взаимные ригидности параметров; dJ/dt и d^2J/dt^2 – скорость и ускорение изменения параметра; t – время.

Критерий оценки устойчивости системы можно представить в виде матрицы, учитывающей взаимовлияние компонентов и параметров модели:

$$\Delta_i = \| H_{ii}, H_{ij} \| \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, \quad (7)$$

где H_{ii} – значимость элементов системы; H_{ij} значимость взаимосвязей между элементами.

Если H_{ij} возрастают, то система стремится к большей целостности, а, следовательно, устойчивости. При уменьшении H_{ij} наблюдается тенденция к распаду системы. Возможна ситуация выделения из системы частей, между которыми устанавливаются сильные взаимосвязи.

Модель (6) позволяет учесть τ и L – скорость и ускорение изменения параметра. Определение n , τ , L осуществляется на основе тестов и экспериментов. Возможно измерение подобных параметров в некоторых ситуациях с помощью статистических моделей.

Заключение

На основе анализа систем информационного обеспечения административного управления и особенностей административного управления на уровне района показано, что создание единой информационной системы административного органа территориального управления невозможно, а необходимо использование общих для города информационных баз и сервисов локального доступа к содержащейся в них информации, для чего в работе предложено адаптировать применительно к административному управлению концепцию сервис-ориентированной архитектуры в виде приложений, ориентированных на потребителя (*CORBA, DCOM*) [24–26 и др.].

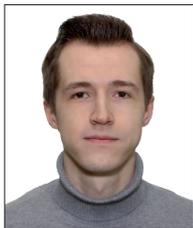
Разработаны модели оценки нововведений для системы информационного обеспечения административного органа территориального управления. Модели основаны на применении системно-целевого подхода, на структуризации и анализе целей и задач системы территориального управления и её связи с подразделениями. Предложены модели организации экспертиз, базирующиеся на оценке влияния инновационных технологий и программных продуктов на реализацию целей и задач развития информационного обеспечения, решаемых административным органом управления, с учётом взаимного влияния нововведений и существующих

щего информационного обеспечения. Новизной моделей является сочетание информационных оценок [21], адаптированных к рассматриваемой задаче, и метода решающих матриц [22], что позволяет учесть значимость нововведений для развития информационного обеспечения.

Список источников

- [1] Общеотраслевые руководящие методические материалы по созданию автоматизированных систем управления предприятиями и производственными объединениями (АСУП). М.: Статистика, 1977. 284 с.
- [2] Справочник разработчика АСУ / А.А. Модин, Е.Г. Яковенко, Е.П. Погребной; под ред. Н.П. Федоренко и В.В. Карибского. 2-е изд. М.: Экономика, 1978. 583 с.
- [3] Справочник проектировщика систем автоматизации управления производством / Под ред. Г.Л. Смилянского. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
- [4] Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник / Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. Изд. 3-е. М.: Финансы и статистика, 2021. 847 с.
- [5] **Жиμεριν Д.Г., Мясников В.А.** Автоматизированные и автоматические системы управления. М.: Энергия, 1979. 592 с.
- [6] Основы системного подхода и их применение при разработке территориальных АСУ / Под ред. Ф.И. Перегудова. Томск: ТГУ, 1976. С.13-14.
- [7] **Лапыгин Д.Ю.** Разработка стратегии развития региона: система инструментов. Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2016. 217 с.
- [8] **Волкова В.Н.** Теория информационных процессов и систем. Изд. 2-е. М.: Юрайт, 2018. 432 с.
- [9] **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 270 с.
- [10] **Волкова В.Н.** Развитие определения системы // Матер. Международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении»: сб. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. С.12-14.
- [11] **Эшби У.Р.** Введение в кибернетику. М.: Ин. лит., 1959. 432 с.
- [12] **Акофф Р.** Менеджмент в XXI веке (Преобразование корпорации) / Пер. с англ. Ф.П. Тарасенко. Томск: Изд-во Томского университета, 2006. 418 с.
- [13] **Волкова В.Н., Логинова А.В., Яковлева Е.А.** Модели управления инновационной деятельностью предприятия и организаций. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 256 с.
- [14] Моделирование систем и процессов: практикум / Под ред. В.Н. Волковой. М.: Юрайт, 2016. 295 с.
- [15] **Лопухин М.М.** ПАТТЕРН – метод планирования и прогнозирования научных работ. М.: Сов. радио, 1971. 160 с.
- [16] **Саати Т., Кернс К.** Аналитическое планирование: организация систем / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
- [17] **Поспелов Г.С. и др.** Проблема программно-целевого планирования и управления / Г.С. Поспелов, В.Л. Вен, В.М. Солодов, В.В. Шафранский, А.И. Эрлих. М.: Наука, 1980. 440 с.
- [18] **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
- [19] **Кастри Дж.** Большие системы: связность, сложность и катастрофы. М.: Мир, 1982. 216 с.
- [20] **Денисов А.А.** Информационное поле. СПб.: Издательство «Омега», 1998. 64 с.
- [21] **Денисов А.А.** Современные проблемы системного анализа. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 304 с.
- [22] **Болотова Л.С.** Ситуационная модель управления как основа объективизации знаний в системах когнитивного моделирования // Тр. VII Междунар. научно-практич. мультikonф. «Управление большими системами: Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций». М.: ИПУ РАН, 2007. С.24-28.
- [23] Development of the Theory of Sustainability Based on the Concept of an Open System / Violetta N. Volkova, Aleksandra V. Loginova, Alla E. Leonova, Yuri Yu. Chernyy // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019.
- [24] **Alonso G., Casati F., Kuno H., Machiraju V.** Web Services: Concepts, Architectures and Application. Springer, 2004. 354 p. DOI:10.1007/978-3-662-10876-5.
- [25] **Channabasavaiah K., Kerrie H.** Migrating to a service-oriented architecture. IBM Corporation, April 2004. 22 p.
- [26] **Curbera F., et al.,** Unraveling the Web Services Web: An Introduction to SOAP, WSDL, and UDDI // IEEE Internet Computing. March-April 2002. P.86-93. DOI: 10.1109/4236.991449.

Сведения об авторах



Максимов Михаил Сергеевич, 1997 г. рождения. Окончил Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) в 2021 году. Аспирант Высшей школы компьютерных технологий и информационных систем СПбПУ. В списке научных трудов пять работ в области системного анализа. ORCID: 0009-0005-5628-8407. mishkainjjet@gmail.com. ✉.

Волкова Виолетта Николаевна, 1936 г. рождения. Окончила Таганрогский радиотехнический институт в 1959 г. и аспирантуру МЭИ в 1970 г, к.т.н. (1973), д.э.н. (1993). Профессор Высшей школы компьютерных технологий и информационных систем СПбПУ. Заслуженный работник высшей школы РФ. Член Международной академии наук высшей школы. В списке научных трудов более 350 работ (в т.ч. 8 учебников и 12 монографий) в области теории систем и системного анализа. ORCID: 0000-0001-9658-5135; Author ID (РИНЦ): 73469; Author ID (Scopus): 57191609371; Researcher ID (WoS): Q-4085-2016. violetta_volkova@list.ru.



Поступила в редакцию 14.03.2025, после рецензирования 5.06.2025. Принята к публикации 11.06.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-363-375

Development of the information support system for a territorial administration body

© 2025, M.S. Maksimov^{1,2} ✉, V.N. Volkova¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

² Administration of Kalininsky District of St. Petersburg, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article examines the development of the information support system of the territorial administrative body. To date, there is a notable lack of published research focused on the specific features of information support for administrative bodies, especially for the level of city districts. The concepts of a multi-level information and control complex and a service-oriented architecture have been adapted to the context of information support for administrative management in a city district. To substantiate the selection of innovative technologies and services in the development of such systems, the article proposes methods and models grounded in a system-targeted approach. The goals and objectives of territorial administration have been systematically structured and analyzed. The article presents models for organizing expert evaluations based on assessing the impact of innovative technologies and software products on the achievement of administrative goals and objectives, while also considering their interaction with the existing information infrastructure. The proposed methods and models enable the evaluation of the relevance and effectiveness of innovative technologies in supporting the key functions of the information and control complex for administrative management at the city district level.

Keywords: innovative technologies, information and control complex, information assessments, methods for organizing expert evaluation, system-targeted approach, territorial administration.

For citation: Maksimov MS, Volkova VN. Development of the information support system for a territorial administration body [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 363-375. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-363-375.

Authors' contribution: Maksimov M.S. – developed models and procedures for assessing innovative technologies and services, Volkova V.N. – proposed adapting new concepts to the information support system of the territorial administrative body.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 - Graphical representation of the relationship model between information bases, for access to which innovations and services are developed, and goals, tasks
- Figure 2 - Method implementation algorithm
- Figure 3 - Fragment of the model shown in Figure 1
- Table 1 - Model of a multi-level information and control complex
- Table 2 - Information bases for access to which innovations and services are being developed

References

- [1] General industry guidelines and methodological materials for the creation of automated control systems for enterprises and production associations (ACS) [In Russian]. Moscow: Statistics; 1977. 284 p.
- [2] **Modin AA, Yakovenko EG, Pogrebnoy EP**; edited by NP Fedorenko and VV Caribbean. ACS Developer's Handbook. 2nd ed. [In Russian]. Moscow: Economics; 1978. 583 p.
- [3] **Smilyansky GL** (Ed. By). Handbook for the designer of automation systems for production control [In Russian]. Moscow: Mashinostroenie; 1971. 424 p.
- [4] **Volkova VN, Emelyanov AA** (Ed. by). Systems theory and systems analysis in organization management: Handbook. 3rd ed. [In Russian]. Moscow: Finance and Statistics; 2021. 847 p.
- [5] **Zhimerin DG, Myasnikov VA**. Automated and automatic control systems [In Russian]. Moscow: Energy; 1979, 592 p.
- [6] **Peregudov FI** (Ed. by). Fundamentals of a systems approach and their application in the development of territorial automated control systems [In Russian]. Tomsk: TSU; 1976: 13-14.
- [7] **Lapygin DYu**. Development of a regional development strategy: a system of tools [In Russian]. Moscow: NITS INFRA-M; 2016. 217 p.
- [8] **Volkova VN**. Theory of information processes and systems. 2nd ed. [In Russian]. Moscow: Yurayt; 2018. 432 p.
- [9] **Mesarovich M., Mako D., Takahara I**. Theory of hierarchical multi-level systems [In Russian]. Moscow: Mir; 1973. 270 p.
- [10] **Volkova VN**. Development of the definition of a system // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Systems Analysis in Design and Management": collection [In Russian]. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Polytechnical University; 2001: 12-14.
- [11] **Ashby WR**. Introduction to Cybernetics [In Russian]. Moscow: In. lit.; 1959. 432 p.
- [12] **Ackoff R**. Management in the 21st Century (Transformation of the Corporation) / Translated from English by F.P. Tarasenko. [In Russian]. Tomsk: Tomsk University Press; 2006. 418 p.
- [13] **Volkova VN, Loginova AV, Yakovleva VA**. Models for managing innovative activities of enterprises and organizations [In Russian]. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University; 2014. 256 p.
- [14] **Volkova VN** (Ed. By) .Modeling of systems and processes: practical training [In Russian]. Moscow: Yurayt; 2016. 295 p.
- [15] **Lopukhin MM**. PATTERN – a method of planning and forecasting scientific work [In Russian]. Moscow: Sov. radio; 1971. 160 p.
- [16] **Saati T, Kearns K**. / Ed. IA Ushakov. Analytical planning: organization of systems [In Russian]. Moscow: Radio and Communications; 1991. 224 p.
- [17] **Pospelov GS, Ven VL, Solodov VM, Shafransky VV, Erlich AI**. et al. The problem of program-target planning and management [In Russian]. Moscow: Nauka; 1980. 440 p.
- [18] **Moiseev NN**. Mathematical problems of systems analysis [In Russian]. Moscow: Nauka; 1981. 488 p.
- [19] **Casti J**. Large Systems: Connectedness, Complexity, and Disasters. [In Russian]. Moscow: Mir; 1982. 216 p.
- [20] **Denisov AA**. Information field. [In Russian]. St. Petersburg: Omega Publishing House; 1998. 64 p.
- [21] **Denisov AA**. Modern problems of systems analysis: textbook. 3rd ed. [In Russian]. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University; 2008. 304 p.
- [22] **Bolotova LS**. Situational management model as a basis for objectification of knowledge in cognitive modeling systems [In Russian]. Proceedings of the VII International scientific and practical multi-conference "Management of large systems: Cognitive analysis and management of situations development" Moscow: IPU RAS 2007: 24-28.
- [23] Development of the Theory of Sustainability Based on the Concept of an Open System / Violetta N. Volkova, Aleksandra V. Loginova, Alla E. Leonova, Yuri Yu. Chernyy // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019.
- [24] **Alonso G, Casati F, Kuno H, Machiraju V**. Web Services: Concepts, Architectures and Application. Springer, 2004. 354 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10876-5.
- [25] **Channabasavaiah K, Kerrie H**. Migrating to a service-oriented architecture. IBM Corporation, April 2004. 22 p.

- [26] *Curbera F*, et al., Unraveling the Web Services Web: An Introduction to SOAP, WSDL, and UDDI // IEEE Internet Computing. March-April 2002. P.86-93. DOI: 10.1109/4236.991449.
-

About the authors

Mikhail Sergeevich Maksimov (b. 1997) graduated from the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University) in 2021. He is a postgraduate student of the Higher School of Computer Technologies and Information Systems, SPbPU. His list of scientific works includes 5 works in the field of systems analysis. ORCID: 0009-0005-5628-8407. mishkainjem@gmail.com. ✉.

Violetta Nikolaevna Volkova (b. 1936) graduated from Taganrog Radio Engineering Institute in 1959 and completed postgraduate studies at MPEI in 1970, PhD (1973), D. Sc. Eco. (1993). She is a professor of the Higher School of Computer Technologies and Information Systems of the Institute of Computer Science and Cybersecurity of SPbPU. Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation. Member of the International Academy of Sciences of Higher Education. Her list of scientific works includes more than 350 works in the field of systems theory and systems analysis including 8 textbooks and 12 monographs. ORCID: 0000-0001-9658-5135; Author ID (RSCI): 73469; Author ID (Scopus): 57191609371; Researcher ID (WoS): Q-4085-2016. violetta_volkova@list.ru.

Received March 14, 2025. Revised June 5, 2025. Accepted June 11, 2025.



Цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения

© 2025, Е.К. Терешко ✉, М.Р. Малашенко, Е.П. Середин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Статья посвящена исследованию влияния цифровой трансформации на процессы промышленных объектов нефтегазовой отрасли с целью их совершенствования. Объектом исследования являются субъекты экономической деятельности нефтегазового месторождения, а предметом - внедрение современных цифровых технологий (Интернет вещей, информационное моделирование строительства, аддитивные технологии, роботизация, искусственный интеллект и др.) на протяжении жизненного цикла промышленных объектов. Показано применение цифровых инструментов на разных стадиях жизненного цикла – от концептуального проектирования до введения в эксплуатацию объектов и их демонтажа. Рассмотрены стадии жизненного цикла объектов обустройства месторождений «Проектирование» - «Освоение месторождения» - «Демонтаж», проведена декомпозиция стадий «Проектирование» и «Освоение месторождения». Сформирована матрица принадлежности цифровых технологий стадиям жизненного цикла объекта обустройства нефтегазового месторождения, что позволило построить онтологию обустройства такого объекта. Предложены рекомендации по развитию цифровой трансформации субъектов экономической деятельности при разработке нефтегазового месторождения в форме стратегической карты.

Ключевые слова: цифровая трансформация, нефтегазовое месторождение, жизненный цикл, цифровые технологии, система показателей, стратегическая карта, онтология.

Цитирование: Терешко Е.К., Малашенко М.Р., Середин Е.П. Цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3(57). С.376-389. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-376-389.

Вклад авторов: Терешко Е.К. – постановка задачи исследования, концепция, методология; Малашенко М.Р. – сбор и систематизация данных; Середин Е.П. – визуализация данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Цифровая трансформация (ЦТ) представляет собой процесс интеграции цифровых технологий во все сферы деятельности организаций, который изменяет способ их функционирования и взаимодействия. Известны различные определения термина ЦТ, включающие внедрение современных информационных технологий в производственные процессы и комплексное преобразование существующих бизнес-процессов и моделей управления [1-3]. В [4] отмечается, что нет единого определения ЦТ, утверждённого в нормативной документации, государственных программах и научных исследованиях.

В работе рассматривается влияние ЦТ на процессы промышленных объектов нефтегазовой отрасли на ключевых стадиях жизненного цикла (ЖЦ) объектов обустройства нефтегазовых месторождений (НГМ). Объектами обустройства месторождения являются площадочные объекты, которые обеспечивают технологический процесс добычи углеводородов, выполняя определённую функцию (добычу, подготовку к транспортировке и т.п.). Обустройство месторождения включает в себя последовательные этапы проектирования и строительство объектов обустройства. ЖЦ этих объектов начинается с проектирования и заканчивает-

ся демонтажом. Таким образом, *объектом* исследования являются субъекты экономической деятельности НГМ, а *предметом* - ЦТ промышленных объектов.

1 Обзор литературы

В контексте ЦТ термин «Цифровизация» является смежным. Цифровизация даёт возможность снизить затраты на выполнение работ, ускорить их и повысить эффективность управления [5]. Благодаря этому процессу происходит «цифровое обновление» существующих процессов, которое позволяет сделать их более прозрачными и удобными для анализа и управления, что можно считать началом ЦТ [6]. ЦТ направлена на изменение структуры организационных процессов, изменение бизнес-моделей и процессов [7]. Во многом способствует цифровизации рост вычислительных мощностей, увеличение объёмов данных, развитие Интернета вещей и искусственного интеллекта (ИИ) [8].

Процесс ЦТ проявляется в промышленном проектировании [9]. Одним из основных инструментов цифрового проектирования является технология информационного моделирования зданий (*Building Information Model, BIM*) [10]. *BIM* даёт возможность проводить эксперименты, моделировать сценарии эксплуатации и выявлять узкие места на ранней стадии проектирования [11].

Современные системы автоматизированного проектирования интегрируются с *BIM*-платформами и создают единое информационное пространство, доступное для всех участников проекта [12]. Развитие инструментов создания цифровых двойников (ЦД) позволяет создавать виртуальное представление объекта производства и в режиме реального времени отслеживать показатели, характеризующие его работу [13, 14]. Применение систем мониторинга и анализа больших данных приводит к повышению производительности и к улучшению качества конечного продукта [15].

Применение разнообразных технологических решений позволяет упростить процесс добычи углеводородов с использованием систем мониторинга, аналитических платформ и беспилотных летательных аппаратов для наблюдения за удалёнными объектами [16, 17]. Внедрение подобных технологий способствует переходу к так называемым «умным месторождениям», где ключевую роль играет оперативное управление и предиктивная аналитика [18]. *BIM*-системы и специализированные программные средства для моделирования месторождений применяются при ЦТ нефтегазовой отрасли [19, 20].

Проведение ЦТ в промышленном строительстве сопровождается трудностями при интеграции новых систем с существующей инфраструктурой предприятия [21, 22]. Увеличение объёма данных приводит к увеличению риска их утечки и прочих информационных угроз. Без надёжной системы кибербезопасности ЦТ может привести к увеличению затрат и длительности реализации проекта [23, 24].

Внедрение новых цифровых инструментов на разных стадиях промышленного строительства позволит сократить сроки строительства и создать модели управления, гибкие по отношению к меняющемуся рынку [25, 26].

2 Методы исследования

Обзор литературы по ключевым словам: «ЦТ», «цифровизация», «строительная отрасль», «промышленные объекты», «цифровые технологии в строительстве», «НГМ», «*BIM*-технологии», «онтологический подход», «стратегическая карта», «*IDEF0*» позволил выявить основные аспекты цифровизации в проектировании нефтегазовых объектов. Практические аспекты применения цифровых решений и оценка их влияния на эффективность проектиро-

вания выявлены на примерах конкретных проектов в этой сфере. Влияние ЦТ на проектирование объектов НГМ может быть представлено в виде следующих этапов.

Этап 1. Выявление ключевых стадий ЖЦ объектов обустройства месторождений. При построении схемы со стадиями ЖЦ в исследовании использована нотация *IDEF0* [27].

Этап 2. Сопоставление стадий ЖЦ объектов обустройства месторождений с цифровыми технологиями: *VIM*; аддитивные технологии; роботизация; технологии виртуальной реальности; умные датчики; блокчейн; ИИ; и др. На данном этапе сформирована матрица применения цифровых технологий на стадиях ЖЦ объектов обустройства НГМ.

Этап 3. Построение фрагмента онтологической схемы рассматриваемой предметной области (ПрО). Создание онтологической схемы включает следующие подэтапы [28, 29].

3.1. Определение ПрО, основных целей и контекстов создания онтологии.

3.2. Сбор данных для построения онтологии, анализ и группировка данных для выделения основных понятий, классов объектов, экземпляров, входящих в объекты, их свойств, отношений между ними.

3.3. Построение онтологической схемы ПрО «Обустройство объектов НГМ» с визуализацией классов, экземпляров и отношений.

Этап 4. Разработка рекомендаций по стратегическому развитию посредством формирования стратегической карты в рамках сбалансированной системы показателей [30], адаптированной под региональные условия – комплекс региональных индикаторов [31, 32]. Построение стратегической карты включает следующие подэтапы.

4.1. Определение миссии, видения и стратегической цели [33].

4.2. Определение ключевых компонент стратегической карты.

4.3. Предложение целевых ориентиров в контексте каждой компоненты.

3 Стадии жизненного цикла объектов обустройства месторождений

На первом этапе рассмотрены ключевые стадии ЖЦ объектов обустройства месторождений («Проектирование» - «Освоение месторождения» - «Демонтаж¹») и их взаимосвязь с цифровыми технологиями (рисунок 1).

Блоком А0 в нотации *IDEF0* представлено обустройство нефтегазового месторождения, которое декомпозируется на стадии: проектирование (А1); освоение месторождения (А2); демонтаж (А3). Согласно ГОСТ

Р 59265-2020², который устанавливает требования к видам, составу, структуре, содержанию и порядку оформления технологических проектов разработки морских месторождений, под ЖЦ месторождения понимается его разработка и эксплуатация от момента открытия до ликвидации (консервации) объектов обустройства месторождения. Такое определение позволяет



Рисунок 1 – Схема декомпозиции стадий ЖЦ объектов обустройства месторождений уровня А0

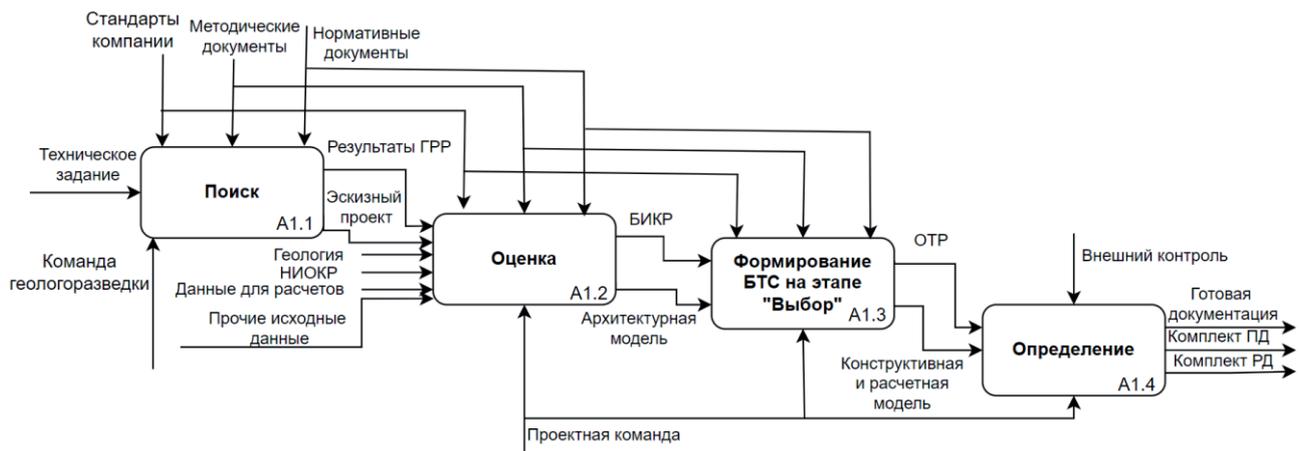
¹ Процесс демонтажа мало формализуем, в нём можно выделить стадии: определение пригодности оборудования; разработка проекта демонтажа, включающего технические, экологические и экономические требования; непосредственное проведение демонтажа; утилизация или повторное использование и др. В данной работе применение ЦТ к стадиям декомпозиции демонтажа подробно не рассматривалось.

² ГОСТ Р 59265-2020. Проектная (технологическая) документация для освоения морских нефтяных, газовых, газоконденсатных, нефтегазоконденсатных месторождений. Основные требования. Дата введения 2021-09-01. М.: Стандартинформ. 2021. – 57 с.

на верхнем уровне разделить ЖЦ объектов обустройства месторождения на три стадии, представленные на рисунке 1.

Стадия «Проектирование» (А1) – основа для всех последующих действий, где определяются не только технические параметры, но и экологические, экономические и социальные аспекты³, включает стадии: «Поиск» (А1.1), «Оценка» (А1.2), «Выбор» (А1.3) и «Определение» (А1.4) (см. рисунок 2). На стадии «Поиск» (А1.1) осуществляется выбор варианта технологии и компоновки оборудования, оптимальной для реализации проекта по техническим, экономическим и временным критериям. Такая декомпозиция основана на методологии, применяемой в крупной нефтегазовой компании^{4,5}. Здесь эскизный проект не включает экономическую оценку проекта, тогда как концептуальный проект, основываясь на эскизном проекте и уточняя его, содержит расчёты экономической обоснованности проекта.

На стадиях «Оценка» (А1.2) и «Выбор» (А1.3) вырабатывается основная концепция реализации проекта, учитывающая номенклатуру оборудования (с примерными техническими характеристиками, основанными на мощности НГМ), компоновку оборудования, а также оценку экономической целесообразности реализации проекта. В дальнейшем принятая концепция практически не претерпевает изменений. На данных стадиях происходит снижение уровня неопределённостей и управления рисками, что получило название концептуального проекта. Концептуальная проработка должна быть произведена до уровня крупных технологических блоков.



БИКР - базовая интегрированная концепция разработки; БТС - блочно-технологические схемы; ГРП - геолого-разведочные работы; ОТР - основные технические решения; ПД - проектная документация; РД - рабочая документация; НИОКР - научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

Рисунок 2 – Схема декомпозиции уровня А1 «Проектирование»

На стадии «Выбор» (А1.3) происходит снятие неопределённостей за счёт разработки различных вариантов технико-экономической концепции проекта и выбора оптимального среди них. Затем происходит повышение детализации технических решений и точности оценки затрат варианта, передаваемого в проектирование. Продуктом становится уточнённая интегрированная концепция разработки (ИКР), синхронизированная с основными техническими ре-

³ Технические аспекты разработки месторождений, требования к охране окружающей среды, социальной инфраструктуре и необходимость экономических расчётов на той или иной стадии проектирования подробно рассмотрены в ГОСТах: ГОСТ Р 59071-2020. Охрана окружающей среды. Недр. Термины и определения; ГОСТ Р 58367-2019. Обустройство месторождений нефти на суше. Технологическое проектирование; СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства; ГОСТ Р 53554-2009. Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородного сырья. Термины и определения.

⁴ Проектное управление / Газпром нефть - Развитие. <https://dvp.gazprom-neft.ru/competension/pm/>.

⁵ Данилушкина А.В. Вехи и выходы: управление крупными проектами в «Газпром нефти» [Электронный ресурс] // Управление производством..5 июля 2013. https://up-pro.ru/library/project-management/project_management/gazpromneft/.

шениями (ОТР), которые начинают разрабатываться Проектным институтом на стадии «Выбор» (A1.3). Далее следует стадия «Определение» (A1.4), целью которой является формирование проектной и рабочей документации.

Декомпозиция стадии «Освоения месторождения» (A2) показана на рисунке 3 и состоит из следующих процессов: «Процесс обустройства» (A2.1), «Эксплуатация» (A2.2) и «Реконструкция» (A2.3). Основной целью стадии «Процесс обустройства» (A2.1) является создание комплекса сооружений строительной организацией для добычи, транспортировки, подготовки и переработки углеводородного сырья.

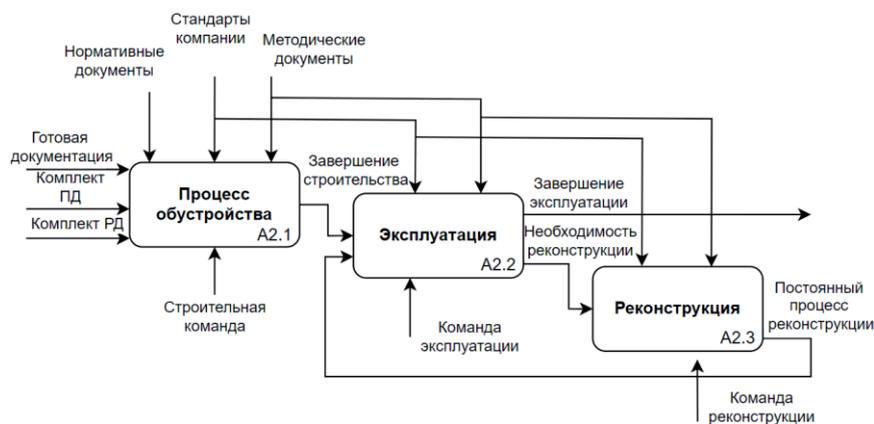


Рисунок 3 – Схема декомпозиции «Освоение месторождения» (A2)

После завершения строительства осуществляется стадия «Эксплуатация» (A2.2), что включает непосредственную добычу углеводородного сырья, и «Реконструкция» (A2.3). Отслеживать состояние оборудования можно с помощью цифровых технологий. Данные, поступающие от умных датчиков, анализируются моделями ИИ и предупреждают о возможных скорых поломках в оборудовании.

На стадии «Демонтаж» (A3) использование BIM-моделей и технологий ИИ поможет спрогнозировать и минимизировать риски при разборе и утилизации конструкций.

Путём сопоставления стадий ЖЦ с рассмотренными цифровыми технологиями сформирована матрица принадлежности цифровых технологий стадиям ЖЦ объекта обустройства НГМ (см. рисунок 4).

	BIM	GIS	Аддитивные технологии	Роботизация	Умные датчики	VR, AR технологии	Блокчейн	ИИ
1. Проектирование								
1.1. Поиск	+	+	-	-	-	-	+	+
1.2. Оценка	+	-	-	-	-	-	+	+
1.3. Формирование БТС на этапе "Выбор"	+	-	-	-	-	-	+	+
1.4. Определение	+	-	-	-	-	-	+	+
2. Освоение месторождения								
2.1. Обустройство	+	+	+	+	+	+	-	+
2.2. Эксплуатация	+	+	-	+	+	+	-	+
2.3. Реконструкция	+	+	-	+	+	+	+	+
3. Демонтаж								
	+	+	-	+	-	+	-	+

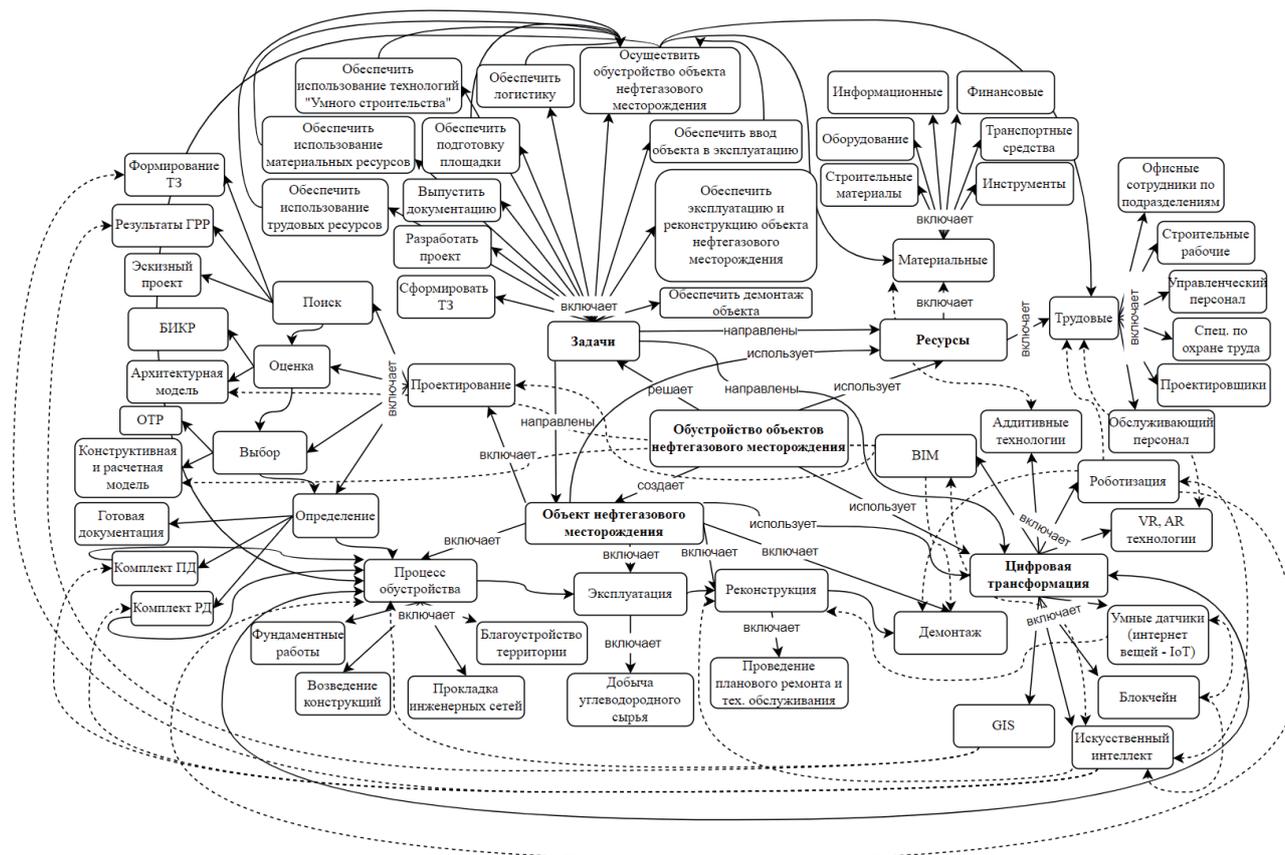
BIM - Building Information Model; GIS - геоинформационная система; VR технологии - технологии виртуальной реальности; AR технологии - технологии дополненной реальности; БТС - блочно-технологические схемы; ИИ – искусственный интеллект

Рисунок 4 – Матрица принадлежности цифровых технологий стадиям жизненного цикла объекта обустройства нефтегазового месторождения

4 Онтология обустройства объекта нефтегазового месторождения

Онтология представляет собой формализованный набор понятий и взаимосвязей в рассматриваемой ПрО, что способствует лучшему пониманию и анализу процессов, связанных с добычей и переработкой углеводородов. Онтология отражает ключевые элементы и взаимосвязи, которые влияют на обустройство объекта НГМ. Создание онтологической схемы позволяет систематизировать существующие знания, а анализ основных классов (задачи, ресурсы, объект НГМ, технологии ЦТ), помогает сформировать целостное представление о процессе обустройства НГМ и улучшить принятие решений на всех уровнях управления.

Обустройство объекта НГМ в виде фрагмента онтологии представлено на рисунке 5.



ТЗ - техническое задание; ГРП - геологоразведочные работы; БИКР - базовая интегрированная концепция разработки; ОТР - основные технические решения; ПД - проектная документация; РД - рабочая документация; BIM - Building Information Model; GIS - геоинформационная система; VR технологии - технологии виртуальной реальности; AR технологии - технологии дополненной реальности

Рисунок 5 – Фрагмент онтологии обустройства объекта нефтегазового месторождения

Данная онтология отражает ключевые отношения между процессом обустройства НГМ, задачами, которые для этого необходимо выполнить, требующимися ресурсами и цифровыми технологиями. В онтологии выделены ключевые процессы: проектирование, процесс обустройства, эксплуатация, реконструкция и демонтаж. Фрагмент онтологии отражает:

- Отношения, описывающие базовые связи между классами и экземплярами онтологии (обозначены сплошными стрелками).
- Отношения, описывающие связи между задачей «Осуществить обустройство объекта нефтегазового месторождения» и трудовыми/материальными ресурсами, а также процессом обустройства НГМ. В то же время сам процесс обустройства НГМ включает комплекты ПД/РД и имеет двустороннее отношение с классом объекта «Цифровая трансформация».

- Отношения, описывающие зависимость между классами (стадиями ЖЦ) объекта обустройства НГМ: «Поиск», «Оценка», «Выбор», «Определение», «Процесс обустройства», «Эксплуатация», «Реконструкция», «Демонтаж».
- Отношения, описывающие зависимость между экземплярами (задачами) такими как «Обеспечить использование трудовых ресурсов»/ «Обеспечить использование материальных ресурсов»/ «Обеспечить использование технологий «Умного строительства»/ «Обеспечить подготовку площадки»/ «Обеспечить логистику» и «Осуществить обустройство объекта нефтегазового месторождения».
- Второстепенное отношение, описывающее зависимость между экземплярами (задачами) – между «Обеспечить ввод объекта в эксплуатацию» и «Осуществить обустройство объекта нефтегазового месторождения».
- Отношения, описывающие влияние ЦТ между экземплярами онтологии (обозначены штрихпунктирными стрелками).

Построенную онтологию можно использовать при разработке программного обеспечения для автоматизации процесса проектирования НГМ.

5 Рекомендации по стратегическому развитию цифровой трансформации

Формирование стратегии ЦТ является необходимым шагом для повышения эффективности, устойчивости и конкурентоспособности в условиях быстро меняющегося рынка. На федеральном уровне это подкрепляется национальными проектами «Экономика данных» (2025-2030 гг.)⁶ и «Средства производства и автоматизации» (2025-2027 гг.)⁷. На региональном уровне разработка стратегической инициативы подкрепляется «Стратегиями в области ЦТ отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления», которые разрабатываются для каждого региона в отдельности⁸.

Стратегия ЦТ субъектов экономической деятельности при разработке НГМ должна включать следующие компоненты: 1) анализ текущего состояния; 2) определение миссии, видения, цели и задач; 3) выбор технологий; 4) разработку дорожной карты; 5) обучение и развитие кадров; 6) интеграцию систем; 7) мониторинг и оценку эффективности; 8) управленческие изменения; 9) сотрудничество с партнёрами; 10) устойчивое развитие.

Стратегическая карта ЦТ субъектов экономической деятельности при разработке НГМ служит инструментом для визуализации механизма стратегического развития, соответствующего установленной цели (см. рисунок 6)⁹. На данной карте обозначены целевые ориентиры для каждого из ключевых компонентов. Под «ключевыми компонентами» понимаются составляющие стратегической карты: «Финансы региона», «Общество и рынок», «Промышленность и предпринимательство», «Наука и инновации (в обучении и обществе)». Видно, как нематериальные активы в области «Наука и инновации (в обучении и обществе)» преобразуются в конкретные финансовые результаты, которые могут быть достигнуты при условии выполнения целевых ориентиров, указанных в компоненте «Финансы региона».

Стоит отметить, что стадии ЖЦ объекта обустройства НГМ — «Проектирование», «Освоение месторождения» и «Демонтаж» — тесно связаны со стратегической картой ЦТ субъектов экономической деятельности. Данная взаимосвязь приведена в таблице 1.

⁶ Национальные проекты России. «Экономика данных». <https://xn--80aarpemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/ekonomika-dannykh/>.

⁷ Национальные проекты России. «Средства производства и автоматизации». <https://xn--80aarpemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/sredstva-proizvodstva-i-avtomatizatsii/>.

⁸ Постановление Правительства "Об утверждении Стратегии в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Ямало-Ненецкого автономного округа" от 20 августа 2021 г с изменениями на 17 декабря 2024 г. № 117-ПГ // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

⁹ Стратегическая карта читается снизу-вверх, т.е. с уровня составляющей «Наука и инновации (в обучении и обществе)» до составляющей «Финансы региона». Подразумевается, что индикаторы контроля, которые формируют панель данных на нижнем уровне, оказывают влияние на последующий уровень стратегической карты, тем самым происходит процесс преобразования нематериальных активов в конкретные финансовые результаты.



Рисунок 6 – Стратегическая карта цифровой трансформации субъектов экономической деятельности при разработке нефтегазового месторождения

Таблица 1 – Взаимосвязь стадий ЖЦ объектов обустройства нефтегазового месторождения с составляющими стратегической карты (без детализации специфики предметной области, которая присутствует на более низком уровне декомпозиции стратегической карты)

Стадия ЖЦ / Составляющая стратегической карты	Проектирование	Освоение месторождения	Демонтаж
<i>Финансы региона</i>	Осуществляется оценка финансовых затрат и потенциальной прибыли от разработки месторождения. Цифровые инструменты (например, модели прогнозирования) помогают оптимизировать бюджет и привлечь инвестиции.	Стадия оказывает прямое влияние на финансовые поступления в регион через налоги и отчисления. Цифровизация процессов позволяет повысить эффективность и снизить затраты.	Стадия требует значительных финансовых вложений, которые могут быть оптимизированы с помощью <i>цифровых решений для управления проектами и ресурсами проекта стадии Демонтаж</i> .
<i>Общество и рынок</i>	Происходит анализ социальных аспектов, таких как влияние на местные сообщества. Участие общественности в проектировании через цифровые платформы способствует повышению прозрачности и доверия.	Стадия требует взаимодействия с местным населением, что может быть поддержано цифровыми платформами для обратной связи и информирования о проводимых работах.	Демонтаж объектов должен учитывать экологические аспекты и безопасность населения. Цифровые платформы могут использоваться для информирования общественности о процессе и его последствиях.
<i>Промышленность и предпринимательство</i>	Использование инновационных технологий в проектировании способствует развитию местной промышленности, создавая спрос на услуги и продукты.	Освоение месторождения создаёт рабочие места и стимулирует развитие смежных отраслей. Цифровые решения могут помочь в управлении ресурсами и оптимизации производственных процессов.	Стадия открывает возможности для бизнеса в области утилизации и переработки материалов. Цифровизация процессов демонтажа может повысить их эффективность.
<i>Наука и инновации (в обучении и обществе)</i>	Применение научных исследований для разработки эффективных технологий. Сотрудничество с научными учреждениями может привести к внедрению инновационных решений.	Внедрение цифровых технологий позволяет улучшить эксплуатацию месторождения. Исследования в области экологии и безопасности также становятся важными.	Исследования в области устойчивого демонтажа и реабилитации территорий могут привести к внедрению новых методов работы.

Для стратегической карты ЦТ субъектов экономической деятельности при разработке НГМ (рисунок 6), в рамках целевых ориентиров, определены цели и индикаторы контроля (см. таблицу 2). Индикаторы контроля формировались в соответствии с выборкой показателей релевантных для рассматриваемого объекта и предмета исследования, которые в т.ч. отражают аспекты ЦТ для НГМ с ориентиром на развитие строительного комплекса региона. Для детализации индикаторов контроля в качестве примера выбрана составляющая «Общество и рынок» стратегической карты, как ключевой элемент, определяющий взаимодействие НГМ с внешней средой. В рамках этой составляющей акцентируется внимание на развитии строительного комплекса, инновационных и цифровых аспектах развития, а также на общем развитии населения, что в совокупности оказывает влияние на устойчивое развитие региона.

Таблица 2 – Детализация составляющей «Общество и рынок» стратегической карты цифровой трансформации

Цель	Индикатор контроля	Тип индикатора
<i>Рост уровня развития строительного комплекса региона</i>		
Обеспечение роста уровня развития строительного комплекса региона для НГМ	Доля Валового регионального продукта (ВРП) по виду экономической деятельности «Строительство», % (в текущих основных ценах; в % к итогу)	количественный
	Доля ВРП по виду экономической деятельности «Добыча полезных ископаемых», % (в текущих основных ценах; в % к итогу)	количественный
<i>Рост уровня развития науки и инноваций</i>		
Обеспечение роста уровня развития науки и инноваций	Доля ВРП по виду деятельности - профессиональная, научная и техническая, % (в текущих основных ценах; в % к итогу)	количественный
<i>Рост уровня развития цифровых технологий</i>		
Обеспечение роста уровня развития цифровых технологий	Доля ВРП по виду деятельности в области информации и связи, % (в текущих основных ценах; в % к итогу)	количественный
Повышение уровня цифровой грамотности населения	Уровень цифровой грамотности	качественный
Разработаны цифровые платформы	Количество доступных цифровых платформ, ед.	количественный
<i>Рост уровня жизни населения</i>		
Обеспечение роста жизни населения	Индекс человеческого развития	качественный
	Качество жизни	качественный

Выбранные индикаторы контроля в рамках составляющей «Общество и рынок» стратегической карты ЦТ НГМ подчёркивают важность комплексного подхода к оценке влияния нефтегазовой деятельности на экономическое и социальное развитие региона.

Заключение

ЦТ проектирования НГМ может повысить гибкость, эффективность и устойчивость на всех стадиях ЖЦ объекта. Результаты исследования отражают как стадии ЖЦ объекта обустройства НГМ взаимосвязаны с технологиями ЦТ, а также какое влияние цифровые технологии оказывают на каждую стадию ЖЦ.

ЖЦ обустройства месторождения включает три стадии: «Проектирование», «Освоение месторождения» и «Демонтаж». Созданная матрица показывает применяемые цифровые технологии на каждой стадии ЖЦ. Использование данной матрицы может способствовать целенаправленному и обоснованному выбору технологий.

Построенная онтология отражает ключевые отношения между стадиями обустройства НГМ, задачами и ресурсами, необходимыми для их осуществления, а также цифровыми технологиями, применение которых позволит ускорить реализацию поставленных задач.

Стратегическая карта ЦТ показывает взаимосвязь между цифровыми технологиями и стратегическими целями субъектов экономической деятельности региона, что может способствовать целенаправленному внедрению цифровых технологий и инноваций, позволяя интегрировать их в общую стратегию развития региона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Шеленаева А.Х.** Цифровая трансформация: основные подходы к определению понятия. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования*. 2022. Т.19. №1. С.20-28. DOI: 10.22363/2312-8631-2022-19-1-20-28.
- [2] **Курочкина А.А., Намазов К.А.** Цифровая трансформация как основное направление эволюции бизнеса: обзор литературы. *Прогрессивная экономика*. 2023. №7. С.20-41. DOI: 10.54861/27131211_2023_7_20.
- [3] **Ciancarini P., Giancarlo R., Grimaudo G.** Digital transformation in the public administrations: A guided tour for computer scientists. *IEEE Access*. 2024. Vol.12. P.22841-22865. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3363075.
- [4] **Кокова С.Ф., Дышекова А.А.** Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты. *Журнал прикладных исследований*. 2022. Т.7. №6. С.577-585. DOI: 10.47576/2712-7516_2022_6_7_577.
- [5] **Богачев Ю.С., Бекулова С.Р.** Цифровизация как способ повышения эффективности управления промышленностью России. *Национальная безопасность/nota bene*. 2023. №3. С.79-91. DOI: 10.7256/2454-0668.2023.3.43718.
- [6] **Крохина П.А., Субботина Т.Н.** Влияние цифровизации на эффективность деятельности организаций. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2024. №3-1(109). С.191-195. DOI: 10.24412/2411-0450-2024-3-1-191-195.
- [7] **Шастов А.А.** Влияние цифровой трансформации на бизнес-процессы и модели: перспективы и вызовы. *Инновации и инвестиции*. 2024. №. 2. С.222-225. DOI: 10.24412/2307-180X-10.24412/2307-180X-2-222-225.
- [8] **Скворцова Н.А., Захаров А.В., Булатов И.И.** Цифровая трансформация бизнес-процессов на основе технологий искусственного интеллекта (российский и международный опыт). *Экономика, предпринимательство и право*. 2025. Т.15. №1. С.131-152. DOI: 10.18334/ep.15.1.122526.
- [9] **Рыбкина Г.В., Зайцева И.А., Логинова С.А., Симагин А.В.** Промышленная цифровизация в строительстве: многоаспектный подход и ключевые технологии. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2024. №. 2 (48). С.77-84. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-48-2-77-84.
- [10] **Шутова М.Н., Плахутина А.А., Кужелева В.А.** Применение BIM-технологий при разработке архитектурных, конструктивных и организационно-технологических решений промышленного здания. *Строительство и архитектура*. 2021. №4. С.71-75.
- [11] **Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Бурлаченко А.О., Шаюнусов А.Р.** BIM-технологии в строительстве: функции, развитие и опыт применения. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. №1. С.323-332.
- [12] **Мысовских Д.А., Овчинников И.Г.** Building information modeling в строительстве. Опыт использования. Проблемы внедрения. *Вестник евразийской науки*. 2021. Т.13. №2. С.1-10.
- [13] **Сухомлин В.А., Намиот Д.Е., Гапанович Д.А.** Анализ тенденций развития цифровых двойников нового поколения. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. №. 7. С.119-130.
- [14] **Сосфенов Д.А., Шахова М.С.** Применение технологии цифровых двойников в России: возможности развития и сдерживающие факторы. *Экономика и управление*. 2023. Т. 29. №. 11. С.1325-1332. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-11-1325-1332.
- [15] **Noman A.H.M., Mustaqim S.M., Molla S., Siddique I.M.** Enhancing Operations Quality Improvement through Advanced Data Analytics. *Journal of Computer Science Engineering and Software Testing*. 2024. Vol.10. No.1. P.1-14. DOI: 10.46610/JOCSES.2024.v10i01.001.
- [16] **Carvajal G., Maucec M., Cullick S.** Intelligent digital oil and gas fields: concepts, collaboration, and right-time decisions. Gulf Professional Publishing, 2017. 351 p.
- [17] **Wanasinghe T.R., Gosine R.G., Silva O.S., Mann G.K.I., James L.A., Warriar P.** Unmanned aerial systems for the oil and gas industry: Overview, applications, and challenges. *IEEE access*. 2020. Vol. 8. P.166980-166997. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020593.
- [18] **Temizel C., Canbaz C.H., Palabiyik Y., Putra D., Asena A., Ranjith R., Jongkittinarukorn K.** A comprehensive review of smart/intelligent oilfield technologies and applications in the oil and gas industry. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. SPE, 2019. P.D042S087R001. DOI: 10.2118/195095-MS.
- [19] **Lee C.Y., Chong H.Y., Wang X.** Streamlining digital modeling and building information modelling (BIM) uses for the oil and gas projects. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2018. Vol. 25. No. 2. P.349-396. DOI: 10.1007/s11831-016-9201-4.
- [20] **Bezkorovayniy V., Bayazitov V., Bobov D.** Management of the design and construction of offshore oil and gas facilities with BIM Base. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. Vol. 463. No. 4. P.042056. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042056.
- [21] **Alsofiani M.A.** Digitalization in infrastructure construction projects: A prisma-based review of benefits and obstacles. *arXiv preprint arXiv:2405.16875*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.16875.

- [22] **Olawumi T.O., Chan D.W.M., Wong J.K.W., Chan A.P.C.** Barriers to the integration of BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol.20. P.60-71. DOI: 1016/j.jobe.2018.06.017.
- [23] **Чернов С.Б., Новикова О.С.** Обеспечение безопасности данных в условиях цифровой экономики. *Экономические науки*. 2020. №. 189. С.104-109. DOI: 10.14451/1.189.104.
- [24] **Stewart H.** Digital transformation security challenges. *Journal of Computer Information Systems*. 2023. Vol.63. No.4. P.919-936. DOI: 10.1080/08874417.2022.2115953.
- [25] **Pimenov S.I.** The state and prospects of a multi-level planning system for construction projects in the context of digital transformation. *Construction and Geotechnics*. 2022. Vol.13. No.2. P.55-66. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.05.
- [26] **Flaksman A.S., Kokurin D.I., Khodzhaev D.K., Ekaterinovskaya M.A., Orusova O.V., Vlasov A.V.** Assessment of prospects and directions of digital transformation of oil and gas companies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. Vol.976. No.1. P.012036. DOI: 10.1088/1757-899X/976/1/012036.
- [27] **Dorador J.M., Young R.I.M.** Application of IDEF0, IDEF3 and UML methodologies in the creation of information models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2000. Vol. 13. No. 5. P.430-445. DOI: 10.1080/09511920050117928.
- [28] **Марьясин О.Ю.** Разработка онтологий для цифрового двойника зданий. *Онтология проектирования*. 2019. Т. 9. №. 4 (34). С.480–495. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.
- [29] **Массель Л.В., Воронцова Т.Н.** Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики. *Онтология проектирования*. 2020. Т. 10. №. 3 (37). С.327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [30] **Kaplan R.S., Norton D.P.** Strategy maps: Converting intangible assets into tangible outcomes. – Harvard Business Press, 2004. 293 p.
- [31] **Козлов А.В., Гутман С.С., Зайченко И.М., Рытова Е.В.** Комплекс региональных индикаторов как инструмент формирования стратегии инновационно-промышленного развития районов Крайнего Севера. *π-Economy*. 2016. №. 4 (246). С.252-263. DOI: 10.5862/πE.246.22.
- [32] **Козлов А.В., Терешко Е.К.** Стратегическая карта развития образовательной системы Мурманской области в условиях цифровой трансформации экономики. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2018. №4(18). С.111-122. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.4.2018.60.111-122.
- [33] **Томпсон-мл. А.А., Артур А., Стрикленд III А.Дж.** Стратегический менеджмент: концепции и ситуации для анализа, 12-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. 928 с.

Сведения об авторах



Терешко Екатерина Кирилловна, 1996 г. рождения. Окончила СПбПУ (аспирантура) 2023 г., к.э.н. (2024). Научный сотрудник лаборатории промышленных систем потоковой обработки данных ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. Старший преподаватель Высшей инженерно-экономической школы, ИПМЭиТ, СПбПУ. В списке научных трудов более 50 работ в области развития строительного комплекса, цифровой трансформации, автоматизации проектирования и стратегического развития регионов. Author ID (РИНЦ): 943319; Author ID (Scopus): 57204719810; Researcher ID (WoS): AVH-2326-2020; ORCID ID: 0000-0001-7117-7549. ektereshko@mail.ru. ✉.

Малашенко Марина Руслановна, 2001 г. рождения. Окончила СПбПУ в 2023 г. Аналитик лаборатории промышленных систем потоковой обработки данных ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. В списке научных трудов около 15 работ, посвященных экономике северных регионов и нефтегазовой отрасли. ORCID ID: 0009-0008-5130-1774; Author ID (РИНЦ): 1247088. malashenko.marina.r@yandex.ru



Середин Евгений Петрович, 2001 г. рождения. Закончил СПбПУ в 2023 г. Аналитик лаборатории промышленных систем потоковой обработки данных ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. В списке научных трудов около 10 работ, посвященных инновациям в энергетике и устойчивому развитию. ORCID ID: 0009-0003-6108-0323 Author ID (РИНЦ): 1246429. seredin.evgeny2010@yandex.ru



Поступила в редакцию 13.03.2025, после рецензирования 02.07.2025. Принята к публикации 10.07.2025.



Digital transformation of industrial facility processes of oil and gas field

© 2025, E.K. Tereshko ✉, M.R. Malashenko, E.P. Seredin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

Abstract

The article explores the impact of digital transformation on the processes associated with industrial facilities in the oil and gas sector, with the aim of enhancing their efficiency. The object of the study is the economic entities involved in the operation of an oil and gas field, while the focus is on the integration of advanced digital technologies — such as the Internet of Things, building information modeling (BIM), additive manufacturing, robotics, and artificial intelligence — across the entire life cycle of industrial facilities. The application of digital tools is examined at various life cycle stages, from conceptual design through facility commissioning to decommissioning. The article outlines the stages of the field development life cycle — "Design," "Field Development," and "Decommissioning"— and provides a detailed breakdown of the "Design" and "Field Development" phases. A matrix linking digital technologies to specific life cycle stages of oil and gas field development has been formed, serving as the foundation for constructing an ontology of facility development. Based on this framework, the authors propose recommendations to support the digital transformation of economic entities involved in oil and gas field development, presented in the form of a strategic roadmap.

Keywords: digital transformation, oil and gas field, life cycle, digital technologies, scorecard, strategic roadmap, ontology.

For citation: Tereshko EK, Malashenko MR, Seredin EP. Digital transformation of industrial facility processes of oil and gas field [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(3): 376-389. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-376-389.

Authors' contributions: Tereshko E.K. – research problem statement, concept, methodology; Malashenko M.R. – data collections and systematization; Seredin E.P. – data visualization.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 – Decomposition scheme of the life cycle stages of oil and gas field infrastructure facilities at level A0
- Figure 2 – Decomposition scheme of level A1 “Design”
- Figure 3 – Decomposition scheme “Field development” (A2)
- Figure 4 – Matrix of the correspondence between digital technologies and the life cycle stages of an oil and gas field infrastructure facility
- Figure 5 – Fragment of the ontology of oil and gas field infrastructure development
- Figure 6 – Strategic roadmap for the digital transformation of economic entities involved in oil and gas field development
- Table 1 – Relationship between the life cycle stages of oil and gas field infrastructure facilities and the components of the strategic roadmap
- Table 2 – Breakdown of the “Society and Market” component of the strategic roadmap for digital transformation

References

- [1] *Shelepaeva AH*. Digital transformation: basic approaches to the definition of the concept [In Russian]. *Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: Informatization of education*. 2022; 19(1): 20-28. DOI: 10.22363/2312-8631-2022-19-1-20-28.
- [2] *Kurochkina AA, Namazov KA*. Digital transformation as the main direction of business evolution: a literature review [In Russian]. *Progressive economy*. 2023; 7: 20-41. DOI: 10.54861/27131211_2023_7_20.
- [3] *Ciancarini P, Giancarlo R, Grimaudo G*. Digital transformation in the public administrations: A guided tour for computer scientists. *IEEE Access*. 2024; 12: 22841-22865. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3363075.

- [4] **Kokova SF, Dyshekova AA.** Digital transformation of industries: starting conditions and priorities [In Russian]. *Journal of Applied Research*. 2022; 7(6): 577-585. DOI: 10.47576/2712-7516_2022_6_7_577.
- [5] **Bogachev YuS, Bekulova SR.** Digitalization as a way to increase the efficiency of industrial management in Russia [In Russian]. *National security/nota bene*. 2023; 3: 79-91. DOI: 10.7256/2454-0668.2023.3.43718.
- [6] **Krokhina PA, Subbotina TN.** The impact of digitalization on the effectiveness of organizations [In Russian]. *Economics and Business: theory and practice*. 2024; 3-1 (109): 191-195. DOI: 10.24412/2411-0450-2024-3-1-191-195.
- [7] **Shastov AA.** The impact of digital transformation on business processes and models: prospects and challenges [In Russian]. *Innovation and investment*. 2024; 2: 222-225. DOI: 10.24412/2307-180X-10.24412/2307-180X-2-222-225.
- [8] **Skvortsova NA, Zakharov AV, Bulatov II.** Digital transformation of business processes based on artificial intelligence technologies (Russian and international experience) [In Russian]. *Economics, entrepreneurship and law*. 2025; 15(1): 131-152. DOI: 10.18334/epp.15.1.122526.
- [9] **Rybkina GV, Zaitseva IA, Loginova SA, Simagin AV.** Industrial digitalization in construction: a multidimensional approach and key technologies [In Russian]. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2024; 2(48): 77-84. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-48-2-77-84.
- [10] **Shutova MN, Plakhutina AA, Kuzheleva VA.** The use of BIM technologies in the development of architectural, structural, organizational and technological solutions for industrial buildings [In Russian]. *Construction and architecture*. 2021; 4: 71-75.
- [11] **Abrahamyan SG, Burlachenko OV, Oganessian OV, Burlachenko AO, Shayunusov AR.** BIM technologies in construction: functions, development and application experience [In Russian]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2021; 1: 323-332.
- [12] **Mysovskikh DA, Ovchinnikov IG.** Building information modeling in construction. User experience. Problems of implementation [In Russian]. *Bulletin of Eurasian Science*. 2021; 13(2): 1-10.
- [13] **Sukhomlin VA, Namiot DE, Gapanovich DA.** Analysis of trends in the development of digital twins of a new generation [In Russian]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024; 12(7): 119-130.
- [14] **Sosfenov DA, Shakhova MS.** Application of digital twin technology in Russia: development opportunities and constraints [In Russian]. *Economics and management*. 2023; 29(11): 1325-1332. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-11-1325-1332.
- [15] **Noman AHM, Mustaqim SM, Molla S, Siddique IM.** Enhancing Operations Quality Improvement through Advanced Data Analytics. *Journal of Computer Science Engineering and Software Testing*. 2024; 10(1): 1-14. DOI: 10.46610/JOCSES.2024.v10i01.001.
- [16] **Carvajal G, Maucec M, Cullick S.** Intelligent digital oil and gas fields: concepts, collaboration, and right-time decisions. Gulf Professional Publishing, 2017.
- [17] **Wanasinghe TR, Gosine RG, Silva OS, Mann GKI, James LA, Warriani P.** Unmanned aerial systems for the oil and gas industry: Overview, applications, and challenges. *IEEE access*. 2020; 8: 166980-166997. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020593.
- [18] **Temizel C, Canbaz CH, Palabiyik Y, Putra D, Asena A, Ranjith R, Jongkittinarukorn K.** A comprehensive review of smart/intelligent oilfield technologies and applications in the oil and gas industry. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. SPE, 2019; D042S087R001. DOI: 10.2118/195095-MS.
- [19] **Lee CY, Chong HY, Wang X.** Streamlining digital modeling and building information modelling (BIM) uses for the oil and gas projects. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2018; 25(2): 349-396. DOI: 10.1007/s11831-016-9201-4.
- [20] **Bezkorovayniy V, Bayazitov V, Bobov D.** Management of the design and construction of offshore oil and gas facilities with BIM Base. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018; 463(4): 042056. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042056.
- [21] **Alsofiani MA.** Digitalization in infrastructure construction projects: A prisma-based review of benefits and obstacles. *arXiv preprint arXiv:2405.16875*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.16875.
- [22] **Olawumi TO, Chan DWM, Wong JKW, Chan APC.** Barriers to the integration of BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts. *Journal of Building Engineering*. 2018; 20: 60-71. DOI: 1016/j.jobe.2018.06.017.
- [23] **Chernov SB, Novikova OS.** Ensuring data security in the digital economy [In Russian]. *Economic sciences*. 2020; 189: 104-109. DOI: 10.14451/1.189.104.
- [24] **Stewart H.** Digital transformation security challenges. *Journal of Computer Information Systems*. 2023; 63(4): 919-936. DOI: 10.1080/08874417.2022.2115953.
- [25] **Pimenov SI.** The state and prospects of a multi-level planning system for construction projects in the context of digital transformation. *Construction and Geotechnics*. 2022; 13(2): 55-66. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.05.

- [26] **Flaksman AS, Kokurin DI, Khodzhaev DK, Ekaterinovskaya MA, Orusova OV, Vlasov AV.** Assessment of prospects and directions of digital transformation of oil and gas companies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020; 976(1): 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/976/1/012036.
- [27] **Dorador JM, Young RIM.** Application of IDEF0, IDEF3 and UML methodologies in the creation of information models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2000; 13(5): 430-445. DOI: 10.1080/09511920050117928.
- [28] **Maryasin OY.** Development of ontologies for the digital twin of buildings [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4(34)): 480-495. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.
- [29] **Massel LV, Vorozhtsova TN.** Ontological approach to the construction of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(3(37)): 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [30] **Kaplan RS, Norton DP.** Strategy maps: Converting intangible assets into tangible outcomes. – Harvard Business Press, 2004.
- [31] **Kozlov AV, Gutman SS, Zaichenko IM, Rytova EV.** A set of regional indicators as a tool for forming a strategy for innovative and industrial development of the Far North regions [In Russian]. *π-Economy*. 2016; 4(246): 252-263. DOI: 10.5862/IE.246.22.
- [32] **Kozlov AV, Tereshko EK.** Strategic map for the development of the educational system of the Murmansk region in the context of the digital transformation of the economy [In Russian]. *The North and the market: the formation of an economic order*. 2018; 4(18): 111-122. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.4.2018.60.111-122.
- [33] **Thompson JrAA, Arthur A, Strickland III AJ.** Strategic Management: Concepts and Situations for Analysis [In Russian], 12th edition: Translated from English, Moscow: Williams Publishing House, 2002. 928p.

About the authors

Ekaterina Kirillovna Tereshko (b. 1996) graduated from the postgraduate program of SPbPU in 2023, PhD in Economics (2024). Researcher at the Laboratory of Industrial Streaming Data Processing Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. Senior lecturer at the Higher School of Engineering and Economics, Institute of Industrial Management, Economics and Trade, SPbPU. The list of scientific papers includes more than 50 works in the field of construction complex development, digital transformation, automation of design and strategic development of regions. Author ID (RSCI): 943319; Author ID (Scopus): 57204719810; Researcher ID (WoS): ABH-2326-2020; ORCID ID: 0000-0001-7117-7549. ektereshko@mail.ru. ✉

Marina Ruslanovna Malashenko (b. 2001) graduated from SPbPU in 2023. Analyst at the Laboratory of Industrial Streaming Data Processing Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. The list of scientific papers includes about 15 works devoted to the economy of the northern regions and the oil and gas industry. ORCID ID: 0009-0008-5130-1774; Author ID (RSCI): 1247088. malashenko.marina.r@yandex.ru.

Evgeny Petrovich Seredin (b. 2001) graduated from SPbPU in 2023. Analyst at the Laboratory of Industrial Streaming Data Processing Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. The list of scientific papers includes about 10 works dedicated to innovations in the energy sector and sustainable development. ORCID ID: 0009-0003-6108-0323 Author ID (RSCI): 1246429. seredin.evgeny2010@yandex.ru.

Received March 13, 2025. Revised July 02, 2025. Accepted July 10, 2025.



Метод поиска частых паттернов с учётом иерархий признаков

© 2025, А.А. Зуенко

*Институт информатики и математического моделирования им. В.А. Путилова,
Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр Российской Академии наук (ФИЦ КНЦ РАН),
Апатиты, Россия*

Аннотация

Статья является развитием авторского подхода к решению задач интеллектуального анализа данных. Разрабатываемые методы относятся к объяснимому искусственному интеллекту и теории программирования в ограничениях. Предложен метод поиска частых замкнутых паттернов с учётом иерархий признаков, который основан на процедуре построения бинарного дерева поиска и обеспечивает получение паттернов без предварительного этапа формирования кандидатов в искомые паттерны. Обработка ограничений иерархии признаков осуществляется специализированными процедурами редукции пространства поиска, что снижает остроту проблемы экспоненциальной катастрофы. В отличие от часто используемых алгоритмов в предлагаемом методе реализуется обход дерева поиска не в ширину, а в глубину, где основной составляющей является процедура логического вывода, позволяющая вычислять для заданного множества признаков его замыкание. Рассматриваемый метод позволяет учитывать дополнительные ограничения и применять их для сокращения пространства поиска. По сравнению с аналогами, использующими логический вывод, метод позволяет исключить многократное повторение действий при вычислении замыканий на множествах признаков.

Ключевые слова: поиск частых паттернов, интеллектуальный анализ данных, иерархия признаков, машинное обучение, удовлетворение ограничений, программирование в ограничениях.

Цитирование: Зуенко А.А. Метод поиска частых паттернов с учётом иерархий признаков. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С. 390-403. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-390-403.

Финансирование: работа выполнена в рамках темы НИР «Методы и информационные технологии мониторинга и управления региональными критическими инфраструктурами Арктической зоны Российской Федерации» (FMEZ-2025-0054).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Методы машинного обучения можно разделить на «прозрачные» и методы на основе концепции «чёрного ящика». К методам первой группы относятся: деревья решений; системы на основе правил, в том числе ассоциативных; методы поиска частых паттернов; байесовские сети и т.п. Подобные методы обеспечивают «прозрачность» принятия решений, поскольку позволяют легко интерпретировать входные, промежуточные, выходные параметры, а также зависимости между ними. «Прозрачность» рассматриваемых методов особенно важна в тех предметных областях (ПрО), где принципиальную роль играют вопросы обеспечения безопасности, этические соображения и т.п. К методам на основе концепции «чёрного ящика» относят методы обучения с использованием нейросетевого подхода, основными недостатками которых следует считать: отсутствие возможности объяснить результаты решения; затруднения при интеграции в процесс решения знаний ПрО. Под методами *объяснимого ис-*

кусственного интеллекта или методами объяснимого машинного обучения обычно понимаются упомянутые «прозрачные» методы, а также те нейроморфные методы, которые предполагают наличие определённого внешнего механизма объяснений. В настоящей статье рассмотрены «прозрачные» методы, а именно, использование дополнительных знаний Про для семантической «обрезки» пространства альтернатив при поиске частых паттернов.

Поиск частых паттернов представляет собой одно из важных направлений интеллектуального анализа данных (ИАД), которое охватывает такие Про как: анализ приобретаемых товаров [1]; Интернет-реклама, анализ ключевых слов или фраз в текстовых документах [2]; машинное обучение при составлении расписаний [3]; анализ последовательностей типовых действий по сигналам системы датчиков в «умном» доме [4] и т.д. Во многих методах поиска частых паттернов, например «Априори» [1] и *ECLAT (Equivalence CLAss Transformation)* [5], построение каждого уровня дерева поиска состоит из двух этапов: на первом этапе производится формирование кандидатов в искомые паттерны, на втором осуществляется «отбраковка» неподходящих кандидатов, которая сопряжена с большими вычислительными затратами. К достоинствам методов «Априори» и *ECLAT* относится то, что они позволяют гибко учитывать и анализировать дополнительные требования к виду искомого паттерна, например ограничения на его длину, замкнутость, ограничения на подпаттерны и суперпаттерны и т.п.

Эффективным методом поиска частых паттернов считается *FP-Growth (Frequent Pattern-Growth)*, с помощью которого можно «выращивать» частые паттерны без этапа проверки кандидатов [6]. Но метод не позволяет гибко учитывать ограничения на вид паттерна, а в задачах ИАД обработка подобных ограничений играет крайне важную роль. Необходима разработка таких методов поиска паттернов, которые использовали бы новые ограничения для более глубокой редукции пространства поиска.

В статье развиваются работы, посвящённые применению авторского подхода к решению задач ИАД: кластеризации [7]; выявления замкнутых паттернов; поиска ассоциативных правил [8]. Разработанные методы позволяют обеспечивать гибкий учёт дополнительных требований (ограничений) к виду извлекаемых закономерностей. Для каждого типа ограничений разрабатываются соответствующие правила редукции пространства поиска.

В [8] предложен метод извлечения частых замкнутых паттернов требуемого вида с применением оригинального представления обучающей выборки в форме табличных ограничений и методов их удовлетворения. Однако эти методы не позволяют получать паттерны без этапа проверки кандидатов. В настоящей статье предлагается метод, который позволяет избежать генерации «лишних» вершин дерева поиска: в процессе обхода дерева поиска сразу выявляются искомые паттерны (а не кандидаты в паттерны).

Дополнительными ограничениями, которые полезно принимать во внимание при анализе паттернов, являются отношения на признаках объектов обучающей выборки. Эта область исследований называется «Поиск паттернов, управляемый онтологиями», а онтология рассматривается как средство семантической «обрезки» пространства поиска [9, 10].

1 Задачи поиска частых паттернов в данных

В качестве исходной информации для задачи поиска частых паттернов используется транзакционная база данных (БД), каждая строка которой содержит идентификатор транзакции и список элементов транзакции. Например, при анализе покупок товаров в магазине, в качестве идентификатора транзакции может быть выбран номер чека, а в качестве элементов – наименования приобретаемых товаров. Транзакционную БД представляют в виде бинарной объектно-признаковой таблицы, где объектам сопоставляются транзакции, а признакам – элементы транзакции. На пересечении строки и столбца таблицы единица стоит только

в том случае, если объект обладает данным признаком. Часть транзакционной БД, анализируемая в процессе поиска паттернов, именуется *обучающей выборкой*.

Пусть M – множество признаков, которыми могут обладать объекты. *Паттерном* A называется любое подмножество признаков (элементов), т.е. выполняется: $A \subseteq M$ [1]. *Частым паттерном* называется совокупность признаков A , которая встречается не менее чем в θ объектах обучающей выборки. Число θ называется *порогом встречаемости*. Количество объектов, где встречается паттерн A , называется *абсолютной поддержкой* паттерна A и обозначается $freq(A)$.

Обычно требуется найти не все частые паттерны, а лишь те, которые обладают интересующими конечного пользователя особенностями. Такие паттерны названы *интересными*. В качестве интересных часто рассматривают *замкнутые паттерны*, поскольку с их помощью можно выразить все другие паттерны [11]. Замкнутым называется такое множество признаков (паттерн), что объекты, обладающие всеми этими признаками одновременно, не имеют никаких других общих признаков. Паттерн A записывается в виде кортежа $[O, A]$, где под O понимается совокупность объектов, обладающих всеми признаками множества A .

Методы поиска частых замкнутых паттернов могут быть использованы при решении различных задач ИАД, в частности для выявления причинно-следственных зависимостей в данных, представляемых в форме *ассоциативных правил* [12].

Ассоциативное правило – это выражение вида $A \Rightarrow B$, где A и B – наборы элементов. Интуитивный смысл такого правила заключается в том, что транзакции в БД, содержащие элементы из A , как правило, также содержат элементы из B . Ассоциативное правило обычно характеризуется двумя числами, которые называются *относительная поддержка* и *достоверность*. Относительная поддержка правила $A \Rightarrow B$ – это процент транзакций из транзакционной БД, которые содержат как A , так и B . Достоверность правила – это условная вероятность $P(B|A)$, т.е. вероятность того, что если в транзакции присутствуют элементы из множества A , то в них будут присутствовать элементы из B . Пример ассоциативного правила: 97% клиентов, покупающих творог, также покупают сметану. Здесь 97% – это достоверность правила. Проблема поиска ассоциативных правил состоит в том, чтобы найти все правила, которые удовлетворяют заданной пользователем минимальной поддержке и минимальной достоверности [12].

При генерации интересных паттернов и ассоциативных правил бывает недостаточно ограничиться поиском множеств признаков, удовлетворяющих требованиям к частоте встречаемости и свойству замкнутости, поскольку таких паттернов получается слишком много и/или они недостаточно хорошо интерпретируются конечным пользователем [12, 13].

В настоящей работе при поиске интересных паттернов рассматривается дополнительное ограничение: признаки могут быть упорядочены в иерархии. Дополнительная информация о группировке элементов в виде иерархий позволяет установить ассоциативные правила не только между отдельными элементами, но и между различными уровнями иерархии (группами). Отдельные элементы могут иметь недостаточную поддержку, но в целом группа может удовлетворять требованиям к порогу встречаемости, что повышает интерпретируемость результатов ИАД конечным пользователем.

Особенности представления партономий (опираются на отношения «часть-целое») и таксономий (используют отношения «класс-подкласс») в рассматриваемом подходе поясняются на следующем примере.



Рисунок 1 – Иерархии признаков

На рисунке 1 представлены иерархии признаков, служащих для описания некоторых аспектов чрезвычайных ситуаций (ЧС), информация о которых хранится в транзакционной БД. Левая часть рисунка описывает инфраструктурные объекты, обеспечивающие хранение и доставку топлива потребителям;

центральная часть – типы ЧС, которые могут возникнуть на объектах топливной инфраструктуры; правая часть – иерархически упорядоченная информация о потребителях топлива. Левая часть рисунка описывает партономию признаков, а центральная – таксономию.

Для иллюстрации предлагаемого метода выявления паттернов с учётом иерархий признаков рассмотрен фрагмент рисунка 1. Пусть имеется совокупность иерархически упорядоченных признаков (рисунок 2): правое дерево соответствует таксономии, а левое – партономии. Следует уточнить, какие элементы иерархий могут присутствовать в записях транзакционной БД, т.е. формируют исходное описание транзакций, а какие могут встречаться только в генерируемых паттернах.

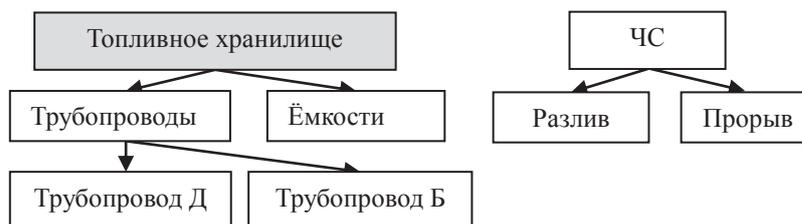


Рисунок 2 – Упрощённый пример иерархии признаков (фрагмент рисунка 1)

Для таксономии элементами транзакций являются листовые элементы. В партономии каждый элемент может входить в начальное описание транзакции.

В таблице 1 приведён пример фрагмента базы транзакций. Информацию, содержащуюся в транзакционной БД, и знания, содержащиеся в иерархиях признаков, можно представить в виде объектно-признаковой таблицы (таблица 2). В верхней строке таблицы 2 приведены обозначения признаков, используемые в дальнейшем. Каждая строка объектно-признаковой таблицы соответствует транзакции с тем же номером. Единицами в таблице помечаются элементы транзакций, а также те элементы, которые необходимо включить в описание транзакции, исходя из анализа иерархий признаков. Если в транзакции встречается элемент некоторой таксономии, то в соответствующей строке объектно-признаковой таблицы единицами также отмечаются те элементы, которые находятся выше рассматриваемого в иерархии. Например, поскольку в транзакцию №1 входит элемент *e* («Разлив»), то автоматически в неё включается и элемент *b* («Чрезвычайная ситуация»), описывающий надкласс понятия «Разлив».

Таблица 1 – Фрагмент базы транзакций

№ транзакции	Элементы
1	Ёмкости, Разлив
2	Трубопровод Д, Прорыв
3	Трубопровод Б, Прорыв
4	Трубопроводы, Прорыв
5	Ёмкости, Трубопроводы, Прорыв, Разлив
6	Трубопровод Д, Ёмкости, Прорыв, Разлив

Таблица 2 – Объектно-признаковая таблица

№	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
	Топливное хранилище	ЧС	Трубопроводы	Ёмкости	Разлив	Прорыв	Трубопровод Д	Трубопровод Б
1		1		1	1			
2		1				1	1	
3		1				1		1
4		1	1			1	1	1
5		1	1	1	1	1	1	1
6		1		1	1	1	1	

Если в транзакции встречается элемент некоторой партономии, то в соответствующей строке объектно-признаковой таблицы единицами также помечаются все элементы, которые находятся ниже в иерархии, чем рассматриваемый. Например, поскольку в транзакции №4 присутствует элемент *c* («Трубопроводы»), то в транзакцию также следует включить элементы *g* («Трубопровод Д») и *h* («Трубопровод Б»).

Пусть задано значение $\theta=2$ (т.е. две транзакции). Требуется найти все частые замкнутые паттерны, допустимые с точки зрения приведённых отношений иерархий признаков. В данном случае *допустимым* считается паттерн, любые два элемента которого не связаны отношениями иерархии (либо несравнимы, либо принадлежат различным иерархиям). Допустимый паттерн $[O_1, A]$ назван *замкнутым*, если не существует другого допустимого паттерна $[O_2, B]$, такого, что: $O_1=O_2$ и при этом $A \subseteq B$.

Для приведённого примера искомые паттерны, как показано ниже, могут быть использованы при построении ассоциативных правил с целью выявления наиболее вероятных объектов возникновения аварий. Таблица 2 рассматривается далее без столбца *a*, поскольку признак *a* не встречается ни в одной транзакции (нумерация столбцов исходной объектно-признаковой таблицы будет производиться, начиная со столбца *b*).

2 Предлагаемый подход к интеллектуальному анализу данных

Задача удовлетворения ограничений заключается в поиске решений для сети ограничений. Сеть ограничений представляет собой следующую тройку [14-16]: $\langle X, Dom, C \rangle$, где X – множество переменных, Dom – домены переменных, а C – ограничения, регламентирующие допустимые комбинации значений переменных. Требуется найти такие значения переменных, чтобы выполнялись все ограничения сети.

В настоящей статье используются табличные ограничения, к которым, помимо обычных таблиц, относятся: *сжатые таблицы*, *смарт-таблицы* и т.п. [17]. Данные типы ограничений отличаются кортежами отношений. В дальнейшем используются только сжатые таблицы, кортежи которых в качестве компонент содержат множества. Сходные структуры описываются в работе [18] и называются матрицами конечных предикатов.

В работе задачи ИАД ставятся и решаются как задачи удовлетворения табличных ограничений. Обучающие выборки представляются в виде специализированных табличных ограничений, которые позволяют в компактном виде выражать многоместные отношения, и используются авторские процедуры вывода на данных структурах.

В [7, 8] для моделирования обучающей выборки используются сжатые таблицы D -типа, которые содержат два атрибута: атрибут X , обозначающий объекты обучающей выборки, и атрибут Y , служащий для описания признаков объектов.

Для рассматриваемой объектно-признаковой таблицы (таблица 2), содержащей шесть строк и семь значащих столбцов, соответствующая ей сжатая таблица D -типа имеет вид:

	X	Y
	$\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	$\{b, c, d, e, f, g, h\}$
1	$\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	$\{c, d, e, f, g, h\}$
2	$\{4, 5\}$	$\{b, d, e, f, g, h\}$
3	$\{1, 5, 6\}$	$\{b, c, e, f, g, h\}$
4	$\{1, 5, 6\}$	$\{b, c, d, f, g, h\}$
5	$\{2, 3, 4, 5, 6\}$	$\{b, c, d, e, g, h\}$
6	$\{2, 4, 5, 6\}$	$\{b, c, d, e, f, h\}$
7	$\{3, 4, 5\}$	$\{b, c, d, e, f, g\}$

Заголовок D -таблицы состоит из атрибутов X и Y , а также соответствующих им текущих доменов. Тело D -таблицы заключается в перевёрнутые скобки. Количество строк D -таблицы равно количеству столбцов исходной объектно-признаковой таблицы. В данном случае это количество равно семи, в частности, строка 1 сжатой D -таблицы соответствует столбцу b исходной объектно-признаковой таблицы (таблица 2), а строка 7 – столбцу h .

Каждая строка сжатой таблицы может быть интерпретирована как следующая импликация $(Y = m_k) \rightarrow (X \in O_k)$ (если рассматривается признак m_k , то множество объектов, которые им обладают, равно O_k). Например, третьей строке D -таблицы соответствует следующее логическое выражение:

$$\begin{aligned} (X \in \{1, 5, 6\}) \vee (Y \in \{b, c, e, f, g, h\}) &= \overline{(Y \in \{b, c, e, f, g, h\})} \rightarrow (X \in \{1, 5, 6\}) = \\ &= (Y \in \{d\}) \rightarrow (X \in \{1, 5, 6\}) = (Y = d) \rightarrow (X \in \{1, 5, 6\}). \end{aligned}$$

Описание данного выражения на естественном языке: «Признаком d обладают объекты из множества $\{1, 5, 6\}$ и только они».

Для поиска частых замкнутых паттернов применяются авторские методы вывода на табличных ограничениях и методы ветвления дерева поиска.

Методы вывода на D -таблицах реализуются с помощью правил [7, 8]:

Утверждение 1 (У1). Если хотя бы одна строка сжатой таблицы D -типа пуста (содержит все пустые компоненты), то таблица пуста. Решения задачи удовлетворения ограничений не существует.

Утверждение 2 (У2). Если все компоненты атрибута пусты, то этот атрибут может быть удалён из сжатой таблицы (все компоненты соответствующих столбцов удаляются).

Утверждение 3 (У3). Если в сжатой таблице есть строка, которая содержит только одну непустую компоненту, то все значения домена, которые не включены в эту компоненту, удаляются из соответствующего домена.

Утверждение 4 (У4). Если строка сжатой таблицы D -типа содержит хотя бы одну полную компоненту, то она удаляется.

Утверждение 5 (У5). Если компонента сжатой таблицы D -типа содержит значение, которое не принадлежит соответствующему домену, то это значение удаляется из компоненты.

Утверждение 6 (У6). Компоненты сжатой таблицы D -типа, соответствующие переменной X и имеющие мощность ниже определённой границы θ , заменяются пустыми компонентами.

Утверждение 7 (У7). Если мощность домена переменной X ниже определённой границы θ , то решения задачи удовлетворения ограничений не существует.

Утверждения 1-5 используются для поиска замкнутых паттернов. Два последних утверждения применяются для отсека нечастых паттернов.

Дополнительное утверждение 8 позволяет организовать поиск замкнутых паттернов без предварительной генерации кандидатов в эти паттерны. Для обнаружения искомым паттернов строится бинарное дерево поиска. Стоит заметить, что путь к каждой вершине можно представить как последовательность дуг двух типов: дуг с метками m_k , соответствующими выбору некоторого признака m_k и дуг с метками $\setminus m_k$, запрещающими входение некоторого признака m_k в паттерн. Таким образом, каждый путь в дереве поиска можно охарактеризовать множеством $Path^-$, т.е. множеством признаков, которые не могут входить в паттерн, и множеством $Path^+$, которые обязательно должны присутствовать в паттерне.

Утверждение 8 (У8). Пусть $T[XY]$ – начальная D -таблица, $T'[XY]$ – остаток начальной D -таблицы, соответствующий узлу дерева поиска, куда входит дуга с меткой $\setminus m_k$ ($m_k \in Path^-$). Признак m_l , входящий в текущий домен переменной Y таблицы $T'[XY]$, исключается из этого домена, если выполняется $\pi_X(\sigma_{\langle Y, m_l \rangle}(T'[XY])) \subseteq \pi_X(\sigma_{\langle Y, m_l \rangle}(T[XY]))$, где: π_X – реляционная операция проекции отношения на атрибут X , $\sigma_{\langle Y, m_l \rangle}$ – реляционная операция выборки из отношения кортежей со значением m_l в атрибуте Y .

3 Описание разработанного метода

Этап 1. Представление обучающей выборки в виде особого типа табличных ограничений – сжатых таблиц D -типа – с исключением тех элементов, которые имеют поддержку ниже заданной. Каждая строка сжатой таблицы может быть сопоставлена с некоторым признаком m_k .

Этап 2. Формирование бинарного дерева на основе поиска в глубину с возвратами. Суть данной процедуры сводится к выбору на каждом шаге поиска признака m_k и формированию двух поддеревьев: левого, которое служит для поиска паттернов, содержащих данный признак (в левый узел-потомок входит дуга с меткой m_k); правого – для выявления паттернов, которые не содержат данный признак (в правый узел-потомок направлена дуга с меткой $\setminus m_k$). Признак m_k выбирается из числа тех признаков, которые ещё не участвовали в выборе и входят в текущий домен переменной Y . После выбора узла-потомка для отбрасывания заведомо неперспективных веток дерева поиска применяются процедуры редукции, позволяющие сводить сжатую таблицу D -типа, характеризующую узел-предок, к таблице меньшей размерности, исключая «лишние» строки, столбцы, значения компонент, значения атрибутов из доменов переменных X и Y . Выбор признака m_k осуществляется на основе следующей эвристики: в сжатой таблице D -типа, которая остаётся после применения правил редукции табличных ограничений на предыдущем шаге, находится строка, имеющая наибольшую мощность ком-

поненты X . Помимо правил (У1-У7) применяются два специализированных правила – утверждения 8' и 9, анализирующие отношения иерархии на признаках. В отличие от У8 в рассматриваемом случае требуется проверять не все элементы из множества $Path^-$, а только те, для которых в текущем домене не осталось элементов, состоящих с ними в иерархических отношениях (множество $Elim$). Тогда У8 можно переформулировать в виде утверждения 8'.

Утверждение 8' (У8'). Пусть $T[XY]$ – начальная D -таблица, $T'[XY]$ – остаток начальной D -таблицы, соответствующий узлу дерева поиска, куда входит дуга с меткой $\setminus m_k$ ($m_k \in Elim$). Признак m_l , входящий в текущий домен переменной Y таблицы $T'[XY]$, исключается из этого домена, если выполняется $\pi_X(\sigma_{(Y,m_l)}(T'[XY])) \subseteq \pi_X(\sigma_{(Y,m_k)}(T[XY]))$.

Утверждение 9 (У9). Если предполагается, что некоторый признак m_k должен обязательно войти в качестве элемента в искомый паттерн p , то все элементы m_j , лежащие по иерархии (таксономии, партономии) выше и ниже рассматриваемого, должны быть исключены из рассмотрения (из домена атрибута Y).

Этап 3. Запись паттернов на основе анализа узлов дерева поиска. Осуществляется поиск узлов, входящие дуги которых имеют метку, не содержащую знак «\». Эти узлы взаимнооднозначно соответствуют интересным паттернам. Запись паттернов может осуществляться в процессе построения дерева поиска.

В отличие от методов «Априори» [1] и *ECLAT* [5] предлагаемый метод реализует обход дерева поиска не в ширину, а в глубину. Как известно [14], поиск в глубину с возвратами предъявляет меньшие требования к объёмам используемой оперативной памяти компьютера, чем поиск в ширину. Основной составляющей метода является процедура логического вывода, позволяющая вычислять для заданного множества признаков его замыкание [19], но предложенный метод позволяет сократить вычисления за счёт исключения дублирующих действий.

Дерево решений для рассматриваемого примера, построенное согласно рассмотренным эвристике и правилам распространения ограничений, приведено на рисунке 3. Пусть выбрана одна из веток дерева поиска, а именно ветка bgd .

Пусть сначала выбирается признак b («ЧС»), поскольку он обладает максимальной поддержкой. Это означает, что выбирается компонента X первой строки, но поскольку данная компонента совпадает с текущим доменом, то «сужения» домена X не происходит. Согласно У9 исключаются из рассмотрения признаки e («Разлив») и f («Прорыв»), так как они являются дочерними узлами относительно узла b в таксономии.

Жирным шрифтом выделены признаки, которые формируют искомые паттерны. В полученной сжатой таблице D -типа элиминирована строка 1 на основании У4 и произведена «настройка» с использованием У5 и У4 на новый домен переменной Y : $\{b, c, d, g, h\}$, при этом строки 4 и 5 исключены из рассмотрения. На данном шаге получен паттерн $[\{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \{b\}]$.

Далее выбирается признак g и, согласно У9, исключается из рассмотрения признак c . Текущий домен переменной Y становится равным множеству $\{b, d, g, h\}$, а домен переменной X – множеству $\{2, 4, 5, 6\}$, т.е. компоненте X шестой строки. После «настройки» на новые домены (применением У5 и У4) получается остаток:

$$\begin{array}{cc} X & Y \\ \{2, 4, 5, 6\} & \{b, d, g, h\} \\ 3 & \left. \begin{array}{l} \{5, 6\} \\ \{b, g, h\} \end{array} \right[\\ 7 & \left. \begin{array}{l} \{4, 5\} \\ \{b, d, g\} \end{array} \right[\end{array}$$

Здесь из-за сокращения домена X исключена строка 6, а из-за сужения домена Y – строка 2. На данном шаге поиска выявлен паттерн $[\{2,4,5,6\} \{b,g\}]$.

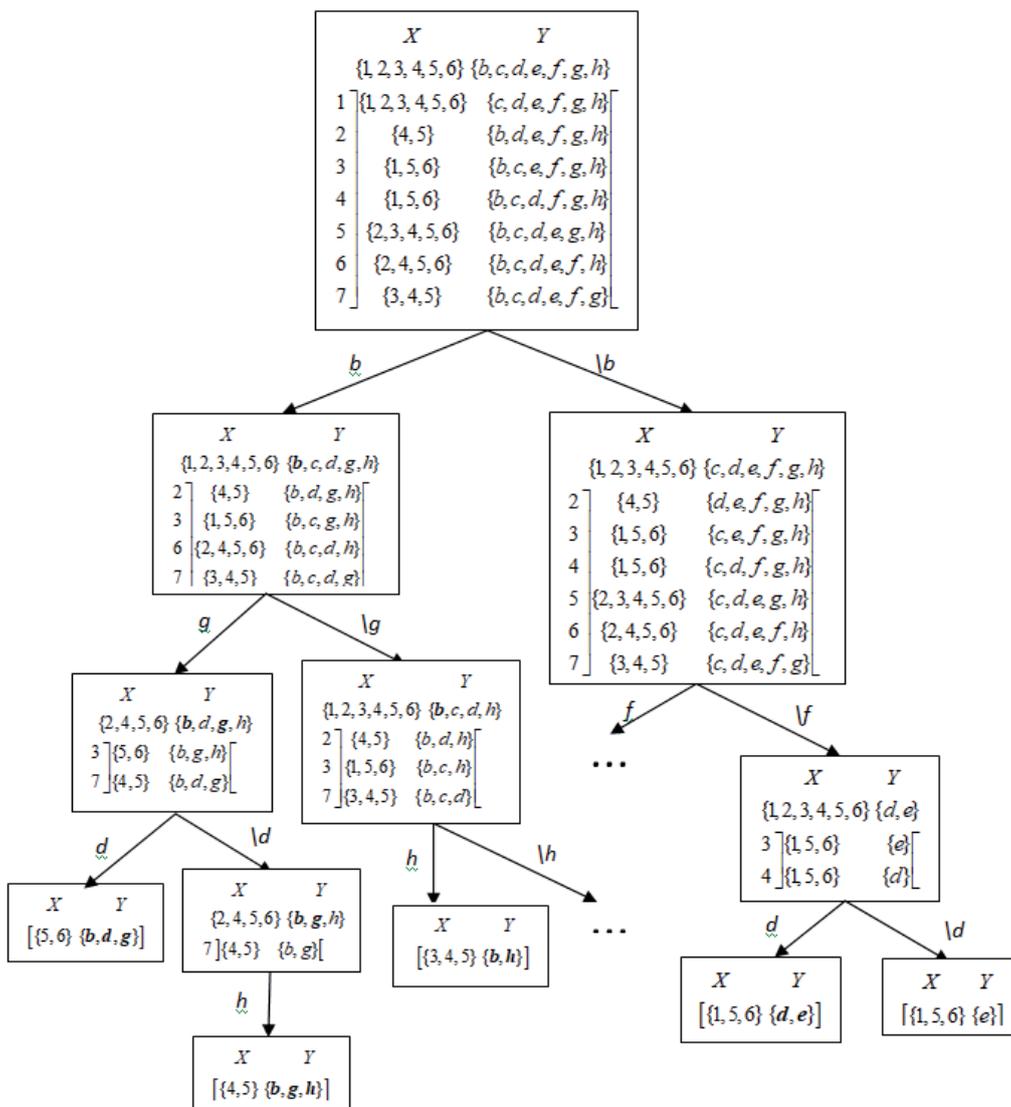


Рисунок 3 – Пример дерева решений на основе предложенного метода

Далее выбирается признак d . Это приводит к сужению домена переменной X до множества $\{5,6\}$. В результате «настройки» сжатой таблицы на новый домен переменной X с использованием $U5$ и $U4$ строка 3 исключается из рассмотрения, а в строке 7 компонента X становится равна одноэлементному множеству $\{5\}$, при том, что порог встречаемости равен двум. После применения $U6$ и $U3$ домен переменной Y сужается до множества $\{b,d,g\}$, а строка 7 элиминируется согласно $U4$.

На данном шаге обнаружен паттерн $[\{5,6\} \{b,d,g\}]$. Все строки сжатой таблицы вычеркнуты, это свидетельствует о завершении исследования рассматриваемой ветви дерева поиска. В результате прохода по данной ветви дерева поиска выявлено три паттерна.

На примере ветки $\backslash b \backslash f$ можно пояснить применение $U8$.

После исключения признаков b и f из домена переменной Y и применения $U4$ получается следующий остаток $T[XU]$ исходной сжатой таблицы $T[XU]$:

X	Y
$\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	$\{c, d, e, g, h\}$
$2 \left[\{4, 5\} \right.$	$\left. \{d, e, g, h\} \right[$
$3 \left[\{1, 5, 6\} \right.$	$\left. \{c, e, g, h\} \right[$
$4 \left[\{1, 5, 6\} \right.$	$\left. \{c, d, g, h\} \right[$
$6 \left[\{2, 4, 5, 6\} \right.$	$\left. \{c, d, e, h\} \right[$
$7 \left[\{3, 4, 5\} \right.$	$\left. \{c, d, e, g\} \right[$

Признаки b и f полностью формируют одну из ветвей таксономии, а для признака f в текущем домене переменной Y , который описывается множеством $\{c, d, e, g, h\}$, нет ни его предков, ни потомков. Имеется только элемент e , принадлежащий той же таксономии, но несравнимый с элементом f . Следовательно, признак f включается в множество $Elim$. Далее проверяется выполнение условия **У8'** для каждого из признаков $\{c, d, e, g, h\}$.

Для признака f выражение $\pi_X(\sigma_{\langle Y, f \rangle}(T[XY]))$ можно получить из анализа таблицы $T[XY]$: достаточно взять компоненту X той строки, где в компоненте Y отсутствует значение f , т.е. $\pi_X(\sigma_{\langle Y, f \rangle}(T[XY])) = \{2, 3, 4, 5, 6\}$. Аналогично, на основе анализа таблицы $T'[XY]$ получается:

$$\begin{aligned} \pi_X(\sigma_{\langle Y, c \rangle}(T'[XY])) &= \{4, 5\}, \quad \pi_X(\sigma_{\langle Y, d \rangle}(T'[XY])) = \{1, 5, 6\}, \quad \pi_X(\sigma_{\langle Y, e \rangle}(T'[XY])) = \{1, 5, 6\}, \\ \pi_X(\sigma_{\langle Y, g \rangle}(T'[XY])) &= \{2, 4, 5, 6\}, \quad \pi_X(\sigma_{\langle Y, h \rangle}(T'[XY])) = \{3, 4, 5\}. \end{aligned}$$

Условие правила редукции **У8'** выполняется для признаков c, g, h , а это значит, что их следует исключить из таблицы $T'[XY]$. После исключения данных признаков из домена переменной Y и применения **У4** остаётся D -таблица (см. рисунок 3):

X	Y
$\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	$\{d, e\}$
$3 \left[\{1, 5, 6\} \right.$	$\left. \{e\} \right[$
$4 \left[\{1, 5, 6\} \right.$	$\left. \{d\} \right[$

Из рисунка 3 видно, что дальнейшее ветвление осуществляется путём рассмотрения двух поддеревьев: ветки d и ветки $\setminus d$. Пусть выбирается ветка $\setminus d$. Тогда D -таблица примет вид:

X	Y
$\{1, 5, 6\}$	$\{e\}$

Однако, согласно **У8'**, выбрать значение e нельзя из-за ранее исключённого на этапе ветвления значения d . Поиск по этой ветви останавливается, а полученная листовая вершина не соответствует ни одному из искомым паттернов, поскольку в неё ведёт дуга с меткой \setminus .

Можно перечислить все полученные замкнутые частые паттерны:

$$\begin{aligned} &[\{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \{b\}], [\{2, 3, 4, 5, 6\} \{f\}], [\{2, 4, 5, 6\} \{b, g\}], [\{3, 4, 5\} \{b, h\}], [\{1, 5, 6\} \{b, d\}], [\{4, 5\} \{b, c\}], \\ &[\{2, 4, 5, 6\} \{f, g\}], [\{3, 4, 5\} \{f, h\}], [\{1, 5, 6\} \{d, e\}], [\{4, 5\} \{c, f\}], [\{5, 6\} \{b, d, g\}], [\{4, 5\} \{b, g, h\}], \\ &[\{4, 5\} \{f, g, h\}], [\{5, 6\} \{d, e, f, g\}]. \end{aligned}$$

На основе полученных частых замкнутых паттернов можно сформулировать ассоциативные правила. Пусть задано значение минимальной достоверности 75%.

Пусть выбран паттерн $[\{2, 4, 5, 6\} \{f, g\}]$. На основе его анализа может быть получено следующее ассоциативное правило: $f \Rightarrow g$. Данное правило на естественном языке может быть описано следующим образом: «Если тип ЧС – Прорыв, то объект, на котором произошла ЧС,

– Трубопровод Д». Относительная поддержка данного правила равна $4/6 \approx 0,67$, а достоверность – $4/5 = 0,8$. Следовательно, правило признаётся достоверным.

Если для анализа выбирается паттерн $\{2, 4, 5, 6\} \{b, g\}$, то на его основе может быть получено ассоциативное правило $b \Rightarrow g$. Относительная поддержка данного правила и его достоверность равны $4/6 \approx 0,67$. Следовательно, данное правило не может быть признано достоверным. Другими словами, нельзя утверждать, что если произошла какая-либо ЧС, то объектом, где это случилось, обязательно является «Трубопровод Д».

Признаки b и f связаны иерархией таксономии, причём b («ЧС») служит обобщением f («Прорыв»), следовательно, второе из рассмотренных правил находится на более высоком уровне абстракции.

4 Программная реализация разработанного метода

Программное приложение разработано на языке *Python* [20]. Для удобства конечного пользователя при выполнении отдельных этапов работы с паттернами предназначаются специализированные вкладки. Выделены следующие этапы работы:

- 1) формирование иерархий признаков (вкладка «Иерархии»);
- 2) формирование объектно-признакового описания данных на основе выбранной транзакционной БД с учётом иерархий признаков (вкладка «Датасеты»);
- 3) запуск вычислений и получение результирующих паттернов (вкладка «Паттерны»).

Признаковое пространство представляет собой множество деревьев (лес) признаков, каждое из которых упорядочивает признаки в определённую партномию, либо таксономию. На вкладке «Иерархии» с помощью кнопок «Создать новый лес», «Загрузить лес из файла», «Сохранить лес в файл» обеспечена возможность создания нового признакового пространства, загрузки признакового пространства из файла, сохранения его в файл, соответственно. После именования признакового пространства можно создавать, удалять, редактировать деревья признаков с помощью кнопок второй линейки верхней панели. На рисунке 4 показана процедура редактирования дерева. Деревья признаков отображаются на вкладке слева. При необходимости добавления в дерево признаков новых узлов в соответствующие поля внизу экрана вводится идентификатор узла-предка, для которого следует добавить узел-потомок, а также идентификатор и текстовое пояснение для добавляемого узла-потомка. Обеспечена возможность каскадного удаления узлов в деревьях.

В правой части вкладки представлена легенда для используемых признаков.

На рисунке 5 в верхней левой части вкладки «Датасеты» приводится пример транзакционной БД. С помощью кнопок верхней панели данной вкладки

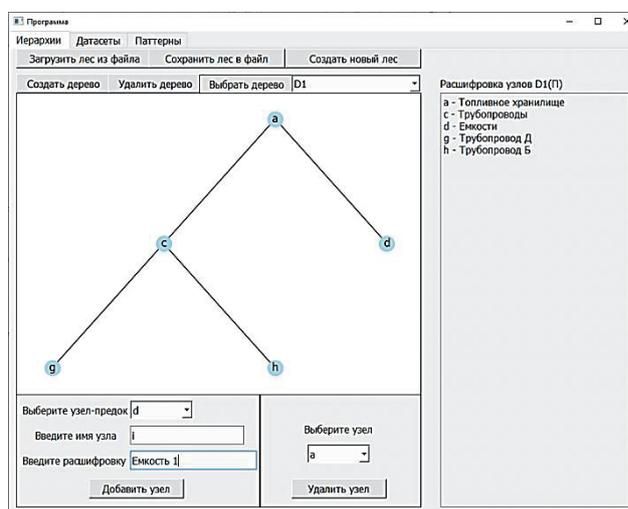


Рисунок 4 – Этап формирования иерархий признаков

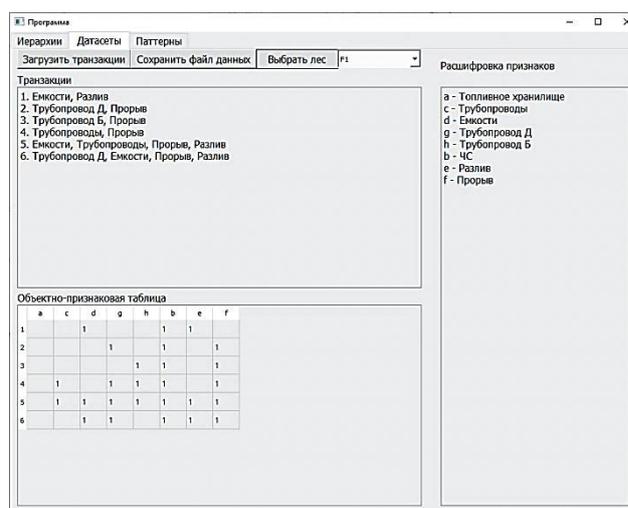


Рисунок 5 – Этап формирования объектно-признакового описания данных

обеспечена возможность выбора признакового пространства (кнопка «Выбрать лес») загрузки транзакционной БД из некоторого файла и преобразования её в объектно-признаковое представление (кнопка «Загрузить транзакции»), а также сохранения результата в файл. Для удобства данная вкладка снабжена легендой. В процессе преобразования в объектно-признаковое представление некоторые транзакции дополняются новыми элементами на основе анализа соответствующих деревьев признаков (партономий или таксономий).

На рисунке 6 представлен этап получения результирующих паттернов. На вкладке «Паттерны» в специальном окошке задаётся порог частоты встречаемости искомым паттернов в обучающей выборке. С помощью кнопки «Найти паттерны» запускается поиск частых замкнутых паттернов с учётом иерархий признаков. Результаты поиска представляются в левой части экрана в виде пар множеств «транзакции (объекты), поддерживающие частый замкнутый паттерн – сам искомый паттерн». Выводятся все замкнутые паттерны, которые удовлетворяют заданным требованиям к частоте встречаемости и ограничениям на иерархии признаков.

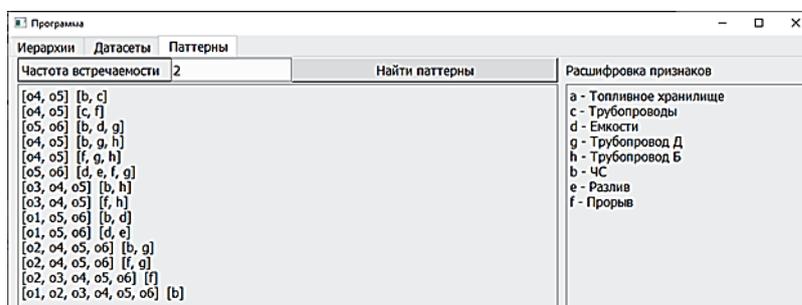


Рисунок 6 – Этап запуска вычислений и получения результирующих паттернов

Заключение

В статье задачи ИАД предложено решать как задачи удовлетворения табличных ограничений. Представлен метод поиска частых замкнутых паттернов с учётом иерархий признаков. Показано, как на основании онтологического представления ПрО можно ускорить процесс получения интересных паттернов, а также повысить их интерпретируемость, рассматривая не только элементы самих транзакций, но и связанные с ними более абстрактные понятия.

Разработанный метод позволяет анализировать не только отношения таксономии на признаках, но и отношения партономии. Для представления обучающей выборки используются специализированные табличные ограничения – сжатые таблицы *D*-типа.

Предложенный метод поиска частых замкнутых паттернов с учётом иерархий признаков основан на процедуре построения бинарного дерева поиска, которая обеспечивает получение интересных паттернов без предварительного этапа генерации кандидатов в искомые паттерны. Обеспечивается учёт дополнительных требований иерархического упорядочения признаков извлекаемых паттернов. Применение метода позволяет на каждом шаге поиска сводить имеющуюся задачу к задаче существенно меньшей размерности, что позволяет исключить многократное повторение действий при вычислении замыканий на множествах признаков.

Особенности применения метода показаны на примере задачи выявления наиболее вероятных объектов возникновения аварий.

Список источников

- [1] *Agrawal R., Imielinski T., Swami A.* Mining association rules between sets of items in large databases. In: Proceedings of the ACM SIGMOD Conf on Management of Data. Washington, 1993. P.207-216.
- [2] *Zhong N., Li Y., Wu S.-T.* Effective Pattern Discovery for Text Mining. *IEEE Transaction on Knowledge and data engineering*, 2012. №1(24). P.30-44. DOI: 10.1109/TKDE.2010.211.
- [3] *Arnold F., Santana I., Sørensen K., Vidal T.* PILS: Exploring high-order neighborhoods by pattern mining and injection. *Artificial Intelligent*. 2021. №116. P. 1-23. DOI: 10.1016/j.patcog.2021.107957.
- [4] *Nguyen D., Nguyen S., Minh H. C.* Pattern Discovering for Ontology Based Activity Recognition in Multi-resident Homes. *Thu Dau Mot University Journal of Science*. 2020. №2(4), P.332-347. DOI:10.37550/tdmu.EJS/2020.04.079.

- [5] **Agrawal R., Srikant R.** Fast algorithms for mining association rules in large databases. In: Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases. VLDB, Santiago, Chile, 1994. P.487-499.
- [6] **Han J., Kamber M., Pei J.** Data Mining: Concepts and Techniques. Burlington: Morgan Kaufmann, 2012. 703 p. DOI: 10.1016/b978-0-12-381479-1.00006-x.
- [7] **Зуенко А.А., Зуенко О.Н.** Кластеризация с использованием методов удовлетворения табличных ограничений. *Онтология проектирования*. 2024. №3(53). С.391-407. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-3-391-407.
- [8] **Зуенко А.А., Зуенко О.Н.** Поиск зависимостей в данных на основе методов удовлетворения табличных ограничений. *Онтология проектирования*. 2023. №3(49). С.392-404. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-392-404.
- [9] **Traore Y., Diop C.T., Malo S., Lo M., Ouaro S.** Découverte demotifs fréquents guidée par une ontologie. *Revue Africaine de la Recherche en Informatique et Mathématiques Appliquées INRIA*. 2016. №25. P.75-92. DOI: 10.46298/arima.2558ff. fihal-01310985v3.
- [10] **Moawad A.M.H., Gadallah A.M., Kholief M.H.** Fuzzy Ontology based Approach for Flexible Association Rules Mining. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2017. №8(5). P. 328-337. DOI: 10.14569/IJACSA.2017.080541.
- [11] **Hien A., Loudni S., Aribi N., Lebbah Y., Laghzaoui M.E.A., Ouali A., Zimmermann A.** A relaxation-based approach for mining diverse closed patterns. In: Hutter F., Kersting K., Lijffijt J., Valera I. (eds.) ECML PKDD 2020. LNCS (LNAI), Springer, Cham, vol.12457. P.36-54. DOI:10.1007/978-3-030-67658-2_3.
- [12] **Liu X., Niu P.** Fast Top-K association rule mining using rule generation property pruning. *Applied Intelligence*. 2021. №51. P.2077-2093. DOI:10.1007/s10489-020-01994-9.
- [13] **Song W., Ye P.** Mining sequential patterns with flexible constraints from MOOC data. *Applied Intelligence*. 2022. №52. P.16458-16474. DOI: 10.1007/s10489-021-03122-7.
- [14] **Russel S., Norvig P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Prentice Hall, 2010. 1132 p.
- [15] **Verhaeghe H., Nijssen S., Pesant G., Quimper C.-G., Schaus P.** Learning optimal decision trees using constraint programming. *Constraints*. 2020. №12. P.226-250. DOI:10.1007/s10601-020-09312-3.
- [16] **Simoni H. (ed.)**, CP 2020. LNCS, vol. 12333. Springer, Cham. 2020. 972 p. DOI:10.1007/978-3-030-58475-7.
- [17] **Mairy J.-B., Deville Y., Lecoutre C.** The smart table constraint. In: Michel, L. (ed.) CPAIOR 2015. LNCS, Springer, Cham 2015. vol.9075. P.271-287. DOI:10.1007/978-3-319-18008-3_19.
- [18] **Zakrevskij A.** Integrated Model of Inductive-Deductive Inference Based on Finite Predicates and Implicative Regularities. In: *Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems*, IGI Global, 2013. P.1-12.
- [19] **Kuznetsov S.O., Obiedkov S.A.** Comparing performance of algorithms for generating concept lattices. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. №14 (2). 2002. P.189-216.
- [20] **Зуенко А.А., Зуенко О.Н.** Программа для генерации частых замкнутых паттернов с учётом иерархий признаков. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613311 от 10.02.2025.

Сведения об авторе

Зуенко Александр Анатольевич, 1983 г.р., к.т.н. (2009), ведущий научный сотрудник Института информатики и математического моделирования имени В.А. Путилова ФИЦ КНЦ РАН. Области научных интересов: программирование в ограничениях; моделирование слабо формализованных предметных областей. Author ID (RSCI): 528493; Author ID (Scopus): 26536974000; Researcher ID (WoS): E-7944-2017. a.zuenko@ksc.ru.



Поступила в редакцию 25.03.2025, после рецензирования 04.07.2025. Принята к публикации 10.07.2025.



A method for mining frequent patterns considering feature hierarchies

© 2025, A.A. Zuenko

Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»,
Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling, Apatity, Russia

Abstract

This article advances the author's approach to solving data mining problems by integrating methods from explainable artificial intelligence and constraint programming theory. It proposes a method for mining frequent closed patterns that accounts for feature hierarchies. The approach is based on the construction a binary search tree and eliminates the need for a preliminary candidate generation stage. Feature hierarchy constraints are handled through specialized procedures that reduce the search space, thereby mitigating the effects of combinatorial explosion. In contrast to commonly used algorithms, the proposed method employs a depth-first rather than a breadth-first search tree traversal strategy. Its core component is a logical inference procedure that computes the closure of a given feature set. The method also supports the incorporation of additional constraints to further reduce the search space. Compared to existing approaches based on logical inference, it avoids redundant computations when determining closures across feature sets.

Keywords: frequent pattern mining, data mining, feature hierarchy, machine learning, constraint satisfaction, constraint programming.

For citation: Zuenko AA. A method for mining frequent patterns considering feature hierarchies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 390-403. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-390-403.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the current research topic "Methods and information technologies for monitoring and management of regional critical infrastructures in the Arctic zone of the Russian Federation" (registration number FMEZ-2025-0054).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 - Feature hierarchies
- Figure 2 - Simplified example of a feature hierarchy (fragment of Figure 1)
- Figure 3 - A decision tree based on the proposed method
- Figure 4 - Stage of feature hierarchy formation
- Figure 5 - Stage of object-feature data description formation
- Figure 6 - Stage of computation and extraction of resulting patterns
- Table 1 - Fragment of the transaction database
- Table 2 - Object-feature table

References

- [1] *Agrawal R, Imielinski T, Swami A.* Mining association rules between sets of items in large databases. In: Proceedings of the ACM SIGMOD Conf on Management of Data. Washington, 1993. P.207-216.
- [2] *Zhong N, Li Y, Wu S-T.* Effective Pattern Discovery for Text Mining. *IEEE Transaction on Knowledge and data engineering*, 2012. № 1(24). P.30-44. DOI: 10.1109/TKDE.2010.211.
- [3] *Arnold F, Santana I, Sørensen K, Vidal T.* PILS: Exploring high-order neighborhoods by pattern mining and injection. *Artificial Intelligent*. 2021. №116. P. 1-23. DOI: 10.1016/j.patcog.2021.107957.
- [4] *Nguyen D, Nguyen S, Minh HC.* Pattern Discovering for Ontology Based Activity Recognition in Multi-resident Homes. *Thu Dau Mot University Journal of Science*. 2020; 2(4): 332-347. DOI:10.37550/tdmu.EJS/2020.04.079.
- [5] *Agrawal R, Srikant R.* Fast algorithms for mining association rules in large databases. In: Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases. VLDB, Santiago, Chile, 1994. P.487-499.

-
- [6] **Han J, Kamber M, Pei J.** Data Mining: Concepts and Techniques. Burlington: Morgan Kaufmann, 2012. 703 p. DOI: 10.1016/b978-0-12-381479-1.00006-x
- [7] **Zuenko AA, Zuenko ON.** Clustering using table constraint satisfaction methods [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 391–407. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-391-407.
- [8] **Zuenko AA, Zuenko ON.** Finding dependencies in data based on methods of satisfying table constraints [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023. 13(3): 392–404. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-392-404.
- [9] **Traore Y, Diop CT, Malo S, Lo M, Ouaro S.** Découverte demotifs fréquents guidée par une ontologie. *Revue Africaine de la Recherche en Informatique et Math-ématiques Appliquées INRIA*. 2016; 25: 75–92. DOI: 10.46298/arima.2558ff.ffhal-01310985v3.
- [10] **Moawad AMH, Gadallah AM, Kholief MH.** Fuzzy Ontology based Approach for Flexible Association Rules Mining. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2017. №8(5). P. 328–337. DOI: 10.14569/IJACSA.2017.080541.
- [11] **Hien A, Loudni S, Aribi N, Lebbah Y, Laghzaoui MEA, Ouali A, Zimmermann A.** A relaxation-based approach for mining diverse closed patterns. In: Hutter F., Kersting K., Lijffijt J., Valera I. (eds.) ECML PKDD 2020. LNCS (LNAI), Springer, Cham, 2020; 12457: 36–54. DOI:10.1007/978-3-030-67658-2_3.
- [12] **Liu X, Niu P.** Fast Top-K association rule mining using rule generation property pruning. *Applied Intelligence*. 2021; 51: 2077–2093. DOI:10.1007/s10489-020-01994-9.
- [13] **Song W, Ye P.** Mining sequential patterns with flexible constraints from MOOC data. *Applied Intelligence*. 2022; 52: 16458–16474. DOI: 10.1007/s10489-021-03122-7.
- [14] **Russel S, Norvig P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Prentice Hall, 2010. 1132 p.
- [15] **Verhaeghe H, Nijssen S, Pesant G, Quimper C-G, Schaus P.** Learning optimal decision trees using constraint programming. *Constraints*. 2020; 12: 226–250. DOI:10.1007/s10601-020-09312-3.
- [16] **Simoni H. (ed.)**, CP 2020. LNCS, vol. 12333. Springer, Cham. 2020. 972 p. DOI:10.1007/978-3-030-58475-7.
- [17] **Mairy J-B, Deville Y, Lecoutre C.** The smart table constraint. In: Michel, L. (ed.) CPAIOR 2015. LNCS, Springer, Cham 2015. vol.9075. P.271–287. DOI:10.1007/978-3-319-18008-3_19.
- [18] **Zakrevskij A.** Integrated Model of Inductive-Deductive Inference Based on Finite Predicates and Implicative Regularities. In: *Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems*, IGI Global, 2013. P.1–12.
- [19] **Kuznetsov SO, Obiedkov SA.** Comparing performance of algorithms for generating concept lattices. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. №14 (2). 2002. P.189–216.
- [20] **Zuenko AA, Zuenko ON.** A program for generating frequent closed patterns considering feature hierarchies [In Russian]. Certificate of state registration of a computer program No. 2024613311 dated 02/10/2025.
-

About the author

Alexander Anatolyevich Zuenko (b. 1983) graduated from the Petrozavodsk State University in 2005, PhD (2009), a leading researcher at the Institute of Informatics and Mathematical Modeling, a Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences» (IIMM KSC RAS). The areas of scientific interests include constraint programming and modeling in poorly formalized subject domains. ORCID: 0000-0001-5431-7538; Author ID (RSA): 528493; Author ID (Scopus): 26536974000; Researcher ID (WoS): E-7944-2017. a.zuenko@ksc.ru

Received March 25, 2025. Revised July 4, 2025. Accepted July 10, 2025.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.891

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-404-417



Методы гранулирования нечётких временных рядов для анализа данных

© 2025, Р.А. Бурнашев ✉, Я.В. Сергеев, А.Ф. Назипова

Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ),
Институт вычислительной математики и информационных технологий, Казань, Россия

Аннотация

Увеличение размерности данных, вызванное множеством гетерогенных временных рядов, обуславливает разработку эффективных способов их обработки и сжатия. В данной статье рассмотрен подход к сжатию данных, представленных в виде временных рядов, основанный на гранулировании с использованием методов нечёткой логики. Проведён анализ среднесуточной температуры в Республике Татарстан в период метеонаблюдений с 1881 по 2024 годы. Гранулирование позволило значительно сжать объём данных. Для преобразования исходных числовых данных в информационные гранулы использовано нечёткое резюмирование, которое позволило осуществить автоматическую генерацию гранулярного описания поведения временного ряда. Резюмирование результатов состояния временного ряда, полученных при анализе, выполнено с помощью методов нечёткой логики, включающих набор правил, функции принадлежности для каждого временного сезона, интервальные лингвистические переменные и программный модуль логического вывода (дефазификации). Применение предложенных методов в рассмотренном примере позволило сократить объём данных с 52534 до 7504 точек (коэффициент сжатия ~85%). Разработанные методы могут быть использованы для анализа больших объёмов данных в различных прикладных областях.

Ключевые слова: анализ данных, нечёткая логика, база знаний, нечёткое резюмирование, гранулирование, временные ряды.

Цитирование: Бурнашев Р.А., Сергеев Я.В., Назипова А.Ф. Методы гранулирования нечётких временных рядов для анализа данных. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.404-417. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-404-417.

Финансирование: работа выполнена за счёт гранта Академии наук Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение от 16.12.2024 №04/2024-ПД).

Вклад авторов: Бурнашев Р.А. – разработка концепции статьи и алгоритмов; Сергеев Я.В. – построение математической модели, тестирование нечётких правил; Назипова А.Ф. – обработка метео данных, гранулирование временных рядов, визуализация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Климатические изменения оказывают значительное влияние на социально-экономические системы, что обуславливает необходимость разработки новых подходов к прогнозированию и принятию решений. Рост объёмов данных, их неопределённость и сложность структуры делают традиционные методы анализа недостаточно эффективными. Актуальной задачей становится разработка методов, способных обрабатывать большие объёмы данных с учётом их неопределённости и обеспечивать достоверность данных в системах

поддержки принятия решений (СППР). Перспективным направлением в этой области является использование нечётких временных рядов, которые позволяют учитывать неопределённость и изменчивость данных, характерных для климатических и экономических процессов. В качестве предметной области рассмотрены метеоданные в одном из регионов России.

Целью данной статьи является разработка подходов к обработке больших массивов данных для СППР с использованием методов нечёткой логики и машинного обучения.

1 Нечёткая логика и нечёткие множества

Применение принципов нечёткой логики стало ключевым фактором в повышении устойчивости моделей прогнозирования.

Например, в работе [1] предложен многоступенчатый метод оперативного прогнозирования скорости ветра, который сочетает ансамблевый подход на основе модели прогнозирования погоды, нечёткую систему для извлечения данных и оптимизацию. Модель учитывает различные горизонтальные разрешения и исходные поля, что позволяет улучшить точность прогнозирования. В [2] представлен комбинированный интервал прогнозирования на основе нечёткой логики для прогнозирования ветровой энергии.

Применение методов машинного обучения и нечёткой логики позволяет повысить точность прогнозирования. Например, в [3] использована модель прогнозирования и улучшенный алгоритм кластеризации для установления функции нечёткого разделения. В [4] предложена модель прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе исторических данных о погоде и загрязнении. Используются нечёткие модели для обработки неточных и неопределённых данных, что позволяет прогнозировать уровни загрязнения. В [5] предложен метод прогнозирования временных рядов на основе интуиционистских нечётких множеств, учитывающий неопределённость в данных. Метод показал высокую эффективность по сравнению с другими подходами на основе интуиционистских нечётких множеств. В [6] предложены классификация многокритериальных методов принятия решений и правила их выбора при разработке специализированного программного обеспечения для СППР. В [7] предложен подход к оценке технического состояния электрооборудования, основанный на использовании взвешенных нечётких правил. Данный подход позволяет учитывать нечёткий характер исходных данных. В [8] приведён анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур с учётом динамики изменения природно-климатических характеристик путём применения методики нечёткой логики. Модель прогнозирования урожайности на основе нечёткой логики учитывает динамику климатических изменений. В [9] предложена методика оценки рисков снижения полевой всхожести зерновых культур, учитывающая степень кондиционности семенного материала на основе моделей нечёткой логики.

Системы прогнозирования на основе нечётких временных рядов представляют собой надёжный инструмент для работы с неопределённостью в данных временных рядов. Развитию теоретических основ и практического применения нечётких систем прогнозирования в различных областях посвящены работы [10-14].

Гранулирование временного ряда представляет собой процесс группировки данных временного ряда в более крупные временные интервалы, который позволяет: упростить структуры данных за счёт снижения их объёма; уменьшить влияния «шума» и случайных колебаний; повысить скорость обработки данных; улучшить визуализацию и интерпретацию временных рядов (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Операции в гранулировании данных

Операция	Краткое описание
Классификация [15]	Назначение временным рядам одного из заранее определённых классов.
Кластеризация [16]	Группировка данных на основе их схожести.
Сегментация [17]	Разбиение временного ряда на значимые сегменты, расположенные последовательно.
Резюмирование [18]	Создание компактного представления данных, сохраняющего ключевые характеристики.
Ассоциативные правила [19]	Поиск правил, относящихся к временным рядам.
Оптимизация [20]	Поиск оптимальных параметров для сжатия данных.

Представленные в таблице 1 операции гранулирования данных могут включать элементы нечёткой логики. Нечёткая логика используется в следующих задачах:

- группировка данных с возможностью одному объекту принадлежать одновременно нескольким или всем кластерам, но с различной степенью принадлежности (*нечёткая кластеризация*) [21];
- разбиение временного ряда на сегменты с учётом нечётких границ между ними (*нечёткая сегментация*) [22];
- вывод на базе нечёткой онтологии, который используется для резюмирования состояния сложной технической системы (*нечёткое резюмирование*) [23] и др.

В исследовании климатических факторов, которые часто изменяются в зависимости от временных сезонов, применён метод гранулирования с использованием нечёткого резюмирования временного ряда [24, 25].

Нечёткая логика позволяет работать с неточными или неопределёнными данными, оперируя степенями принадлежности к множеству в диапазоне от 0 до 1.

Пусть X – некоторое универсальное множество. Для нечёткого множества A степень принадлежности каждого элемента $x \in X$ этому множеству является действительным числом $\mu_A(x)$, принадлежащим отрезку $[0, 1]$. Функция $\mu_A(x)=0$, если $x \notin A$; $\mu_A(x)=1$, если $x \in A$; $0 < \mu_A(x) < 1$, если x принадлежит множеству A частично.

Функция, описывающая, как элементы универсального множества X относятся к нечёткому множеству A , называется *функцией принадлежности*. В настоящем исследовании использована треугольная функция принадлежности, представленная в виде:

$$\mu_A(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right)\right), \quad a \leq b \leq c.$$

Нечёткая логика позволяет оперировать лингвистическими переменными, значения которых задаются словами естественного языка. В разрабатываемой базе знаний для каждого временного сезона созданы лингвистические переменные: *холодная*, *умеренная* и *тёплая*. Логический вывод (дефазификация) выполняется с использованием метода центра тяжести:

$$y^* = \frac{\sum_i x_i \cdot \mu_A(x_i)}{\sum_i \mu_A(x_i)},$$

где y^* – лингвистическая переменная для соответствующего сезона; $\mu_A(x_i)$ – функция принадлежности нечёткого множества A ; $x_i \in X$ – нечёткие значения, принадлежащие конечному универсальному множеству.

2 Представление и обработка данных

Исходные данные для исследования включали климатические данные: средние ежедневные значения температуры воздуха и количества осадков в Республике Татарстан в период с января 1881 года по октябрь 2024 года¹. Формат записи используемых данных имеет вид:

<i>Station</i>	идентификатор метеорологической станции Всемирной метеорологической организации;
<i>Year</i>	год, в который были обработаны данные;
<i>Month</i>	месяц, в котором были собраны данные, представленный в числовом формате (01-12);
<i>Day</i>	день месяца, в который были собраны данные, в числовом формате (01-31);
<i>TMEAN</i>	среднесуточная температура воздуха, измеряемая в градусах Цельсия;
<i>R</i>	суточная сумма осадков, измеряемая в миллиметрах.

Климатические данные организованы в виде таблицы, где каждая строка соответствует определённому временному интервалу (например, день, месяц), а столбцы содержат

¹ Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Температура и осадки: набор данных. <http://meteo.ru/data/>.

показатели, такие как температура воздуха, количество осадков и др. В ходе обработки данных выполнены: проверка на наличие пропущенных значений, выбросов и «шумов»; нормализация и очистка данных для обеспечения их качества и пригодности для дальнейшего анализа. Для использования нечёткой логики введён дополнительный категориальный признак, отражающий сезонную принадлежность каждой даты (зима, весна, лето, осень). Учёт сезонности позволяет применить метод гранулирования для сжатия набора данных, что способствует снижению его размерности.

3 Гранулирование нечётких временных рядов

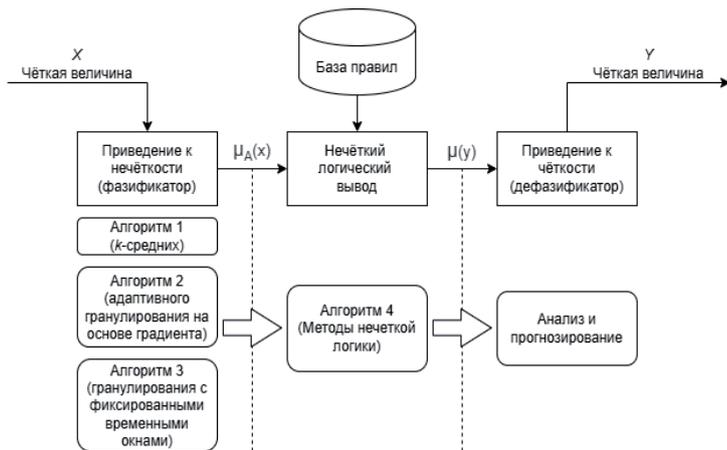
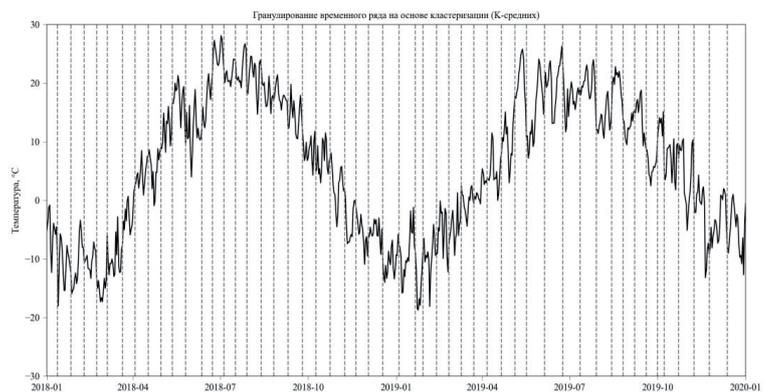


Рисунок 1 – Этапы анализа данных

схожих участков ряда. На рисунке 2 представлена схема работы алгоритма k -средних (2а) и результаты кластеризации температурного временного ряда (2б). Алгоритм зависит от значения k (количество кластеров), которое необходимо указывать для выполнения кластеризации. Средняя сложность алгоритма оценивается как $O(k*n*t)$ где k – заданное количество кластеров, n – количество выборок, t – количество итераций.



а)



б)

Рисунок 2 – Схема алгоритма (а) и результат гранулирования на основе кластеризации с использованием алгоритма k -средних (б) (временной ряд температур с 01.01.2018 по 01.01.2020, границы гранул выделены прерывистыми вертикальными линиями)

При разных значениях k изменяется скорость работы алгоритма, но может происходить и его остановка в точках локальных минимумов. В этом случае все оставшиеся значения будут отнесены к этому кластеру. Кластеры обозначаются c_i , общее количество кластеров – q , длина временного ряда – n , T_i – индекс исходного временного ряда, с которого начинается гранула i .

В качестве старта алгоритма берётся временной ряд $\{x_k\} (k=1, \dots, n)$ и определяются: границы гранул ($\forall i = 1, \dots, q, T_i = [T_i^L, T_i^R]$, где: T_i^L (индекс левой границы) – начальная точка гранулы, T_i^R (индекс правой границы) – конечная точка гранулы (условия: $T_i^L \leq T_i^R$ и $T_i^L, T_i^R \in \{1, \dots, n\}$); гранулы: $\Omega_i = \{x_k | k = T_i^L, \dots, T_i^R\}$).

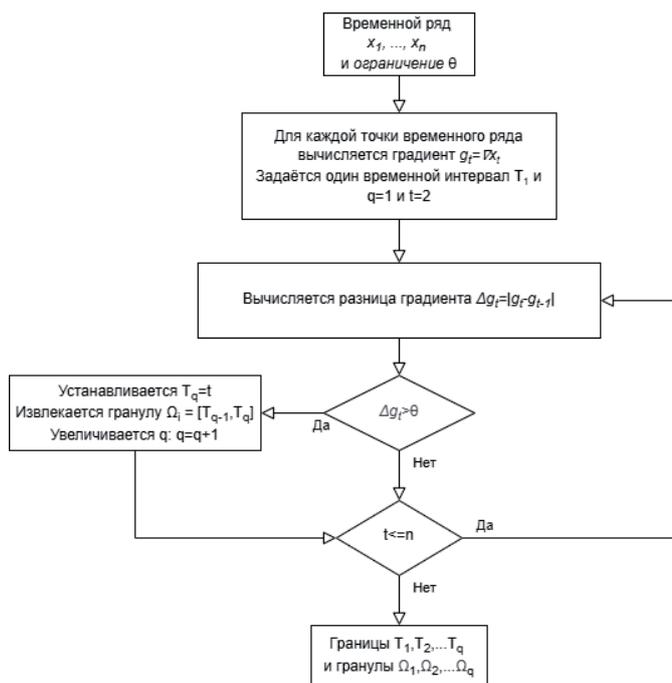


Рисунок 3 – Алгоритм адаптивного гранулирования на основе градиента

Алгоритм 2. Алгоритм адаптивного гранулирования на основе градиента (см. рисунок 3).

В ходе работы алгоритма доопределяются переменные, отвечающие за вычисление градиента по временным промежуткам – g_t . За основной критерий берётся разница данных градиентов Δg_t , которая оценивается относительно заранее установленного ограничения θ . Параметром, отвечающим за накопление количества временных интервалов, соответствующих количеству гранул является переменная q . Для прохода по всем временным интервалам используется переменная t , отражающая начальное количество временных интервалов. Алгоритм отличается простотой реализации и низкими вычислительными затратами на этапе инициализации. Недостатками являются самостоятельное определение порогового значения для

производной, что может повлиять на результат гранулирования, а также сложность вычислений. Результат обработки данных этим алгоритмом представлен на рисунке 4.

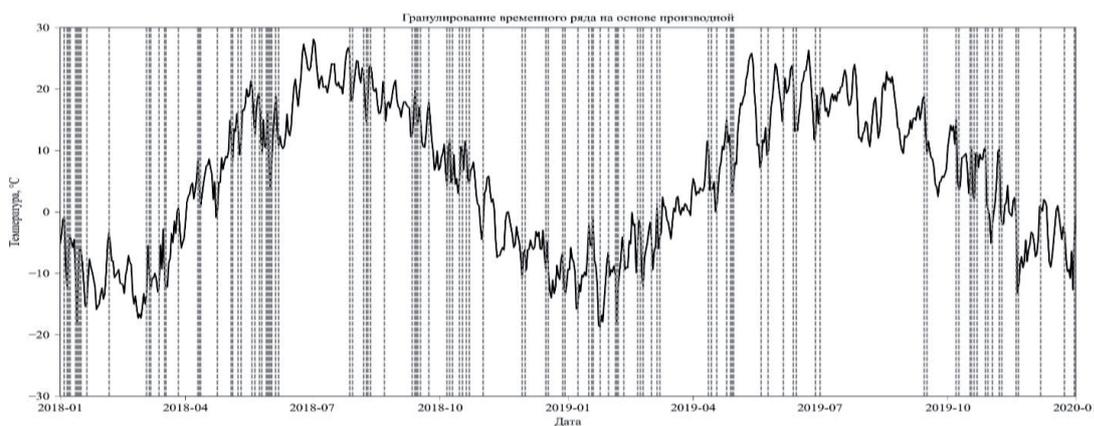


Рисунок 4 – Гранулирование временного ряда на основе градиента (границы гранул выделены прерывистыми вертикальными линиями)

Алгоритм 3. Алгоритм гранулирования с фиксированными временными окнами (рисунок 5). Он отражает выделение подпоследовательностей исходного возрастающего временного ряда в виде отдельных кластеров, содержащих основную информацию. Подобно первому алгоритму берутся границы T_i . Итерации для временного ряда происходят по $t \in N$, границы сдвигаются на $q \in N$ для сохранения порядка следования. Метод устойчив и может работать на временных рядах большого объёма. Результаты представлены на рисунке 6.

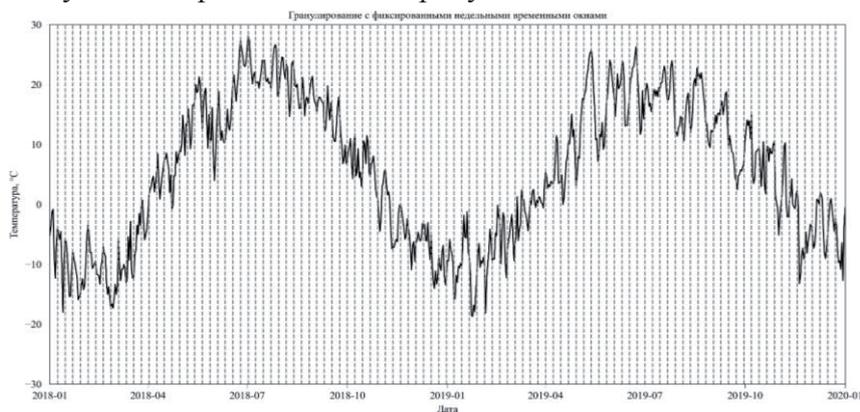


Рисунок 6 – Гранулирование с фиксированными недельными временными окнами

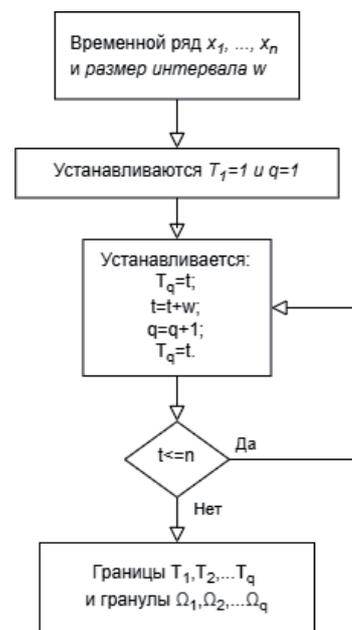


Рисунок 5 – Алгоритм гранулирования с фиксированными временными окнами

Алгоритмы 1-3 позволяют преобразовать временной ряд ежедневных температур в последовательность гранул, представляющих собой массив среднесуточных температур в течение одной недели (Ω_i). Граница T_i определяет индекс исходного временного ряда, с которого начинается гранула i . Затем каждая гранула проходит процесс фаззификации для дальнейшего её использования в формировании правил.

Алгоритм 4. Алгоритм фаззификации гранул с использованием методов нечёткой логики. Алгоритм (рисунок 7) позволяет привести чёткие численные значения к нечётким гранулам, выраженным на естественном языке [26]. Были созданы 12 лингвистических переменных, отражающих сезонные статистики S для каждого временного сезона, например, для сезона *зима* созданы лингвистические переменные: «холодная», «умеренная» и «тёплая».

В исследовании реализован гибридный алгоритм фаззификации сочетающий треугольные функции принадлежности для температурных данных (программная библиотека *scikit-fuzzy*²) и гауссовы функции для сезонных параметров. Алгоритм обработки температурных временных рядов включает следующие этапы:

- 1) ввод и предобработка данных: На вход подаётся гранула - массив из семи температурных значений (недельный временной ряд); Данные нормализуются в диапазон температур, соответствующий лингвистическим переменным.
- 2) фаззификация: для температурных значений вычисляются степени принадлежности к 12 нечётким множествам: три температурных терма («холодная», «умеренная», «тёплая») с треугольными функциями принадлежности и четыре сезонных терма «зима», «весна», «лето», «осень» (с использованием гауссовых функций принадлежности);
- 3) агрегирование: для каждого из 12 множеств вычисляется средняя степень принадлежности по всем семи точкам гранулы;
- 4) логический вывод (дефаззификация): формируется итоговый вектор F признаков гранулы. Вектор используется для активации правил из таблицы 2.

² *Fuzzy logic toolkit for SciPy*. DOI 10.5281/zenodo.802396. – <https://github.com/scikit-fuzzy/scikit-fuzzy?tab=readme-ov-file>.

Результатом работы *Алгоритма 4* является вектор $F = [f_1, f_2, \dots, f_{12}]$, где каждый элемент f_i представляет собой среднюю степень принадлежности гранулы к соответствующему лингвистическому терму (например, f_1 - «холодная зима», f_2 - «умеренная зима», f_3 - «тёплая зима», f_4 - «холодная весна» и т.д. по порядку сезонов и температурных термов). Этот вектор F является формализованным признаковым описанием гранулы, количественно отражающим её неопределённость и недельную изменчивость. Он непосредственно используется для активации продукционных правил из таблицы 2 в процессе нечёткого вывода.

Предложенный подход к гранулированию, основанный на методах нечёткой логики (*Алгоритм 4*), обеспечил сжатие данных – объём выборки сократился с 52 534 до 7 504 точек (коэффициент сжатия $\approx 85\%$). Это реализовано путём вычисления для каждой недельной гранулы вектора F из 12 признаков. Таким образом, вектор F формализует нечёткие характеристики исходного недельного интервала, включая неопределённость (значения признаков в $[0,1]$) и изменчивость (различное распределение признаков у разных гранул).

4 Пример моделирования биоклиматического потенциала

Для проверки работоспособности предложенных подходов разработан прототип СППР для моделирования биоклиматического потенциала (БКП) экспертами предметной области. Фрагмент анализа БКП представлен на рисунке 8. В таблице 2 представлен фрагмент структуры базы знаний, которая включает набор продукционных правил, условий логического вывода и адаптивные интервалы для функций принадлежности, которые можно изменять в зависимости от региона и климата.

Функции принадлежности для сезонных параметров заданы в виде гауссовских кривых, определяемых параметрами среднего значения (среднее) и стандартного отклонения (σ). Поскольку данные функции асимптотически стремятся к нулю, дополнительно вводятся ограниченные интервалы, в пределах которых рассматривается их ненулевая часть.

Сезоны представлены в виде числовых значений: «Зима» – 0, «Весна» – 1, «Лето» – 2, «Осень» – 3 и формализованы через полуинтервал $[0, 4)$, где: $[0,1)$ соответствует зиме, $[1,2)$ - весне, $[2,3)$ - лету, $[3,4)$ - осени. Такое представление обеспечивает математическую корректность работы непрерывных функций принадлежности при переходе между сезонами, исключая неоднозначности на границах годового цикла.

В реализованном прототипе СППР применён алгоритм нечёткого вывода на основе заданных параметров модели (сезон и температура) в соответствии с *Алгоритмом 4* (фаззификация \rightarrow агрегирование \rightarrow дефаззификация) и последующим логическим выводом на основе продукционных правил.

Пример правила R_4 (в таблице 2)

Условие: температура: $[5, 25]$ (гауссова функция, среднее = 10, $\sigma = 5$) – «умеренная»); сезон: $[2.5, 3.5]$ (гауссова функция среднее = 3, $\sigma = 0.5$) – «осень»).

Вывод: «БКП средний».

Логика: Умеренная температура в осенний сезон чаще даёт «средний БКП».



Рисунок 7 – Алгоритм гранулирования на основе нечёткого представления

Таблица 2 – Фрагмент базы правил моделирования биоклиматического потенциала (БКП)

Правило	Условие	Вывод	Интервалы и функции принадлежности
1	Если температура холодная И сезон зима	БКП низкий	Температура: [-10, 10] (гауссова функция, среднее = -5, $\sigma = 5$) Сезон: [0, 1] (гауссова функция, среднее = 0, $\sigma = 0.5$)
2	Если температура умеренная И сезон весна	БКП средний	Температура: [5, 25] (гауссова функция, среднее = 10, $\sigma = 5$) Сезон: [0.5, 1.5] (гауссова функция, среднее = 1, $\sigma = 0.5$)
3	Если температура тёплая И сезон лето	БКП высокий	Температура: [20, 40] (гауссова функция, среднее = 25, $\sigma = 5$) Сезон: [1.5, 2.5] (гауссова функция, среднее = 2, $\sigma = 0.5$)
4	Если температура умеренная И сезон осень	БКП средний	Температура: [5, 25] (гауссова функция, среднее = 10, $\sigma = 5$) Сезон: [2.5, 3.5] (гауссова функция, среднее = 3, $\sigma = 0.5$)
5	Если температура холодная И сезон осень	БКП низкий	Температура: [-10, 10] (гауссова функция, среднее = -5, $\sigma = 5$) Сезон: [2.5, 3.5] (гауссова функция, среднее = 3, $\sigma = 0.5$)

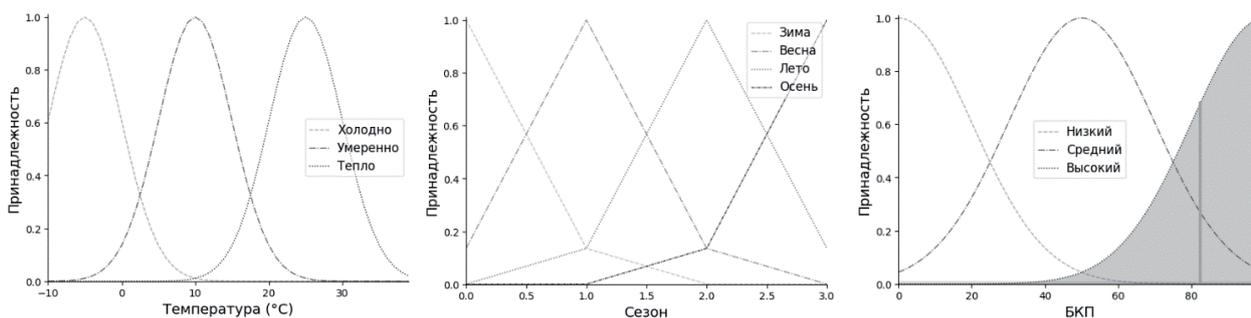


Рисунок 8 – Фрагмент анализа биоклиматического потенциала

Процесс нечёткого вывода БКП (на основе вектора признаков F) включает следующие шаги:

1) **Активация правил:** каждое продукционное правило из таблицы 2 активируется путём выбора соответствующего элемента (или комбинации элементов) из вектора F , который представляет среднюю степень принадлежности гранулы к лингвистическому терму условия правила.

- Пример активации правила R_4 (таблица 2): («Если Температура умеренная И Сезон осень → БКП средний») условие соответствует лингвистическому терму «умеренная осень». В векторе признаков F этот терм представлен отдельным элементом (f_{11} в предположенном порядке термов). Значение этого элемента (средняя степень принадлежности гранулы к терму «умеренная осень») непосредственно определяет степень истинности условия правила R_4 .
- Степень истинности антецедента (условия) правила рассчитывается как значение выбранного элемента вектора F (для правил с одним простым условием). Для правил с оператором «И» между несколькими элементами (см. реализацию ниже) степень истинности вычислялась бы как агрегация (например, \min или произведение) соответствующих элементов F .

2) **Активизация заключений:** полученная для каждого правила степень истинности используется для «обрезки» (или масштабирования) функции принадлежности выходного термина БКП, указанного в заключении этого правила.

3) **Агрегирование выходов:** активизированные выходные термы БКП (результаты всех сработавших правил) объединяются в одно нечёткое множество с помощью операции максимума (\max).

4) **Дефаззификация:** к итоговому агрегированному нечёткому множеству выходной переменной (БКП) применяется метод центра тяжести для получения чёткого числового значения или категории биоклиматического потенциала.

Реализация правил вывода БКП с использованием вектора F (scikit-fuzzy):

В прототипе СППР с использованием библиотеки *scikit-fuzzy* продукционные правила активируются путём проверки значений конкретных элементов вектора F относительно за-

данных порогов активации θ_i . Упрощённый вид реализованных правил соответствует лингвистическим правилам таблицы 2:

- R_1 : Если $F["\text{холодная зима}] > \theta_1$ ТО БКП низкий; // Условие: Холодная Зима
- R_2 : Если $F["\text{умеренная весна}] > \theta_2$ ТО БКП средний; // Условие: Умеренная Весна
- R_3 : Если $F["\text{тёплая лето}] > \theta_3$ ТО БКП высокий; // Условие: Тёплое Лето
- R_4 : Если $F["\text{умеренная осень}] > \theta_4$ ТО БКП средний; // Условие: Умеренная Осень
- R_5 : Если $F["\text{холодная осень}] > \theta_5$ ТО БКП низкий; // Условие: Холодная Осень,

где θ_i - пороговые значения, определяющие минимальную степень принадлежности для активации соответствующего правила (в коде θ_1 - θ_5).

Пример активации правил.

Пусть предполагаемый порядок термов имеет вид в первой грануле с вектором: $F = features[0] = [0.087, 0.534, 0.377, 0.510, 0.489, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.584, 0.415, 0.0]$, где наибольшие значения имеют индексы 1, 3, 4, 9 и 10:

- $F["\text{умеренная зима}]$ (индекс 1) = 0.534
- $F["\text{холодная весна}]$ (индекс 3) = 0.510
- $F["\text{умеренная весна}]$ (индекс 4) = 0.489
- $F["\text{холодная осень}]$ (индекс 9) = 0.584
- $F["\text{умеренная осень}]$ (индекс 10) = 0.415

При порогах, например, $\theta_1=0.5$, $\theta_2=0.4$, $\theta_4=0.4$, $\theta_5=0.5$, активируются правила: R_1 (Умеренная Зима: $0.534 > 0.5$); R_2 (Умеренная Весна: $0.489 > 0.4$); R_4 (Умеренная Осень: $0.415 > 0.4$); R_5 (Холодная Осень: $0.584 > 0.5$).

Итоговый вывод БКП будет определяться степенями истинности активированных правил (R_1 , R_2 , R_4 , R_5) и методом дефаззификации (центра тяжести).

Предлагаемая структура продукционных правил обладает модульной архитектурой, позволяющей адаптировать параметры моделирования к различным климатическим условиям. Адаптация осуществляется путём:

- *корректировки функций принадлежности*: изменение гауссовских (сезон) и треугольных (температура) функций на этапе фаззификации (Алгоритм 4); модификация границ термов БКП;
- *динамической настройки базы правил*: добавление/изменение/удаление продукционных правил; изменение весовых коэффициентов; настройка порогов активации θ_i для элементов вектора F ;
- *регулировки диапазонов входных переменных*.

Заключение

В работе предложен подход к обработке данных метеорологических временных рядов, основанный на методах нечёткой логики. Ключевыми результатами исследования являются:

- *Алгоритм нечёткого гранулирования*. Алгоритм 4 – гибридный алгоритм, использующий треугольные функции принадлежности для температурных данных и гауссовы функции для сезонных параметров. Алгоритм преобразует исходные чёткие данные в нечёткие гранулы, представленные 12-мерными векторами признаков F . Эти векторы количественно отражают характерную неопределённость и недельную изменчивость исходных температурных колебаний.
- *Сжатие данных*. Применение алгоритма гранулирования позволило сократить объём исходных данных с 52 534 до 7 504 точек (коэффициент сжатия $\approx 85\%$) при сохранении ключевых статистических характеристик и семантического содержания данных, воплощённого в векторах F .
- *СППР для моделирования БКП*. СППР использует формализованные гранулы (векторы F) для активации набора адаптивных продукционных правил нечёткого вывода, реализующих экспертные знания о взаимосвязи температуры, сезона и БКП. Модульная

архитектура СППР может позволить настраивать функции принадлежности, пороги активации правил и саму базу правил под различные климатические условия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhao J., Guo Z.H., Su Z.Y., Zhao Z.Y., Xiao X., Liu F.** An improved multi-step forecasting model based on WRF ensembles and creative fuzzy systems for wind speed. *Applied Energy*. 2016. 162. P.808-826. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2015.10.145.
- [2] **Kavousi-Fard A., Khosravi A., Nahavandi S.** A New Fuzzy-Based Combined Prediction Interval for Wind Power Forecasting. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016. V.31. №1. P.18–26. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2393880.
- [3] **Wen J., Yang J., Jiang B., Song H., Wang H.** Big Data Driven Marine Environment Information Forecasting: A Time Series Prediction Network. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021. V.29. №1. P.4-18. DOI: 10.1109/TFUZZ.2020.3012393.
- [4] **Domanska D., Wojtylak M.** Application of fuzzy time series models for forecasting pollution concentrations. *Expert Systems with Applications*. 2012. V. 39. № 9. P.7673-7679. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.023.
- [5] **Kumar S., Gangwar S.** Intuitionistic Fuzzy Time Series: An Approach for Handling Nondeterminism in Time Series Forecasting. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2016. V.24. №6. P.1270-1281. DOI: 10.1109/TFUZZ.2015.2507582.
- [6] **Чечнев В.Б.** Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.607-624. DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.
- [7] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Фаворская Е.А., Осипова Е.А.** Подход к оценке технического состояния электрооборудования с использованием взвешенных нечётких правил. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, № 1(51). С.134-144. DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [8] **Бисочков Р.М., Суханова С.Ф.** Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур методами нечёткой логики. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2023. №1(65). С.119-125. DOI 10.31563/1684-7628-2023-65-1-119-126.
- [9] **Архипов М.В., Ермаков Р.Н.** Оценка рисков снижения полевой всхожести при посеве зерновых культур с учетом степени кондиционности семенного материала на основе моделей нечёткой логики. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. № 39. С.68-70.
- [10] **Taylan O., Alamoudi R., Kabli M., Aljifri A., Ramzi F., Herrera-Viedma E.** Assessment of Energy Systems Using Extended Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR, and TOPSIS Approaches to Manage Non-Cooperative Opinions. *Sustainability*. 2020. V.12. №7. P.2745. DOI: 10.3390/su12072745.
- [11] **Shanchao Y., Jing L.** Time-Series Forecasting Based on High-Order Fuzzy Cognitive Maps and Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018. V.26. №6. P. 3391-3402. DOI: 10.1109/TFUZZ.2018.2831640.
- [12] **Khosravi A., Nahavandi S.** Load Forecasting Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Optimal Type Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. V.10. №2. P.1055-1063. DOI: 10.1109/TII.2013.2285650.
- [13] **Rahman N.H.A., Muhammad H., Suhartono, Mohd Talib.** Artificial neural networks and fuzzy time series forecasting: an application to air quality. *Quality & Quantity*. 2015. V.49. №6. P.2633-2647. DOI: 10.1007/s11135-014-0132-6.
- [14] **Sulandari W., Subanar, Lee M.H., Rodrigues P.C.** Indonesian electricity load forecasting using singular spectrum analysis, fuzzy systems and neural networks. *Energy*. 2020. V.190. P.116408. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116408.
- [15] **Herbst G., Bocklisch S.F.** Online Recognition of fuzzy time series patterns. 2009 *International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.974-979.
- [16] **Giove S.** Fuzzy logic and Clustering methods for time series analysis. 2009 *International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.1-7.
- [17] **Graves D., Pedrycz W.** Multivariate Segmentation of Time Series with Differential Evolution. 2009 *International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.1108-1113.
- [18] **Kacprzyk J., Wilbik A.** Using Fuzzy Linguistic summaries for the comparison of time series. 2009 *International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.1321-1326.

- [19] **Jingjing F., Qingfei Z., Zhonglin Z.** A Method of Mining the Meta-association Rules for Dynamic Association Rule Based on the Model of AR-Markov, *2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, Wuhan, China, 2010. P.210-214, DOI: 10.1109/NSWCTC.2010.248.
- [20] **Wu F., Li Y., Yu F.** Fuzzy Granulation Based Forecasting of Time Series. In *Fuzzy Information and Engineering 2010. Advances in Intelligent and Soft Computing*, Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. V.78. P.511-520. DOI: 10.1007/978-3-642-14880-4_56.
- [21] **Guo H., Wang L., Liu X., Pedrycz W.** Information Granulation-Based Fuzzy Clustering of Time Series. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2021. V.51. №12. P. 6253-6261. DOI: 10.1109/TCYB.2020.2970455.
- [22] **Abonyi J., Feil B., Nemeth S., Arva P.** Fuzzy clustering based segmentation of time-series. In *Advances in Intelligent Data Analysis V: 5th International Symposium on Intelligent Data Analysis, IDA 2003, Berlin, Germany, August 28-30, 2003. Proceedings 5*. P.275-285. DOI: 10.1007/978-3-540-45231-7_26.
- [23] **Hannah M.E., Geetha T.V., Mukherjee S.** Automatic Extractive Text Summarization Based on Fuzzy Logic: A Sentence Oriented Approach. In *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing. SEMCCO 2011. Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India, December 19-21, 2011, Proceedings, Part I 2* P.530-538. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-27172-4_63.
- [24] **Бурнашев Р.А., Байбикова Д.Ф., Крылов М.А., Сергеев Я.В., Ибрагимов Р.М.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025617003. Программа экспертного анализа климатических и экономических взаимосвязей. Заявка №2025614348. Дата поступления 5 марта 2025 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2025 г.
- [25] **Бурнашев Р.А., Назипова А.Ф.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025618157. Программа для анализа и гранулирования нечётких временных рядов. Заявка №2025615912. Дата поступления 18 марта 2025 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 апреля 2025 г.
- [26] **Burnashev R.A., Bagymanov R.M., Enikeeva A.I., Farahov R.R., Bolsunovskaya M.V.** Designing a Medical Fuzzy Expert System Using the JFuzzyLogic Library. *IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russian Federation. 2024. P.2330-2333. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615193.

Сведения об авторах



Бурнашев Рустам Арифович (1989 г. рождения). Окончил КФУ (2019). К.т.н. (2020). Доцент кафедры анализа данных и технологий программирования Института вычислительной математики информационных технологий КФУ. В списке научных трудов более 55 научных работ в области систем поддержки принятия решения, анализа данных, медицинских информационных систем. Author ID (РИНЦ): 955990; Author ID (Scopus): 57200246615; ORCID: 0000-0002-1057-0328. r.burnashev@inbox.ru ✉.



Сергеев Ярослав Владиславович (2001 г. рождения). Магистрант Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, направление «Прикладная математика и информатика». ORCID: 0009-0009-3370-1464. sergeevyarik7@yandex.ru.



Назипова Алиса Фанисовна (2000 г. рождения). Магистрант Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, направление «Прикладная математика и информатика». ORCID: 0009-0001-0560-1425. alisa.nazipova@yandex.ru.

Поступила в редакцию 17.03.2025, после рецензирования 03.07.2025. Принята к публикации 10.07.2025.



Fuzzy time series granulation methods for data analysis

© 2025, R.A. Burnashev ✉, Y.V. Sergeev, A.F. Nazipova

Kazan (Volga region) Federal University,
Institute of Computational Mathematics and Information Technology, Kazan, Russia

Abstract

The growing dimensionality of data, driven by the multitude of heterogeneous time series, requires the development of efficient methods for their processing and compression. This article presents an approach to data compression where the data are represented as time series, using granulation with fuzzy logic methods. The study analyzes average daily temperature data in the Republic of Tatarstan collected from 1881 to 2024. Data granulation enabled a significant compression of the data volume. Fuzzy summarization was applied to transform the original numerical data into information granules, facilitating the automatic generation of granular descriptions of time series behavioral patterns. The summarization of time series states was carried out using fuzzy logic methods, including a rule set, membership functions for each season, interval-based linguistic variables, and a defuzzification software module. The implementation of the proposed approach demonstrated a reduction in data volume from 52,534 to 7,504 points, achieving a compression ratio of approximately 85%. The developed methods are applicable for analyzing large datasets across various domains.

Keywords: data analysis, fuzzy logic, knowledge base, fuzzy summarization, granulation, time series.

For citation: Burnashev RA, Sergeev YV, Nazipova AF. Fuzzy time series granulation methods for data analysis [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 404-417. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-404-417.

Financial Support: This paper is performed as part of the grant of the Tatarstan Academy of Sciences, provided to young candidates of sciences (postdoctoral fellows) for the purpose of defending their doctoral dissertation, conducting research, as well as performing their work duties in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan" (Agreement No.04/2024-PD).

Authors' contributions: Burnashev R.A. – article concept and algorithms development; Sergeev Y.V. – mathematical model construction, fuzzy rules testing; Nazipova A.F. – meteorological data analysis and processing, time series granulation, results visualization.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Stages of data analysis

Figure 2 – Algorithm flowchart (a) and the result of granulation based on clustering using the k-means algorithm (b) (temperature time series from 01.01.2018 to 01.01.2020, with granule boundaries marked by dashed vertical lines)

Figure 3 – Adaptive gradient-based granulation algorithm

Figure 4 – Gradient-based time series granulation (granule boundaries marked by dashed vertical lines)

Figure 5 – Granulation algorithm with fixed time windows

Figure 6 – Granulation with fixed weekly time windows

Figure 7 – Granulation algorithm based on fuzzy representation

Figure 8 – Fragment of bioclimatic potential analysis

Table 1 – Operations in data granulation

Table 2 – Fragment of the rule base for modeling bioclimatic potential

References

- [1] **Zhao J, Guo ZH, Su ZY, Zhao ZY, Xiao X, Liu F.** An improved multi-step forecasting model based on WRF ensembles and creative fuzzy systems for wind speed. *Applied Energy*, 2016; 162: 808-826. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2015.10.145.
- [2] **Kavousi-Fard A., Khosravi A., Nahavandi S.** A New Fuzzy-Based Combined Prediction Interval for Wind Power Forecasting. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016; 31(1): 18–26. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2393880.
- [3] **Wen J, Yang J, Jiang B, Song H, Wang H.** Big Data Driven Marine Environment Information Forecasting: A Time Series Prediction Network. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021; 29(1): 4-18. DOI: 10.1109/TFUZZ.2020.3012393.
- [4] **Domanska D, Wojtylak M.** Application of fuzzy time series models for forecasting pollution concentrations. *Expert Syst. Appl.* 39, 7673-7679. 2012. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.023.
- [5] **Kumar S, Gangwar S.** Intuitionistic Fuzzy Time Series: An Approach for Handling Nondeterminism in Time Series Forecasting. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2016; 24(6): 1270-1281. DOI: 10.1109/TFUZZ.2015.2507582.
- [6] **Chechnev VB.** Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(4): 607-624. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.
- [7] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS, Favorovskaya EA, Osipova EA.** An approach to assessing the technical condition of electrical equipment using weighted fuzzy rules [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(1): 134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [8] **Bischokov RM, Sukhanova SF.** Forecasting crop yields using fuzzy logic methods [In Russian]. *Bulletin of Bashkir State Agrarian University*. 2023; 1(65): 119-125. DOI: 10.31563/1684-7628-2023-65-1-119-126.
- [9] **Arkhipov MV, Ermakov RN.** Risk assessment of reducing field germination when sowing grain crops taking into account the quality of seed material based on fuzzy logic models [In Russian]. *News of St. Petersburg State Agrarian University*. 2015; 39: 68-70.
- [10] **Taylan O, Alamoudi R, Kabli M, AlJifri A, Ramzi F, Herrera-Viedma E.** Assessment of Energy Systems Using Extended Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR, and TOPSIS Approaches to Manage Non-Cooperative Opinions. *Sustainability*. 2020; 12(7): 2745. DOI: 10.3390/su12072745.
- [11] **Shanchao Y, Jing L.** Time-Series Forecasting Based on High-Order Fuzzy Cognitive Maps and Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018; 26(6): 3391-3402. DOI: 10.1109/TFUZZ.2018.2831640.
- [12] **Khosravi A, Nahavandi S.** Load Forecasting Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Optimal Type Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014; 10(2): 1055-1063. DOI: 10.1109/TII.2013.2285650.
- [13] **Rahman NHA, Muhammad H, Suhartono, Mohd Talib.** Artificial neural networks and fuzzy time series forecasting: an application to air quality. *Quality & Quantity*. 2015; 49(6): 2633-2647. DOI: 10.1007/s11135-014-0132-6.
- [14] **Sulandari W, Subanar, Lee MH, Rodrigues PC.** Indonesian electricity load forecasting using singular spectrum analysis, fuzzy systems and neural networks. *Energy*. 2020; 190: 116408. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116408.
- [15] **Herbst G, Bocklish SF.** Online Recognition of fuzzy time series patterns. *2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.974-979.
- [16] **Giove S.** Fuzzy logic and Clustering methods for time series analysis. *2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.1-7.
- [17] **Graves D, Pedrycz W.** Multivariate Segmentation of Time Series with Differential Evolution. *2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.1108-1113.
- [18] **Kacprzyk J, Wilbik A.** Using Fuzzy Linguistic summaries for the comparison of time series. *2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference (IFSA-EUSFLAT 2009)*. 2009. P.1321-1326.
- [19] **Jingjing F., Qingfei Z., Zhonglin Z.** A Method of Mining the Meta-association Rules for Dynamic Association Rule Based on the Model of AR-Markov, *2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, Wuhan, China. 2010. P.210-214. DOI: 10.1109/NSWCTC.2010.248.
- [20] **Wu F, Li Y, Yu F.** Fuzzy Granulation Based Forecasting of Time Series. In *Fuzzy Information and Engineering 2010. Advances in Intelligent and Soft Computing*, V.78. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. P.511-520. DOI: 10.1007/978-3-642-14880-4_56.
- [21] **Guo H, Wang L, Liu X, Pedrycz W.** Information Granulation-Based Fuzzy Clustering of Time Series. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2021. V.51. №12. P. 6253-6261. DOI: 10.1109/TCYB.2020.2970455.

- [22] **Abonyi J, Feil B, Nemeth S, Arva P.** Fuzzy clustering based segmentation of time-series. In *Advances in Intelligent Data Analysis V: 5th International Symposium on Intelligent Data Analysis, IDA 2003, Berlin, Germany, August 28-30, 2003. Proceedings 5*. P.275-285. DOI: 10.1007/978-3-540-45231-7_26.
- [23] **Hannah ME, Geetha TV, Mukherjee S.** Automatic Extractive Text Summarization Based on Fuzzy Logic: A Sentence Oriented Approach. In *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing. SEMCCO 2011. Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India, December 19-21, 2011, Proceedings, Part I 2* (p.530-538). Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-27172-4_63.
- [24] **Burnashev RA, Baibikova DF, Krylov MA, Sergeev YaV, Ibragimov RM.** Certificate of state registration of computer program No.2025617003. Program for expert analysis of climate and economic relationships [In Russian]. Application No.2025614348. Received March 5, 2025. Registered in the Computer Programs Register March 21, 2025.
- [25] **Burnashev RA, Nazipova AF.** Certificate of state registration of computer program No.2025618157. Program for analysis and granulation of fuzzy time series [In Russian]. Application No.2025615912. Received March 18, 2025. Registered in the Computer Programs Register April 2, 2025.
- [26] **Burnashev RA, Bagymanov RM, Enikeeva AI, Farahov RR, Bolsunovskaya MV.** Designing a Medical Fuzzy Expert System Using the JFuzzyLogic Library. *IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russian Federation. 2024. P.2330-2333. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615193.
-

About the authors

Rustam Arifovich Burnashev (b. 1989) graduated from Kazan Federal University (2019), PhD (2020). He is an associate professor of the Department of data analysis and programming technologies of Institute of computational mathematics and information technologies at Kazan Federal University. The list of scientific papers includes more than 55 scientific papers in the field of decision support systems, data analysis, and medical information systems. Author ID (РИНЦ): 955990; Author ID (Scopus): 57200246615; ORCID: 0000-0002-1057-0328. r.burnashev@inbox.ru ✉.

Yaroslav Vladislavovich Sergeev (b. 2001) is a first-year master's student at the Institute of Computational Mathematics and Information Technologies at Kazan Federal University in the field of Applied Mathematics and Informatics. ORCID: 0009-0009-3370-1464. sergeevyarik7@yandex.ru.

Alisa Fanisovna Nazipova (b. 2000) is a second-year master's student at the Institute of Computational Mathematics and Information Technologies at Kazan Federal University in the field of Applied Mathematics and Informatics. ORCID: 0009-0001-0560-1425. alisa.nazipova@yandex.ru.

Received March 17, 2025. Revised July 3, 2025. Accepted July 10, 2025.



Мультиагентный метод повышения адаптивности управления вычислительными ресурсами в реальном времени

© 2025, Ф.М. Кирьяков¹✉, П.О. Скобелев^{1,2}

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ), Самара, Россия

² Самарский федеральный исследовательский центр РАН (СамНЦ РАН), Самара, Россия

Аннотация

Работа посвящена развитию мультиагентного метода для удовлетворения растущей потребности в вычислительных ресурсах за счёт повышения адаптивности и эффективности управления в реальном времени. На практике требуется иметь возможность оперативной и гибкой индивидуально-точечной адаптивной корректировки составленного расписания исполнения задач, чтобы обеспечить более высокую эффективность использования ресурсов. Рассматриваемый мультиагентный метод управления вычислительными ресурсами основан на ранее предложенной модели сети потребностей и возможностей, обеспечивающей скользящее адаптивное изменение расписания. Последовательность пошаговых атомарных модификаций в расписании ресурсов включает сдвиги задач на одном вычислительном ресурсе или вытеснение и перераспределение задач между ресурсами. Агент задачи рассчитывает оптимальный «патч» для глобальной эффективности системы, учитывая функции удовлетворённости всех затрагиваемых задач. Новым является механизм коллективного принятия решений через расчёт и согласование «патчей», обеспечивающий динамическую оптимизацию расписания без необходимости его полного перепланирования или переход к полностью распределённому решению, исключающему общую сцену данных мира агентов. Экспериментальное сравнение показало, что предложенный метод повышает эффективность системы на 25-30% по сравнению с неадаптивным управлением, не обладающим возможностью частичного пересмотра связей между агентами, сдвига и перераспределения задач по ресурсам. Разработанный метод позволяет повысить масштабируемость и отказоустойчивость систем, расширить его практическое применение для широкого круга задач динамического распределения ресурсов в вычислительных, производственных и логистических системах.

Ключевые слова: мультиагентные системы, управление ресурсами, адаптивное планирование, оптимизация расписания, отказоустойчивость, системы реального времени.

Цитирование: Кирьяков Ф.М., Скобелев П.О. Мультиагентный метод повышения адаптивности и эффективности управления вычислительными ресурсами в реальном времени. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.418-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.

Вклад авторов: Скобелев П.О. – постановка задачи и выработка подхода к разработке и исследованию, анализ результатов. Кирьяков Ф.М. – формализация задачи, разработка онтологической модели вычислительной сети и мультиагентного метода, примеры.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Эффективное управление ресурсами (транспортные средства, производственные линии или вычислительные мощности и др.) остаётся ключевой проблемой для систем, где ограниченные ресурсы должны распределяться между конкурирующими задачами. Эта проблема решается в основном методами комбинаторного или эвристического планирования и оптимизации, основанными на пакетной обработке, где задачи и ресурсы известны заранее, а расписание строится без возможности последующей корректировки [1, 2]. Такой подход хорошо работает в предсказуемых и неизменных условиях – например, при планировании производ-

ственных циклов с фиксированными заказами или в вычислительных системах (ВС) с определённой нагрузкой.

В процессе роста сложности и динамики таких систем централизованные методы и алгоритмы управления стали встречать серьёзные трудности:

- с увеличением размерности решаемых задач традиционные методы оказываются малоприменимыми из-за комбинаторного роста числа вариантов и резкого увеличения объёма вычислений;
- требуется всё чаще учитывать не только интересы центра, но и отдельных узлов ВС, а также индивидуальные особенности поступающих задач;
- высокая неопределённость и динамика бизнес-процессов приближают их к границе «хаоса», а принятые ранее решения в любой момент могут изменяться;
- жёсткая привязка ресурсов к единому диспетчеру не обеспечивает необходимой масштабируемости и отказоустойчивости – ключевых требований для современных вычислительных и производственных сред.

Для преодоления этих трудностей в ВС в настоящей работе предложен метод, который обеспечивает возможность непрерывной квазиоптимизации временных параметров распределения задач между вычислительными ресурсами (ВР) в реальном времени. В этих целях разработаны модели и методы адаптивных пакетов изменений (патч, от англ. *patch*) для последовательных атомарных модификаций расписания, позволяющие точно сдвигать задачи без их полной отмены, минимизировать потери при перепланировании и поддерживать актуальное состояние системы в реальном времени.

1 Обзор существующих решений

Недостатки централизованных ВС обусловили потребность в разработке распределённых и самоорганизующихся систем, управляемых коллективом автономных роботов, программных агентов, способных принимать согласованные локальные решения, находясь в коммуникации с другими агентами ВС [3, 4]. Такие ВС показывают превосходство в производительности, позволяя принимать решения в реальном времени [5], и обладают более высокой отказоустойчивостью [6].

Рассматриваемое направление получило развитие в Самарской школе мультиагентных (МА) систем [7]. На основе МА моделей сети потребностей и возможностей (ПВ-сетей) и метода компенсаций при взаимных уступках агентов сформулирована концепция эмерджентного интеллекта – коллективного искусственного интеллекта (ИИ), возникающего в открытых самоорганизующихся системах с использованием онтологий и МА технологий. Решение сложной задачи при таком подходе строится как процесс самоорганизации программных агентов с конфликтными интересами, которые выявляют и разрешают конфликты в ходе непрерывной конкуренции и кооперации на виртуальном рынке ВС. Разрешение конфликтов осуществляется за счёт переговоров агентов, сопровождающихся взаимными уступками, регулируемые индивидуальными функциями удовлетворённости, и бонусов-штрафов агентов до достижения состояния консенсуса, отражающего «конкурентное равновесие» агентов (когда ни один из агентов не может улучшить своё состояние). Разработанный подход показал свою эффективность при решении ряда задач управления ресурсами в транспорте, промышленном производстве, цепочках поставок и других применениях [8].

Задача эффективного управления ВР стала особенно актуальной в связи с растущей сложностью решаемых задач, развитием суперкомпьютеров, методов и средств ИИ. В [9] предложена модель суперкомпьютерного кластера, развивающая методы систем массового обслуживания для повышения эффективности вычислений. В этой области разработан и применяется ряд решений на основе МА технологий. В [10] заложена теоретическая основа и проведён ряд исследований децентрализованного управления самоорганизующимися ВС. Однако предложенные в ней модели и методы имеют ограничение, связанное с невозможностью обеспечить максимальную адаптивность в реальном времени.

Известны решения, нацеленные на оптимизацию расписания в реальном времени. В [11] описан алгоритм оптимизации расписания задач *NDFS (Nearest Deadline First Scheduled)*, исходя из заданного срока их выполнения с учётом их приоритетов. В [12] эта модель дополнена динамическим ранжированием ресурсов и резервным копированием задач на следующий по рангу ресурс, что повышает устойчивость системы к внештатному выходу ресурса из строя. В [13] описан подход к оптимизации расписания *FCFS-LRH (First Come First Served – Left-Right Hole)*, нацеленный на минимизацию незаполненных промежутков в расписании.

Примеры решения задач динамического планирования в вычислительных средах приведены в [14-19], варианты применения МА систем для управления ресурсами и их расписаниями – в [20]. Большинство описанных в этих работах алгоритмов опирается лишь на общий приоритет задач и на временное окно, когда бронирование ресурса для задачи имеет смысл, и рассматривается только наиболее позднее возможное планирование задачи. При возникновении локального конфликта происходит полное перепланирование расписания или его участка, что может приводить к излишним и произвольным перестановкам в расписании.

Цель настоящей работы – переработать подход к заданию правил планирования задач и обеспечить более высокую адаптивность.

2 Формализация задачи

2.1 Элементы вычислительной системы и их основные параметры

Моделируемая ВС состоит из двух основных типов сущностей: ресурсов, которые выполняют работу, и задач, которые необходимо выполнить. Эти сущности представляются следующими наборами:

- набор ресурсов $R = \{r_j\}, j = \overline{1, J}$, где J – количество ресурсов;
- набор задач $O = \{o_i\}, i = \overline{1, I}$, где I – количество задач.

Важным условием является то, что в любой момент времени в системе могут происходить непредвиденные события, включая появление новых заказов или отказов в работе ВС, что должно вызывать перераспределение ресурсов и перепланирование работ.

2.2 Описание задач

Каждая задача o_i из набора O характеризуется длительностью выполнения и моделью функции удовлетворённости. Модель функции удовлетворённости s_i представляет собой набор точек $(t, s_i(t))$, где $s_i(t)$ – показатель удовлетворённости задачи в случае её выполнения в момент времени t (см. рисунок 1). Функция удовлетворённости может принимать значения в диапазоне $s_i(t) \in [0,1]$. Временная ось не имеет ограничений. Для удобства восприятия графической информации в данной работе используется упрощённое представление – в секундах, от 0 до 10 включительно.

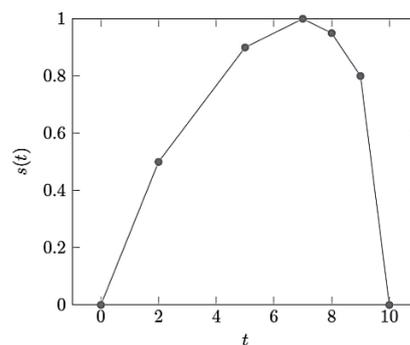


Рисунок 1 – Пример модели функции удовлетворённости

2.3 Постановка задачи

Необходимо для имеющихся групп ресурсов R и задач O максимизировать целевую функцию S , представляющую собой показатель общей удовлетворённости системы (ПОУС),

который включает все задачи и ресурсы: $S = \sum_{i=1}^I s_i(t_i)$, где t_i – время выполнения задачи o_i (в случае, если для задачи o_i не забронирован ресурс, то считать $s_i = 0$).

2.4 Модель функции удовлетворённости

Модель удовлетворённости представлена в виде равнобедренного треугольника. Такая модель позволяет упростить последующий анализ сложных функций, полученных путём комбинации (сложения, вычитания и пр.) множества других исходных моделей и функционально соответствует зависимости уровня удовлетворённости реальных задач от времени их выполнения.

На рисунке 2 показан график, где в качестве примера на общей временной оси представлена задача длительностью 4 секунды (фигура, заполненная сплошной заливкой) и её функция удовлетворённости (фигура, заштрихованная под углом 45 градусов). В данном примере задача находится в оптимальном положении, при котором время её выполнения соответствует наибольшему из возможных значений её функции удовлетворённости.

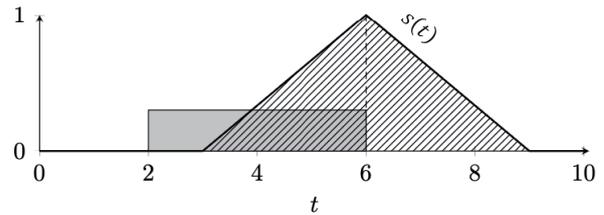


Рисунок 2 – Изображение задачи на графике и её функции удовлетворённости

3 Традиционный подход к решению задачи

3.1 Описание алгоритма

В числе традиционных алгоритмов планирования и оптимизации выполнения задач [1, 2] лежит принцип: «первый пришёл – первый исполнился». Для МА системы такой принцип часто применяется, и в алгоритмы не включается взаимодействие с другими агентами задач – агент нового заказа анализирует расписание на предмет свободных мест и выбирает наиболее подходящее место, согласно собственной функции удовлетворённости так, чтобы не затронуть другие задачи.

Пример 1 – наиболее благоприятный для этого алгоритма, когда задача o_{new} может свободно разместиться и выполниться в момент времени t_{peak} , совпадающий с пиком собственной функции удовлетворённости. На рисунке 3 видно, что свободное пространство, находящееся в диапазоне ненулевого значения функции удовлетворённости, представляет отрезок времени $t \in [2, 7]$ секунд. С учётом длительности выполнения задачи o_{new} возможное время выполнения задачи находится в пределах $t \in [4, 7]$ секунд (рисунок 4). Алгоритм ограничивает функцию удовлетворённости этим промежутком и выбирает наилучшую из возможных позиций для бронирования ресурса. Здесь функция удовлетворённости принимает наибольшее значение в момент времени 5 секунд. Следовательно, агент задачи забронирует ресурс в промежутке времени $t \in [3, 5]$ секунд (рисунок 5).

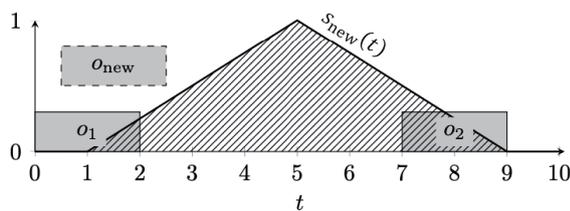


Рисунок 3 – Пример 1, исходная функция удовлетворённости задачи o_{new}

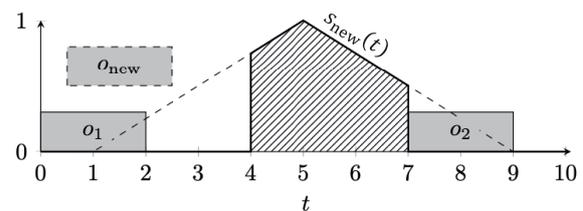


Рисунок 4 – Пример 1, функция удовлетворённости задачи o_{new} после её ограничения

Примере 2 – ограниченная функция удовлетворённости имеет область ненулевых значений $t \in [6, 7]$ секунд (рисунок 6). Функция удовлетворённости принимает максимальное значение в момент времени 6 секунд. Следовательно, агент задачи забронирует промежуток времени $t \in [4, 6]$ секунд (рисунок 7).

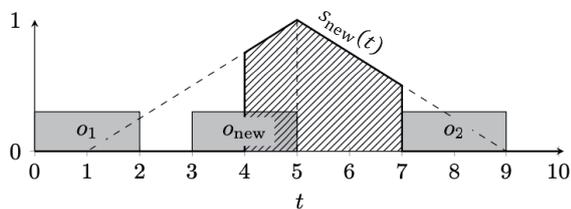


Рисунок 5 – Пример 1, результат размещения задачи o_{new}

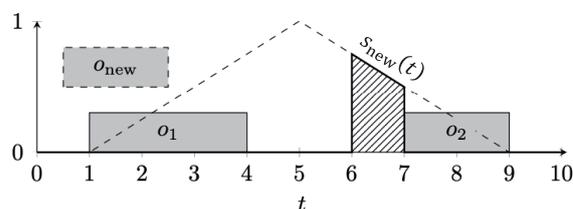


Рисунок 6 – Пример 2, функция удовлетворённости задачи o_{new} после её ограничения

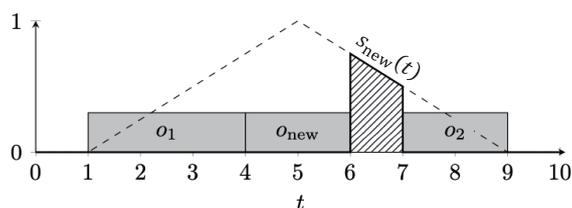


Рисунок 7 – Пример 2, результат размещения задачи o_{new}

3.2 Недостаток традиционного алгоритма

В Примере 3 (рисунок 8) одна из задач (o_1) из последней конфигурации модели смещена вправо на 0.5 секунды. Это изменение в ВС приводит к резкому ухудшению работы алгоритма. На рисунке 8 можно видеть три свободных промежутка времени. Первые два – $t \in [0, 1.5]$ и $t \in [3.5, 5]$ секунд – имеют продолжительность 1.5 секунды и не могут вместить задачу продолжительностью 2 секунды. Последний промежуток времени (в конце расписания) не имеет ограничения длительности, но на нём невозможно расположить задачу o_{new} так, чтобы она выполнялась в момент времени, соответствующий ненулевому значению функции удовлетворённости.

В примере 3 возможно сместить задачи o_1 и o_2 за счёт частичного снижения их показателя удовлетворённости так, чтобы между ними образовалось пространство в 2 секунды. Это позволит вместить новую задачу o_{new} и повысить ПОУС, но для этого нужны переговоры, чтобы учесть индивидуальные особенности каждого участника и его предпочтения.

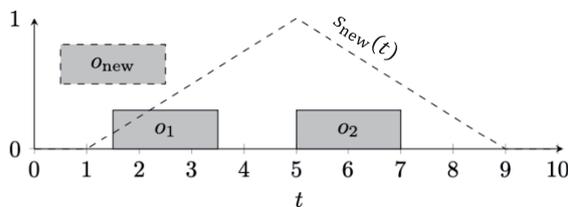


Рисунок 8 – Пример 3, агент задачи o_{new} не может забронировать ресурс

4 Адаптивное формирование расписаний выполнения заданий на вычислительных ресурсах

4.1 Описание предлагаемого метода

Основная задача разрабатываемого метода – сделать процесс распределения ресурса коллективным, с учётом его актуального состояния. Такой алгоритм должен поддерживать возможность смещения задач, уже размещённых в расписании ресурса, и вытеснения и перемещения задач между ресурсами.

Вводятся два дополнительно термина.

- Модификация mod – атомарное изменение существующего расписания: добавление задачи, сдвиг задачи, вытеснение задачи, перераспределение на другой ресурс и т.д. Модификации не носят контекстуальный характер, они являются лишь составляющими конечного плана изменения расписания – патча.
- Патч $patch$ – конечный последовательный набор модификаций. Патч носит контекстуальный характер и всегда относится к конкретному ресурсу, он используется как универсальный пакет передачи информации об изменениях расписания конкретного ресурса как между агентами задач в процессе утверждения патча, так и при отправке утверждённого патча агенту ресурса.

Каждая модификация $mod_{n,m}$ патча $patch_m$ ($n = \overline{1, N_m}$, $m = \overline{1, M}$, N_m – количество модификаций в патче $patch_m$, M – количество патчей) вносит изменение в расположение задачи в расписании и влияет на её показатель удовлетворённости. Изменение показателя удовлетворённости задачи при применении к ней модификации $mod_{m,n}$ составляет $\Delta s_{n,m}$. Изменение ПОУС при применении патча $patch_m$ составляет ΔS_{patch}^m и равно сумме всех изменений показателей удовлетворённости задач, вызванных применением модификаций этого патча $\Delta S_{patch}^m = \sum_{n=1}^{N_m} \Delta s_{n,m}$. Процесс формирования патча состоит из следующих этапов.

- 1) Агент задачи самостоятельно анализирует состояние расписания ресурса и вычисляет наиболее выгодный для системы патч. Здесь «наиболее выгодный» – это такой патч $patch_m$, который имеет наибольшее значение прироста ПОУС ΔS_{patch}^m среди всех доступных патчей.
- 2) Агент задачи передает патч другим агентам задач, затронутых этим патчем. Другие агенты задач могут принять патч или принять решение о смене ресурса и сообщить об этом агенту задачи, передавшему патч. При принятии решения о смене ресурса агент задачи, рассчитавший патч, рассчитывает его заново и сообщает об изменениях другим агентам задач. Этот цикл длится до тех пор, пока все агенты задач, затронутых патчем, не будут удовлетворены актуальным патчем либо сообщат о смене ресурса.
- 3) Агент задачи, рассчитавший патч, передаёт утверждённый патч агенту ресурса.
- 4) Агент ресурса применяет патч, и, в случае успешного применения, уведомляет всех затронутых агентов задач об успешном применении патча. В случае неудачи агент ресурса сообщает агенту задачи причину ошибки применения патча. Ошибки в применении патча могут возникать по различным причинам, например, устаревшая информация о расписании у агента задачи. Агент задачи может либо принять меры по разрешению проблемы, если такая возможность есть, либо перейти к рассмотрению другого ресурса.

4.2 Алгоритм расчёта наиболее выгодного патча

4.2.1 Формализация задачи

В контекст задачи входят:

- ресурс r и его расписание $schedule$;
- набор задач $O = o_i, \overline{1, I}$, уже находящихся в расписании $schedule$, где I – количество задач в расписании;
- задача o_{new} , не находящаяся в расписании $schedule$, которую необходимо разместить.

Новую задачу можно разместить между любыми двумя задачами или по краям расписания. При этом можно сместить любую из размещённых в расписании задач так, чтобы забронированные ими временные участки не пересекались. Всего вариантов размещения новой задачи относительно находящихся в расписании задач $I + 1$, где I – количество задач, уже размещённых в расписании. Для каждого варианта размещения рассматривается до K вариантов сдвига других задач: $K = (I + 1) \cdot \sum_{i=1}^I T_i$, где T_i – количество опорных временных точек модели функции удовлетворённости s_i задачи o_i . Область возможных решений представляет гиперповерхность в пространстве размерности $I + 2$, где:

- ось $axis_i$, $i = \overline{1, I}$ задаёт время t_i , к которому выполнится задача o_i ;
- ось $axis_{I+1}$ задаёт время t_{new} , в которое выполнится размещаемая задача o_{new} ;
- ось $axis_{I+2}$ отражает приращение ПОУС ΔS_{patch}^m при расположении задач в расписании в соответствии со значениями остальных осей.

Изображение гиперповерхности для $I = 1$ представлено на рисунке 9. Проекция гиперповерхности на гиперплоскость $\Delta S = 0$ (заштриховано) представляет область допустимых вариантов размещения задач в расписании.

Задача алгоритма сводится к поиску патча с максимальным¹ приращением ПОУС. На рисунке 9 максимальному приращению ПОУС соответствует патч, устанавливающий время выполнения размещённой задачи $t_1 = 1$ секунда, а новой задачи $t_{new} = 4$ секунды.

Если нет ни одного варианта, для которого $\Delta S_{patch}^m > 0$, то добавление задачи o_{new} в расписание считается невозможным.

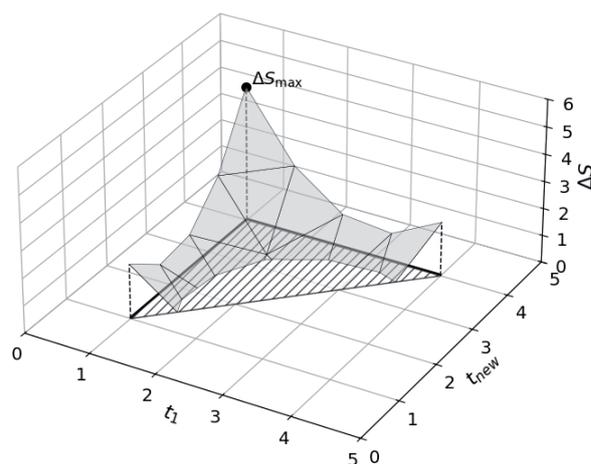


Рисунок 9 – Гиперповерхность возможных решений при $I = 1$

4.2.2 Описание алгоритма

Входными данными являются: состояние расписания ресурса; параметры новой задачи; параметры задач, размещённых в расписании. Результат работы алгоритма – патч с наибольшим приращением ПОУС среди всех возможных патчей.

Для каждого варианта размещения новой задачи в расписании итеративно применяются следующие этапы алгоритма.

- 1) Для выбранного размещения рассчитывается модель сдвига окружающих задач.
- 2) Из полученной модели сдвига задач и их функций удовлетворённости рассчитывается функция стоимости сдвига, отражающая зависимость потери в ПОУС от величины сдвига.
- 3) Рассчитывается функция приращения ПОУС как разница функции удовлетворённости новой задачи и функции стоимости сдвига.
- 4) Составляется патч, включающий добавление новой задачи и сдвиг окружающих задач в соответствии с максимальным значением функции приращения ПОУС.

Затем, из всех рассчитанных патчей выбирается один – с наибольшим значением приращения ПОУС.

Схема алгоритма представлена на рисунке 10.

Сдвиг задач, начиная с задачи o_n вперёд – это такое изменение времени бронирования $\Delta t_n^{\text{begin}} > 0$ задачи o_n , при котором время бронирования t_m^{begin} каждой последующей задачи $o_m, m > n$ в расписании изменяется на минимально возможное значение для выполнения условия $t_m^{\text{begin}} > t_{m-1}^{\text{end}}$, где t_{m-1}^{end} – это момент времени, в который выполнится задача o_{m-1} , предшествующая задаче o_m , если она будет принята к исполнению в момент времени o_{m-1}^{begin} .

Условия сдвигов назад и вперёд представлены формулами 1 и 2 соответственно.

$$\begin{cases} \Delta t_n^{\text{begin}} < 0 \\ t_m^{\text{end}} < t_{m+1}^{\text{begin}} \\ \Delta t_m^{\text{begin}} \rightarrow 0 \\ m > n \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta t_n^{\text{begin}} > 0 \\ t_m^{\text{begin}} > t_{m-1}^{\text{end}} \\ \Delta t_m^{\text{begin}} \rightarrow 0 \\ m < n \end{cases} \quad (2)$$

¹ Благодаря тому, что результирующая функция кусочно задана, она имеет конечное множество точек, где может быть найден максимум. Добавляя в алгоритм различные «фильтры», снижается количество вариантов перебора и повышается скорость работы алгоритма.

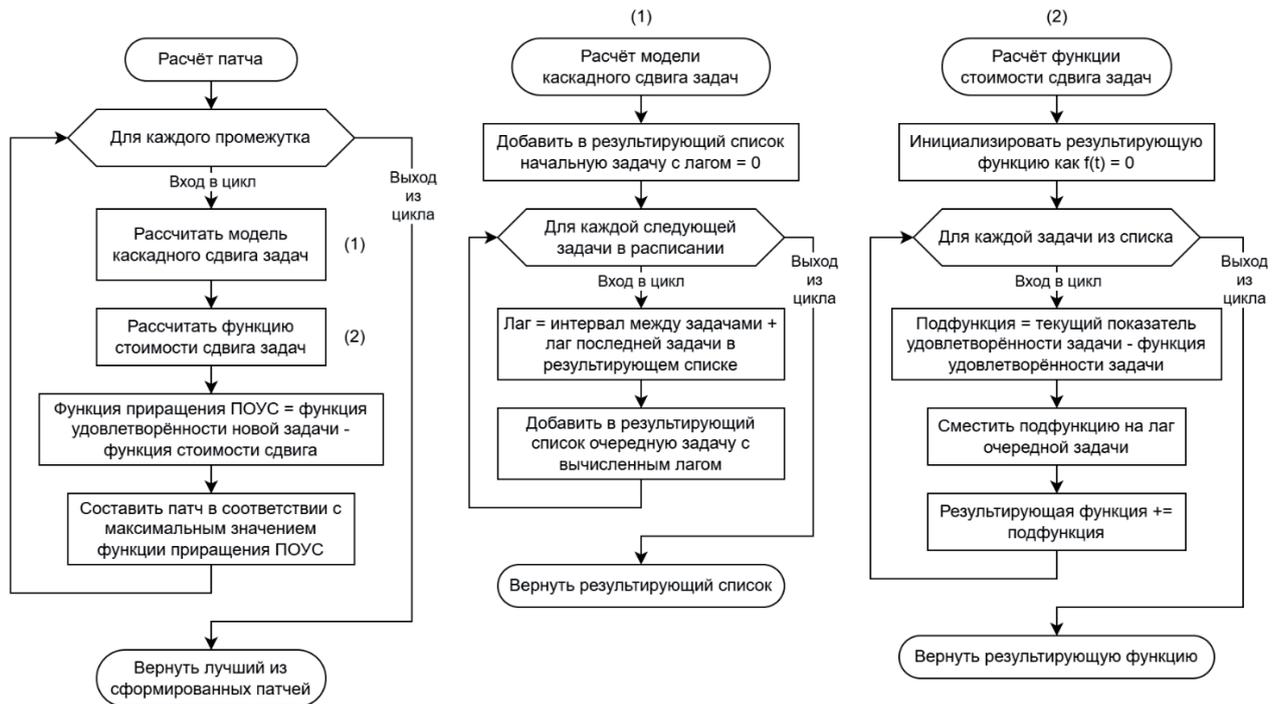


Рисунок 10 – Схема алгоритма расчёта и выбора наилучшего патча

4.2.3 Расчёт функции стоимости сдвига

В Примере 4 (рисунок 11) представлена работа алгоритма расчёта функции стоимости сдвига для задач o_1 и o_2 , где s_1 – функция удовлетворённости задачи o_1 , s_2 – функция удовлетворённости задачи o_2 . Обе задачи находятся в оптимальном положении. Задачи сдвигаются в сторону увеличения времени их брони (вправо), освобождая пространство перед задачей o_1 .

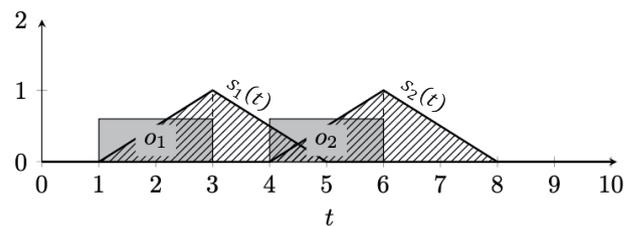


Рисунок 11 – Пример 4, функции удовлетворённости задач

Согласно изначальному расписанию задача o_1 должна начать обрабатываться в момент времени 1 секунда. Если новую задачу o_{new} возможно разместить так, чтобы она выполнялась в этот же момент времени, то задача o_1 не сдвигается и стоимость этого нулевого сдвига составит $\Delta S_{shift}(1) = s_1(3) - s_1(3) = 1 - 1 = 0$.

Отрезок времени $t \in [1, 2]$ секунд можно освободить, переместив только задачу o_1 . При этом она встанет вплотную к задаче o_2 . Стоимость сдвига составит $\Delta S_{shift}(2) = s_1(3) - s_1(4) = 1 - 0.5 = 0.5$. Функция стоимости сдвига (рисунок 12) заштрихована под углом 135 градусов. Чтобы освободить участок $t \in [2, 3]$ секунд, понадобится сдвигать обе задачи (см. условия сдвига (1) и (2) в разделе 4.2.2). Функция стоимости сдвига равна сумме изменений их показателей удовлетворённости $\Delta S_{shift}(3) = (s_1(3) - s_1(5)) + (s_2(6) - s_2(7)) = (1 - 0) + (1 - 0.5) = 1.5$ (рисунок 13). При дальнейшем смещении задачи o_1 функция удовлетворённости s_1 не будет оказывать влияния на результирующую, т.к. значение её функции удовлетворённости будет неизменно равно нулю (рисунок 14). Здесь $\Delta S_{shift}(4) = (s_1(3) - s_1(6)) + (s_2(6) - s_2(8)) = (1 - 0) + (1 - 0) = 2$. Дальнейшее смещение не повлияет на значение функции стоимости сдвига, т.к. значения обеих функций удовлетворённости неизменно будут равны нулю (рисунок 15).

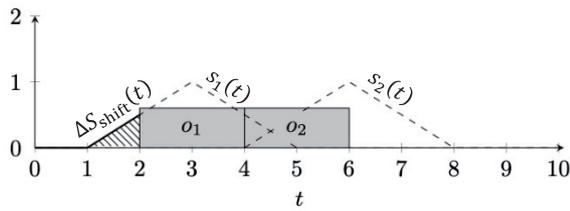


Рисунок 12 – Пример 4, функция стоимости сдвига для $t \in [1, 2]$

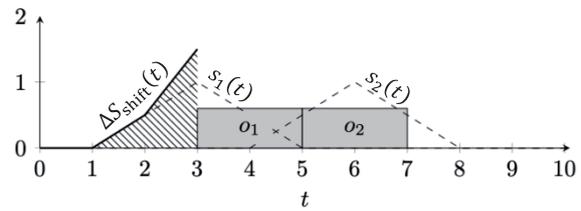


Рисунок 13 – Пример 4, функция стоимости сдвига для $t \in [1, 3]$

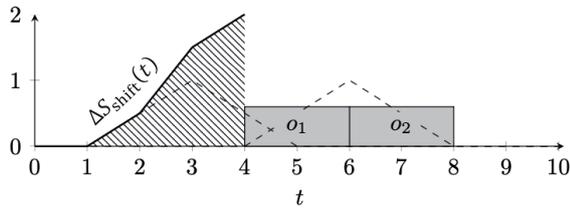


Рисунок 14 – Пример 4, функция стоимости сдвига для $t \in [1, 4]$

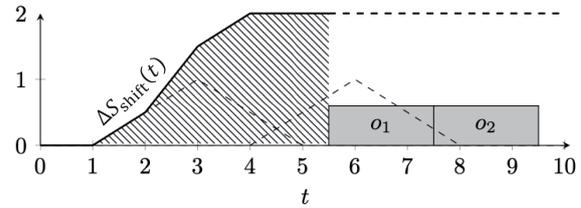


Рисунок 15 – Пример 4, полностью рассчитанная функция стоимости сдвига

4.2.4 Расчёт функции приращения ПОУС

Разница между функцией удовлетворённости s_{new} новой задачи o_{new} и функцией стоимости сдвига задач ΔS_{shift} , находящихся в расписании, покажет приращение ПОУС ΔS_{patch} при применении патча, содержащего модификации добавления новой задачи и смещения размещённых.

Если в расписании присутствуют задачи по обе стороны от вставки, то функция стоимости сдвига ΔS_{shift} рассчитывается из двух компонент: левосторонней ΔS_{shift}^{left} и правосторонней ΔS_{shift}^{right} . Работа алгоритма расчёта приращения ПОУС представлена на примере 5 с одним отличием от примера 4: задача o_{new} размещается между задачами o_1 и o_2 (рисунок 16). Результат вычисления обеих компонент функции стоимости сдвига представлен на рисунке 17. Правосторонняя функция стоимости сдвига отражает потерю в ПОУС при сдвиге времени начала обработки задачи o_2 . Начало обработки задачи o_2 будет совпадать с временем окончания обработки добавляемой задачи o_{new} . Функция удовлетворённости также привязана к времени окончания обработки задачи. При рассмотрении правосторонней функции стоимости сдвига разница между s_{new} и s_2 будет отражать приращение ПОУС в зависимости от расположения задач o_{new} и o_2 .

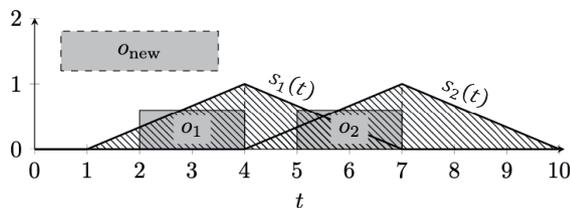


Рисунок 16 – Пример 5, функции удовлетворённости задач

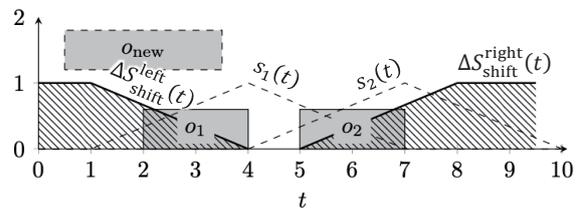


Рисунок 17 – Пример 5, подготовленные к объединению функции стоимости сдвига

В отличие от правосторонней функции стоимости сдвига левосторонняя отражает потерю в ПОУС при сдвиге времени окончания обработки задачи o_1 и выбранном начале времени обработки задачи o_{new} . Чтобы две функции стоимости сдвига можно было сложить, необходимо предварительно сместить левостороннюю компоненту вперёд на промежуток, равный длительности новой задачи o_{new} (рисунок 18). Результат сложения обеих частей функции стоимости сдвига и функция удовлетворённости s_{new} представлены на рисунке 19.

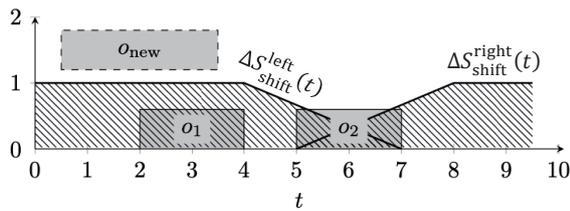


Рисунок 18 – Пример 5, компоненты функции стоимости сдвига для обоих направлений

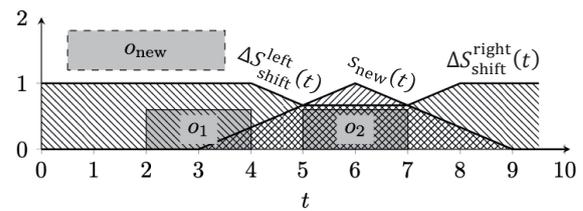
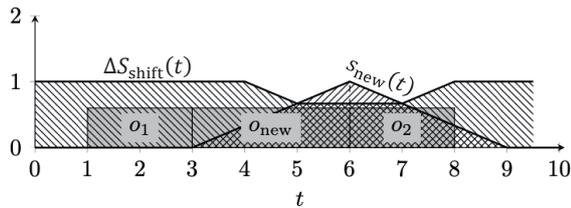
Рисунок 19 – Пример 5, функция стоимости сдвига (штриховка 135°) и функция удовлетворённости S_{new} новой задачи o_{new} (штриховка 45°)

Рисунок 20 – Пример 5, результат размещения новой задачи

На данном этапе становится видно, как выглядит разница s_{new} и функции стоимости сдвига. Задача o_{new} размещается в соответствии с максимальным значением их разности (рисунок 20).

5 Прототип системы управления вычислительными ресурсами

Акторная система реализована на языке *Python* 3.13 с использованием библиотек:

- *thespian* – реализация модели акторов для создания распределённых и многопоточных систем;
- *pydantic* – валидация данных и генерация конструкторов классов;
- *loguru* – журналирование работы системы;
- *pytest* – модульное тестирование;
- *pickle* – сериализация сообщений между агентами.

5.1 Архитектура мультиагентной системы

Роль управления агентами полностью делегирована от центрального объекта акторной системы специальному агенту-менеджеру, который, в отличие от объекта акторной системы, находится в потоке, не связанном с системной оболочкой, что позволяет ему обрабатывать входящие сообщения, не блокируя интерфейс программы. Акторная система выполняет две задачи: инициализация агента-менеджера при запуске модели и чтение стандартного потока ввода. При вводе команд в стандартный поток акторная система отправляет сообщение с текстом команды актору-менеджеру и переходит в режим ожидания следующей команды. Это позволяет вносить изменения в ВС параллельно с протекающим в ней активным процессом, используя единый интерфейс взаимодействия с ВС (консоль программы, объединяющая стандартные потоки ввода и вывода), что упрощает проведение экспериментов.

Агент-популятор предназначен для автоматизации проведения множественных последовательных экспериментов. Он перебирает различные варианты конфигурации ВС, запускает акторную систему с выбранными параметрами, собирает данные, записывает в таблицу и повторяет процесс для каждой комбинации входных параметров.

Основные агенты модели – это агенты задач и агенты ресурсов. Схема иерархии агентов представлена на рисунке 21.

Агент ресурса хранит свойства ресурса и его текущее расписание, которое представляет собой хранящий упорядоченный список непересекающихся временных интервалов, представленных в виде объектов брони. Класс расписания реализует все необходимые функции для анализа расписания на свободные промежутки времени, валидацию и применение патчей, поиск брони по её свойствам или временной точке, визуализации текущего состояния. Класс брони хранит информацию о временном промежутке бронирования ресурса, информацию о задаче, а также информацию о соседних бронях, если бронь помещена в расписание.

Агент задачи хранит свойства задачи, текущее состояние бронирования ресурса и информацию о всех доступных ресурсах. В рамках проведения эксперимента использованы две модели поведения агента задачи – пассивная и активная, алгоритмы поведения которых рассмотрены в подразделах 3.1 и 4.2.

Класс агента библиотеки *thespian* дополнен функциональностью,

позволяющей организовывать более сложные цепочки коммуникаций агентов.

- *Привязка к агенту-менеджеру.* Эта модификация позволяет агенту запрашивать информацию о текущем состоянии ВС, например, количество агентов выбранного типа.
- *Возможность широковещательной отправки сообщений.* Агент может отправить сообщение конкретному агенту или группе агентов, выделив их по какому-либо признаку.
- *Сообщение-запрос.* Это модифицированный вид сообщения с внедрённой в класс агента логикой, требующей от получателя ответить отправителю сообщением-ответом.
- *Множественный запрос.* Эта модификация позволяет связывать функцию для отложенной обработки ответа не с единственным запросом, а с группой запросов.
- *Отложенный ответ.* Эта модификация позволяет агенту-получателю сообщения-запроса не отвечать агенту-отправителю немедленно. Агент сохраняет в своём состоянии данные запроса и его содержание. Агент может проверить наличие отложенных ответов и отправить агенту-отправителю сообщение-ответ.

Класс агента получил дополнительные функции ведения журнала, счётчика и ограничителя отправленных сообщений, не позволяющего агентам бесконечно обмениваться циклическими сообщениями.

5.2 Протокол взаимодействия агентов

При запуске МА системы восстанавливается состояние акторной системы по предварительно заданной конфигурации. Считывается конфигурационный файл, и для каждого описанного агента отправляется агенту-менеджеру сообщение с данными для инициализации нового агента. Схема взаимодействия агентов при запуске модели представлена на рисунке 22.

Агент-менеджер выступает в роли посредника, так как только он хранит информацию о всех активных агентах модели. Агент-менеджер включает агента модели в список активных агентов после получения от него сообщения о готовности к работе и сообщает ему команду для выполнения сценария запуска.

Данное разделение процесса служит для предотвращения двух неблагоприятных случаев: агент, не завершивший инициализацию, получает сообщение от другого агента модели; агент модели получает сообщение от агента, которого нет в списке активных агентов. Таким образом гарантируется, что отправитель и получатель любого сообщения между агентами модели включены в список активных агентов.



Рисунок 21 – Схема иерархии агентов

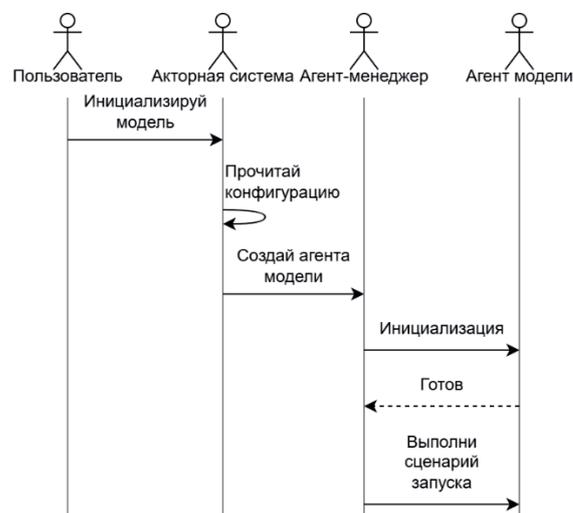


Рисунок 22 – Процесс восстановления состояния акторной системы по заданной конфигурации

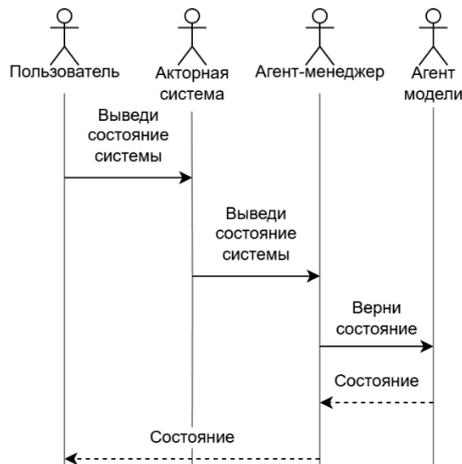


Рисунок 23 – Процесс выполнения пользовательской команды

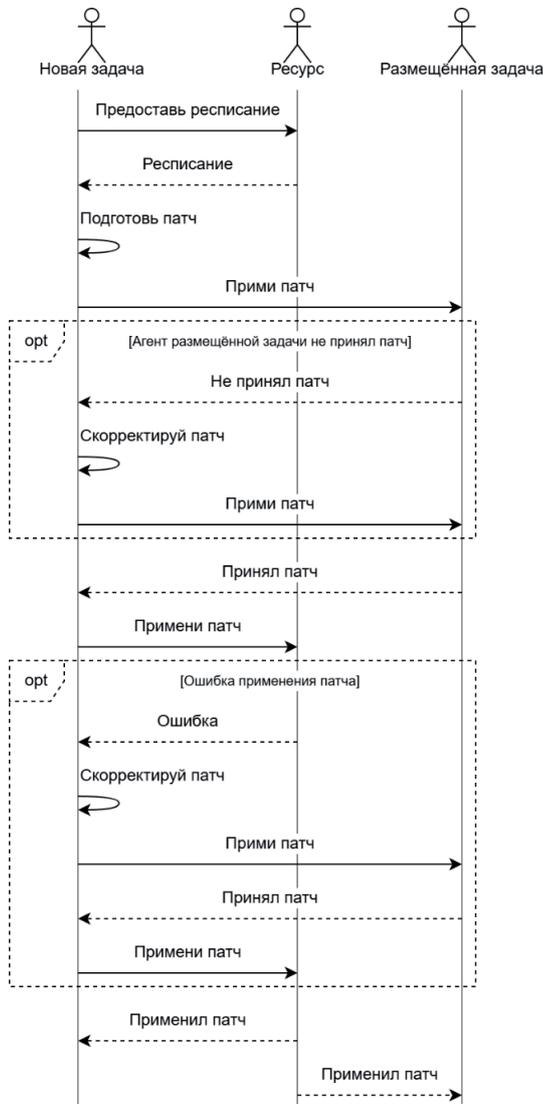


Рисунок 24 – Процесс формирования и принятия патча

Взаимодействие МА системы с пользователем также выполняется через агента–менеджера (см. рисунок 23).

5.3 Формирование и применение патча

Чтобы забронировать ресурс, агент задачи (агент-инициатор) запрашивает информацию о расписании у агента ресурса и рассчитывает патч, включающий добавление собственной задачи в расписание (рисунок 24). Если патч содержит изменения состояния других задач, то агент-инициатор направляет им патч на просмотр. Агент задачи может принять либо отвергнуть патч, в зависимости от своей модели поведения. Сообщение о непринятии патча содержит причину отказа, которая используется для его корректировки.

Если все затронутые агенты задач приняли патч, то его финальная версия направляется агенту ресурса, который валидирует патч на возможность его применения. Если применение патча невозможно, то агент ресурса сообщает об этом агенту-инициатору, указывая причину и актуальное состояние ресурса.

После корректировки патча агент-инициатор отправляет его на просмотр другим включённым в патч агентам задач. После принятия патча, агент-инициатор снова отправляет патч агенту ресурса. Если агент ресурса определит патч валидным, то он применит этот патч на собственном расписании и уведомит всех затронутых агентов задач об изменении их положения в расписании.

Метод разрешения конфликтов посредством переговоров между агентами потенциально может приводить к образованию замкнутых циклов взаимодействий, известных как взаимные блокировки.

Существует два сценария, ведущих к цикличности в переговорах: отказ агента задачи от предлагаемого патча и отказ агента ресурса от применения патча.

Отказ агента задачи возможен при наличии у него информации о другом ресурсе, который агент оценивает как потенциально более предпочтительный, исходя из возможностей реализации своей функции удовлетворённости. Такой агент немедленно прекращает участие в текущем процессе согласования и покидает соответствующий ресурс. В переговорах остаются те агенты, которые согласны с предложенными условиями.

Отказ агента ресурса от применения патча возможен в ситуации, когда предоставленный патч был сформирован на ос-

нове устаревшей информации о состоянии ресурса. В этом случае агенту задачи направляется обновлённая информация о состоянии ресурса, на основании которой он пересматривает свою стратегию.

Применение патча – синхронный и атомарный процесс: в каждый момент времени только один агент задачи может успешно применить изменения к расписанию ресурса. Это означает, что в случае поступления нескольких конкурирующих патчей будет гарантировано, что один из них будет применён первым, а остальные получат информацию об изменившемся состоянии ресурса. Благодаря этому агенты, получив обновлённые данные, гарантированно смогут применить патч на ресурсе.

6 Вычислительный эксперимент

Сравнение двух методов между собой производилось путём тестирования, которое выполнял специальный агент. Ему передавалась информация о варьируемых элементах конфигурации ВС: пределы варьирования, шаг варьирования или заранее заданные варианты:

- тип поведения агента задачи – активный или пассивный (пассивное поведение соответствовало следованию традиционному алгоритму, активное – предлагаемому);
- количество задач (от 5 до 25 задач с шагом 5);
- длительность задач (от 2 до 6 часов с шагом 1 час);
- продолжительность модели функции удовлетворённости задач (для всех задач модель функции удовлетворённости имела форму равнобедренного треугольника: длина основания треугольника является продолжительностью модели функции удовлетворённости задачи и варьировалась в промежутке от 3 до 12 часов с шагом 3).

Агент-популятор поочерёдно воспроизводил состояние системы для каждой из возможных комбинаций параметров, все задачи имели одинаковые исходные данные за исключением благоприятного времени выполнения задачи. После завершения переговоров между агентами задач и ресурсов агент-популятор запрашивал их показатели удовлетворённости, на этой основе получал информацию о количестве задач, успешно зарегистрировавших ресурс, и рассчитывал ПОУС.

Каждый запуск ВС имеет случайный фактор, вызванный невозможностью предсказать, в каком порядке будут обрабатываться сообщения агентов, запущенных одновременно. Чтобы компенсировать влияние случайного фактора каждая конфигурация ВС воспроизводилась несколько раз. Всего проведено 5 последовательных экспериментов.

На рисунке 25 показано распределение ПОУС, где видно, что мода распределения у предлагаемого (активный тип поведения агентов задач) алгоритма выше, чем у традиционного (пассивный тип поведения агентов задач).

На рисунках 26 – 28 показаны зависимости ключевых показателей ВС – ПОУС и количество агентов задач, успешно забронировавших ресурс от варьируемых параметров системы.

На приведённых графиках видно, что адаптивный метод показывает на 25–30% лучший результат по сравнению с традиционным. Это объясняется большей гибкостью предлагаемого алгоритма, который способен найти способ вместить в расписание задачу и повысить ПОУС, в то время как традиционный алгоритм сочтёт невозможным добавление новой задачи в расписание.

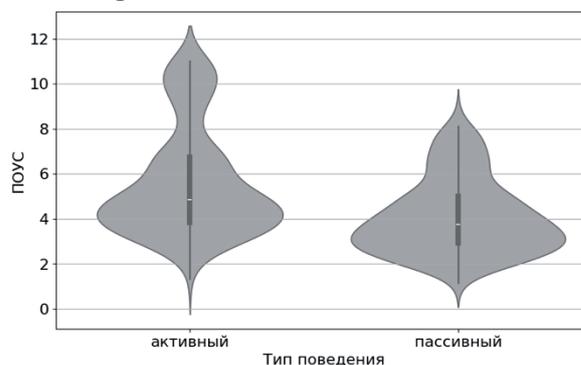


Рисунок 25 – Распределение ПОУС для активного и пассивного типов поведения агентов задач

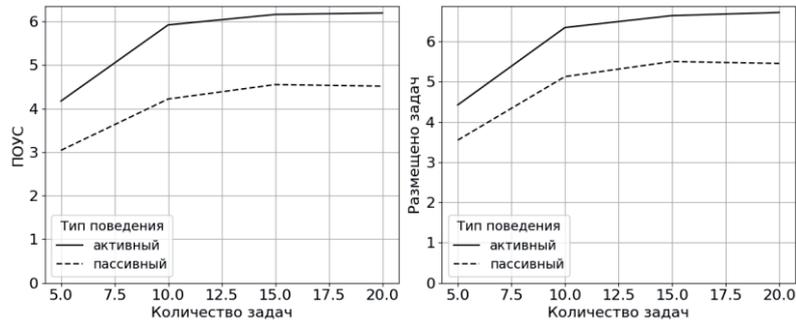


Рисунок 26 – Зависимость ключевых показателей от количества задач в системе

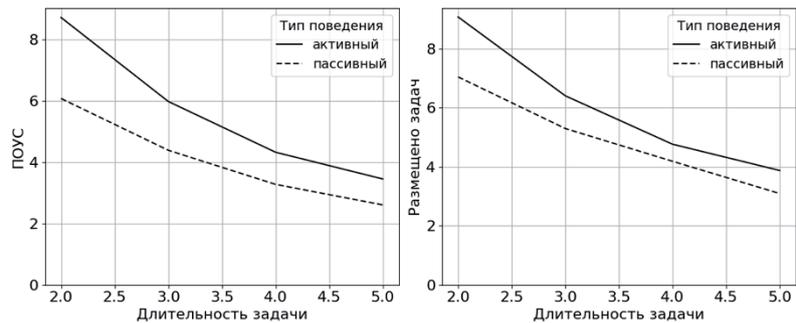


Рисунок 27 – Зависимость ключевых показателей от длительности задач

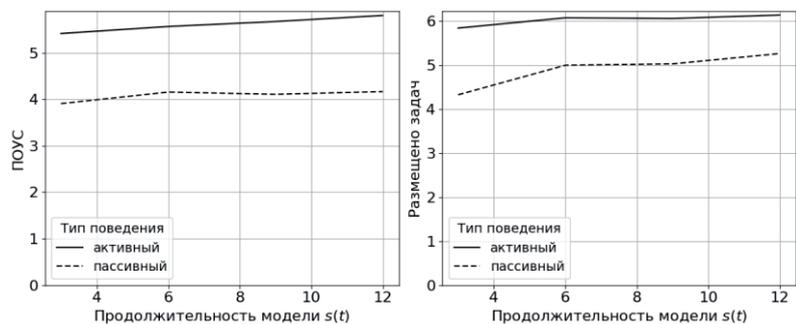


Рисунок 28 – Зависимость ключевых показателей от продолжительности модели функции удовлетворённости

Заключение

Разработанный адаптивный метод управления ВР на основе МА технологий ПВ-сетей имеет значительный потенциал для повышения эффективности перераспределения задач в реальном времени. В отличие от алгоритмов, ограниченных пакетным планированием, предложенный метод с адаптивными патчами позволяет выполнять модификации расписания, минимизируя потери при перепланировании и сохраняя устойчивость ВС. Преимуществами метода являются:

- высокая адаптивность, т.к. допускается изменять любые ранее принятые решения по включению и сдвигам заказов в расписания ВР;
- коллективное принятие решений, при котором агенты задач анализируют расписание не только с позиции собственных интересов, но и потенциально учитывают влияние изменений на показатель общей удовлетворённости системы;
- гибкость и масштабируемость, достигаемые за счёт децентрализованного взаимодействия агентов;

- подтверждённое вычислительным экспериментом повышение ПОУС на 25–30% за счёт применения адаптивных патчей по сравнению с традиционным методом.

Предложенный метод обладает адаптивностью для интеграции новых функций. Его развитие открывает перспективы практического применения для задач динамического распределения ресурсов в вычислительных, производственных и логистических системах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kulkarni A.J., Siarry P.** Handbook of AI-based Metaheuristics. 2021. P.301–322. DOI: 10.1201/9781003162841.
- [2] **Gendreau M., Potvin J.-Y.** Handbook of Metaheuristics (3rd Edition). 2019. P.353–384. DOI: 10.1007/978-3-319-91086-4.
- [3] **Coulouris G., Dollimore J., Kindberg T. Blair G.** Distributed Systems. Concepts and Design. 5th edition. 2011. P.41–51. ISBN 13: 978-0-13-214301-1.
- [4] **Kalyaev A., Korovin I.** New Method to Use Idle Personal Computers for Solving Coherent Tasks. AASRI Proceedings. Vol. 9. 2014. P.131–137. DOI: 10.1016/j.aasri.2014.09.021.
- [5] **Calvaresi D., Dicente Cid Y., Marinoni M., Dragoni A. F., Najjar A., Schumacher M.** Real-time Multi-Agent Systems: Rationality, Formal Model, and Empirical Results. 2021. P.27–31. DOI: 10.1007/s10458-020-09492-5.
- [6] **Мельник Э.В., Клименко А.Б.** Комплексный метод организации управления отказоустойчивой информационно-управляющей системой на основе многоагентного взаимодействия. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 9-1. С.136–149. EDN: ZXOOC.
- [7] **Грачев С.П., Жиляев А.А., Ларюхин В.Б., Новичков Д.Е., Галузин В.А., Симонова Е.В., Майоров И.В., Скобелев П.О.** Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени. *Автоматика и телемеханика*. 2021. №11. С.30–67. DOI: 10.31857/S0005231021110039.
- [8] **Амелина Н.О., Лада А.Н., Майоров И.В., Скобелев П.О., Царев А.В.** Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени. *Проблемы управления*. 2011. № 6. С.32–38.
- [9] **Zayats O.I., Baksheev V.E., Zaborovsky V.S., Muliukha V.A.** Model of a supercomputer cluster in the form of a queueing system with a random limit on the execution time of applied tasks. *Computing, Telecommunications and Control*. 2024. T.17. No.3. P.71–83. DOI: 10.18721/JCSTCS.17307.
- [10] **Каляев А.И., Каляев И.А.** Самоорганизующиеся распределённые системы. Москва: РАН, 2023. С.156.
- [11] **Goswami S., Das A.** An Adaptive Resource Allocation Scheme in Computational Grid. *International Journal of Control Theory and Applications*. 2016. No.9. P.721–736.
- [12] **Goswami S., Mukherjee K.** High Performance Fault Tolerant Resource Scheduling in Computational Grid Environment. *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies*. 2020. No.15. P.73–87. DOI: 10.4018/IJWLTT.2020010104.
- [13] **Pujiyanta A., Nugroho L.E., Widyanan.** Resource allocation model for grid computing environment. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*. 2020. Vol.6, No.2. P.185–196. DOI: 10.26555/ijain.v6i2.496
- [14] **Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Laruchkin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A.** The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. *Mathematics*. 2022. No.10. P.13–15. DOI: 10.3390/math10101662.
- [15] **Xie, N., Li, W., Zhang, J., Zhang, X.** Research on Cloud Task Scheduling Algorithm with Conflict Constraints Based on Branch-and-Price. 2013. P.11. DOI: 10.3390/app13137505.
- [16] **Wang G., Feng J., Jia D., Song J., Li G.** Cloud Task Scheduling using Particle Swarm Optimization and Capuchin Search Algorithms. 2023. P.1009–1017. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.01407109.
- [17] **Movahedi Z., Defude B., Hosseininia A. M.** An efficient population-based multi-objective task scheduling approach in fog computing systems. 2021. P.15–23. DOI: 10.1186/s13677-021-00264-4.
- [18] **Garg. R., Singh A.K.** Adaptive workflow scheduling in grid computing based on dynamic resource availability. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015. Vol.18. P.256–269. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.01.001.
- [19] **Haque A., Alhashmi S.M., Parthiban R.** An optimization-based adaptive resource management framework for economic Grids: A switching mechanism. *Future Generation Computer Systems*. 2015. Vol.47. P.48–59. DOI: 10.1016/j.future.2014.10.022.
- [20] **Binyamin S.S., Slama S.B.** Multi-Agent Systems for Resource Allocation and Scheduling in a Smart Grid. *Sensors*. 2022. No.22. P.13. DOI: 10.3390/s22218099.

Сведения об авторах



Кирьяков Федор Михайлович, 2001 г. рождения. Окончил бакалавриат СамГТУ в 2023 г. Магистрант кафедры «Информатика и вычислительная техника» Института автоматизации и вычислительной техники СамГТУ. ORCID: 0009-0000-1585-9852; kiriakov.f.m@gmail.com. ✉

Скобелев Пётр Олегович, 1960 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт (1983), к.т.н. (1986), д.т.н. (2003). Главный научный сотрудник СамНЦ РАН, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника» Института автоматизации и вычислительной техники СамГТУ. Автор



более 350 научных работ и учебных пособий. ORCID 0000-0003-2199-9557. petr.skobelev@gmail.com.

Поступила в редакцию 16.04.2025. после рецензирования 26.05.2025. Принята к публикации 10.06.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435

Multi-agent method to improving adaptive real-time management of computing resources

© 2025, F.M. Kiriakov¹✉, P.O. Skobelev¹⁻²

¹ Samara State Technical University (SamSTU), Samara, Russia

² Samara Science Centre of RAS (SamSC RAS), Samara, Russia

Abstract

The paper presents the development of a multi-agent method aimed at meeting the growing demand for computing resources by enhancing the adaptability and efficiency of real-time management. In practical scenarios, it is essential to enable prompt and flexible adaptive adjustments to the task execution schedule in order to improve overall resource utilization. The proposed multi-agent resource management method is based on a previously developed "network of needs and capabilities" model, which enables smooth, adaptive modifications to the execution schedule. This process involves a sequence of atomic stepwise changes to the resource allocation plan, including local task shifts within a single computing resource, as well as the displacement and redistribution of tasks across multiple resources. Each task agent calculates an optimal "patch" to maximize the global efficiency of the system, accounting for the satisfaction functions of all tasks affected by the change. A key innovation is the introduction of a collective decision-making mechanism based on the computation and coordination of these patches. This allows for dynamic optimization of the schedule without requiring full rescheduling or transitioning to a fully decentralized solution, which would eliminate the shared data environment of the agent system. Experimental results demonstrate that the proposed method increases system efficiency by 25–30% compared to non-adaptive control approaches, which lack the ability to selectively revise agent interactions or reallocate tasks among resources. The method also enhances the scalability and fault tolerance of the system, expanding its applicability to a broad range of dynamic resource allocation problems in computing, manufacturing, and logistics.

Keywords: multi-agent systems, resource management, adaptive planning, schedule optimization, fault tolerance, real-time systems.

For citation: Kiriakov FM, Skobelev PO. Multi-agent method to improving adaptive real-time management of computing resources [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 418-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.

Authors' contributions: *P.O. Skobelev* – problem statement and development of the research approach, analysis of the results. *F.M. Kiryakov* – task formalization, development of the ontological model of the computing network and the proposed multi-agent method, preparation of illustrative examples.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

- Figure 1 – Example of a satisfaction function model
- Figure 2 – Example of task representation on the graph and its satisfaction function
- Figure 3 – Example 1, original task satisfaction function
- Figure 4 – Example 1, task satisfaction function after its restriction
- Figure 5 – Example 1, the result of placing the task
- Figure 6 – Example 2, task satisfaction function after its restriction
- Figure 7 – Example 2, the result of placing the task
- Figure 8 – Example 3, task agent cannot book a resource
- Figure 9 – Hypersurface of possible solutions for $l=1$
- Figure 10 – Algorithm for calculating and selecting the best patch
- Figure 11 – Example 4, task satisfaction function
- Figure 12 – Example 4, shift cost function for $t \in [1, 2]$
- Figure 13 – Example 4, shift cost function for $t \in [1, 3]$
- Figure 14 – Example 4, shift cost function for $t \in [1, 4]$
- Figure 15 – Example 4, fully calculated shift cost function
- Figure 16 – Example 5, task satisfaction function
- Figure 17 – Example 5, shift cost function prepared for merging
- Figure 18 – Example 5, components of the shift cost functions for both directions
- Figure 19 – Example 5, shift cost function (hatched at 135°) and satisfaction function of the new task (hatched at 45°)
- Figure 20 – Example 5, the result of placing the task
- Figure 21 – Agent hierarchy scheme
- Figure 22 – Agent system state recovery process based on a given configuration
- Figure 23 – User command execution process
- Figure 24 – Patch creation and acceptance process
- Figure 25 – Distribution of overall system satisfaction for active and passive task agent behavior types
- Figure 26 – Dependence of key indicators on the number of tasks in the system
- Figure 27 – Dependence of key indicators on task duration
- Figure 28 – Dependence of key indicators on the duration of the satisfaction function model

References

- [1] **Kulkarni AJ, Siarry P.** Handbook of AI-based Metaheuristics. 2021. P.301–322. DOI: 10.1201/9781003162841.
- [2] **Gendreau M, Potvin J-Y.** Handbook of Metaheuristics (3rd Edition). 2019. P.353–384. DOI: 10.1007/978-3-319-91086-4.
- [3] **Coulouris G, Dollimore J, Kindberg T, Blair G.** Distributed Systems. Concepts and Design. 5th edition. 2011. P.41–51. ISBN 13: 978-0-13-214301-1.
- [4] **Kalyaev A, Korovin I.** New Method to Use Idle Personal Computers for Solving Coherent Tasks. AASRI Procedia. 2014; 9: 131–137. DOI: 10.1016/j.aasri.2014.09.021.
- [5] **Calvaresi D, Dicente Cid Y, Marinoni M, Dragoni AF, Najjar A, Schumacher M.** Real-time Multi-Agent Systems: Rationality, Formal Model, and Empirical Results. 2021. P.7–31. DOI: 10.1007/s10458-020-09492-5.
- [6] **Melnik EV, Klimenko AB.** A Complex Method for Organizing the Management of a Fault-Tolerant Information and Control System Based on Multi-Agent Interaction. [In Russian]. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*, 2017, No. 9, P.136–149. EDN: ZXOACL.
- [7] **Grachev SP, Zhilyaev AA, Laryukhin VB, Novichkov DE, Galuzin VA, Simonova EV, Mayorov IV, Skobelev PO.** Methods and tools for development intelligent systems for solving complex real-time adaptive resource management problems [In Russian]. *Automation and Remote Control*. 2021; 11: 30–67. DOI: 10.31857/S0005231021110039.

- [8] **Amelina NO, Lada AN, Mayorov IV, Skobelev PO, Tsarev AV.** Investigation of Models for Organizing Freight Transportation Using a Multi-Agent System for Adaptive Real-Time Planning of Mobile Resources. [In Russian]. *Problemy Upravleniya (Control Sciences)*, 2011; 6: P.32–38.
- [9] **Zayats OI, Baksheev VE, Zaborovsky VS, Muliukha VA.** Model of a supercomputer cluster in the form of a queueing system with a random limit on the execution time of applied tasks. *Computing, Telecommunications and Control*. 2024; 17: P.71–83. DOI: 10.18721/JCSTCS.17307.
- [10] **Kalyaev AI, Kalyaev IA.** Self-Organizing Distributed Systems [In Russian]. 2023. Moscow: RAS. P.156.
- [11] **Goswami S, Das A.** An Adaptive Resource Allocation Scheme in Computational Grid. *International Journal of Control Theory and Applications*. 2016; 9: 721–736.
- [12] **Goswami S, Mukherjee K.** High Performance Fault Tolerant Resource Scheduling in Computational Grid Environment. *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies*. 2020; 15: 73–87. DOI: 10.4018/IJWLTT.2020010104.
- [13] **Pujiyanta A, Nugroho LE, Widyanan.** Resource allocation model for grid computing environment. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*. 2020; 6(2): 185–196. DOI: 10.26555/ijain.v6i2.496
- [14] **Galuzin V, Galitskaya A, Grachev S, Laruchkin V, Novichkov D, Skobelev P, Zhilyaev A.** The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. *Mathematics*. 2022; 10: 13–15. DOI: 10.3390/math10101662.
- [15] **Xie N, Li W, Zhang J, Zhang X.** Research on Cloud Task Scheduling Algorithm with Conflict Constraints Based on Branch-and-Price. 2013. P.11. DOI: 10.3390/app13137505.
- [16] **Wang G., Feng J., Jia D., Song J., Li G.** Cloud Task Scheduling using Particle Swarm Optimization and Capuchin Search Algorithms. 2023. P.1009–1017. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.01407109.
- [17] **Movahedi Z., Defude B., Hosseininia A. M.** An efficient population-based multi-objective task scheduling approach in fog computing systems. 2021. P.15-23. DOI: 10.1186/s13677-021-00264-4.
- [18] **Garg. R., Singh A.K.** Adaptive workflow scheduling in grid computing based on dynamic resource availability. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015. Vol.18. P.256–269. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.01.001.
- [19] **Haque A., Alhashmi S.M., Parthiban R.** An optimization-based adaptive resource management framework for economic Grids: A switching mechanism. *Future Generation Computer Systems*. 2015. Vol.47. P.48–59. DOI: 10.1016/j.future.2014.10.022.
- [20] **Binyamin SS, Slama SB.** Multi-Agent Systems for Resource Allocation and Scheduling in a Smart Grid. *Sensors*. 2022; 22: 13. DOI: 10.3390/s22218099.

About the authors

Fedor Mikhailovich Kiryakov (b. 2001) graduated with a Bachelor's degree from SamSTU in 2023. Master's student at the Institute of Automation and Computer Engineering of the SamSTU. ORCID: 0009-0000-1585-9852; kiryakov.f.m@gmail.com. ✉

Petr Olegovich Skobelev (b. 1960) graduated from Kuibyshev Aviation Institute in 1983. Candidate of Technical Sciences (1986), Doctor of Technical Sciences (2003). Chief Researcher at the SamSC RAS, Professor at the Department of Computer Science and Computing Systems of the Institute of Automation and Computer Engineering of the SamSTU. Author of more than 350 scientific publications and textbooks. ORCID: 0000-0003-2199-9557; petr.skobelev@gmail.com.

Received April 16, 2025. Revised May 26, 2025. Accepted June 10, 2025.



Интеллектуальная поддержка анализа градостроительных проектов на основе онтологии

© 2025, А.Г. Щербаков, Н.П. Садовникова, Д.С. Парыгин ✉,
Н.М. Рашевский, А.С. Гуртяков

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), Волгоград, Россия

Аннотация

Проектирование градостроительных объектов основано на подходах, которые включают создание новых методов извлечения и представления знаний и позволяют адаптировать цифровые модели к изменяющимся условиям, упрощая согласование междисциплинарных требований. В статье рассматриваются вопросы формализации знаний о типах строительных конструкций, стандартах, условиях эксплуатации и других видах данных, которые необходимо учитывать в процессе градостроительной деятельности. На основе анализа процесса проектирования и нормативно-справочной документации разработана онтология, которая предназначена для поддержки оценки градостроительных проектов. Предложен метод анализа градостроительных проектов, который обеспечивает интеграцию данных информационной, геометрической и онтологической моделей для проверки соответствия цифровых моделей и проектной документации нормам и стандартам. Метод инвариантен к градостроительным проектам, и условия его применения зависят от полноты баз данных и правил. Программная реализация метода позволяет снизить трудоёмкость экспертизы градостроительных проектов и повысить их качество.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, модель представления знаний, градостроительный проект, онтология, проектирование.

Цитирование: Щербаков А.Г., Садовникова Н.П., Парыгин Д.С., Рашевский Н.М., Гуртяков А.С. Интеллектуальная поддержка анализа градостроительных проектов на основе онтологии. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.436-448. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-436-448.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке «Центра цифровых научно-образовательных проектов и разработок в сфере промышленного искусственного интеллекта» Ц2RED-ИИ ВолгГТУ, созданного в рамках реализации образовательных программ топ-уровня в сфере искусственного интеллекта (Соглашение № 70-2025-000756).

Благодарности: авторы выражают благодарность коллегам по кафедре «Цифровые технологии в урбанистике, архитектуре и строительстве» ВолгГТУ, помогавшим в выполнении работы.

Вклад авторов: Щербаков А.Г. – провёл исследование возможности применения онтологического подхода. Садовникова Н.П. – разработала метод анализа градостроительных проектов с использованием онтологической модели. Парыгин Д.С. – выполнил постановку задачи исследования и сформулировал подход к её реализации. Рашевский Н.М. – предложил подход к формализации знаний для поддержки градостроительного проектирования. Гуртяков А.С. – выполнил подготовку и анализ примера практического применения разработанного подхода.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современные требования к качеству городской среды определяют необходимость изменения принципов градостроительной политики и внедрение новых технологий планирования и проектирования [1]. Проектирование городской среды включает ряд задач, связанных с разработкой концепции города, проектов зданий, сооружений, обеспечивающей инфраструк-

туры и логистических систем, реализуемых в соответствии с регламентами нормативно-правового регулирования [2].

Существующие подходы к поддержке принятия решений (ППР) в процессе градостроительного проектирования не позволяют учесть все факторы, влияющие на качество городской среды [3-5]. Особую сложность представляют экспертизы проектов, которые включают трудоёмкие процедуры проверки на соответствие нормативным документам. На этапе экспертизы проекта могут выявляться противоречия и ошибки, которые приводят к необходимости существенной переработки проекта. Цифровизация строительства и внедрение цифрового моделирования привели к необходимости интеграции разнородных данных, формируемых на различных этапах проектирования, и согласования проектных решений.

Рассматриваемая в данной статье задача связана с созданием методов извлечения и формализации знаний, которые позволят создать основу для интеграции данных в цифровом строительстве и упростить процесс подготовки и проверки проектной документации.

1 Онтологический подход в градостроительной деятельности

Применение онтологического подхода в градостроительстве обладает значительными возможностями для формализации процессов [6-9].

- Онтологии позволяют интегрировать различные типы данных (географические, социальные, экономические и экологические), формировать единое информационное пространство для ППР в проектировании.
- Онтологические модели (ОМ) совместно с цифровыми моделями объектов могут использоваться для оценки вариантов проектных решений.
- Онтологии могут использоваться для создания интерфейсов между различными информационными системами, что обеспечивает более эффективное взаимодействие и обмен данными между участниками градостроительной деятельности.
- Использование онтологий может обеспечить проактивное решение задач, связанных с выявлением возможных конфликтов, противоречий и недостатков в градостроительных решениях.
- Онтологии являются основой для разработки баз знаний и структуры базы данных цифрового двойника градостроительного объекта. Потребители информации могут получать данные из онтологий, в т.ч. через сеть Интернет.

Известны онтологии, которые используются для формализации и структурирования знаний о городском пространстве.

*CityGML*¹ – это открытый стандарт для обмена трёхмерной географической информацией о городах и ландшафтах, который включает ОМ для описания геометрии, топологии, семантики и атрибутов городского пространства на основе формата *JSON*.

*Linked Building Data*² (*LBD*) – решение для создания ОМ зданий и их компонентов с использованием принципов связанных данных.

*Urban System Ontology*³ – это онтология, которая включает территориальное планирование, социальные вопросы, транспорт и окружающую среду. Одним из проектов включения онтологий в процессы проектирования градостроительных объектов является *Towntology*, который позволяет градостроителям работать с онтологией для анализа вариантов проектных решений [10].

В [11] рассматриваются вопросы формального представления знаний и использования построенных моделей для анализа городских систем. Приведены примеры применения ОМ для поддержки решений в оперативном управлении городскими системами и городском планировании.

Подход к интеграции данных и извлечению знаний для построения онтологий в сфере городского планирования представлен в [12]. Построенные ОМ применяются для ППР в задачах анализа эффективности использования территорий, исследования рынка недвижимости и планирования жилой застройки.

В [13] описывается подход, направленный на поддержку ранних этапов процесса городского проектирования. Основное внимание уделяется аспектам формализации знаний, которая является основой для моделирования городского пространства.

¹ *CityGML* - *Open Geospatial Consortium*. - <https://www.ogc.org/standard/citygml/>.

² *LBD*. - <https://www.ugent.be/ea/architectuur/en/research/research-projects/all-research-projects/linked-building-data>.

³ *Urban System Ontology*. - <https://enterpriseintegrationlab.github.io/icity/UrbanSystem/doc/index-en.html>.

Потенциальные выгоды от использования онтологии в городском проектировании могут быть получены на разных этапах жизненного цикла градостроительного объекта, а эффективность полученных решений зависит от полноты используемых знаний [14].

Одним из ключевых преимуществ применения онтологий в градостроительстве является возможность объединения разнородных данных в единую систему. Это позволяет создавать комплексные решения для анализа и проектирования градостроительных объектов. Несмотря на достижения в сфере интеллектуализации строительного проектирования, для адаптации моделей знаний к конкретным проектам и регионам нужны новые решения и инструменты, в т.ч. позволяющие реализовать совместное использование с информационными системами моделирования зданий (*BIM*-системами, от англ. *Building Information Model*).

2 Модели знаний для поддержки анализа градостроительных проектов

2.1 Градостроительное проектирование с использованием цифровых моделей

Градостроительное проектирование в современных условиях связано с разработкой и утверждением цифровой модели и документации, основанных на нормативах и правилах, в которых отражены знания о том, как организовать строительство с соблюдением всех существующих требований [15].

На каждом этапе проектирования решаются задачи, связанные с анализом данных и обоснованием решений. Например, результаты предпроектных исследований определяют условия применения действующих правил, выбор материалов и технологий. Архитектурно-строительное проектирование начинается с анализа технического задания и включает следующие этапы (см. рисунок 1).

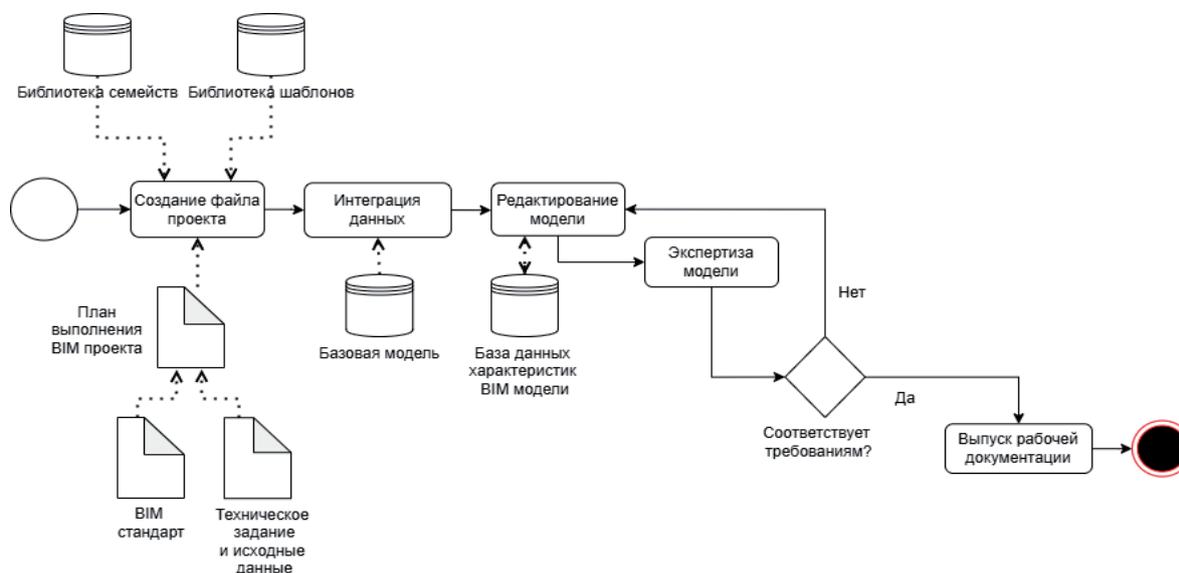


Рисунок 1 – Этапы процесса градостроительного проектирования с использованием цифровых моделей

- 1) Создание файла проекта включает подключение/создание библиотеки семейств, содержащей все необходимые для проекта элементы строительства/градостроительства (окна, двери, материалы, ограды, транспортно-телекоммуникационная инфраструктура, объекты городской среды и т.д.), библиотеку шаблонов – набор предварительно созданных типовых элементов, компонентов и конструкций. На основе технического задания, определяющие требования и условия для выполнения проектных работ, формируется план выполнения *BIM* проекта (*БЕР*, *BIM Execution Plan*), определяющий координацию, планирование и организацию совместной работы всех участников проектной группы на всех этапах *BIM*-проекта.

- 2) Интеграция данных – слияние информации о проектируемом объекте строительства из множества источников в унифицированное и стандартизированное отображение. Базовая модель представляет собой упрощённое представление объекта строительства и включает основные элементы здания (стены, перекрытия, инженерные системы и др.). Эта модель служит основой для более детализированной модели.
- 3) Редактирование модели – на данном этапе дорабатывается базовая модель, наполняется характеристиками и значениями всех её составляющих из сформированной базы данных *ВМ* модели.
- 4) Экспертиза модели представляет собой проверку и оценку модели на соответствие определённым критериям, стандартам и требованиям. Если модель не проходит проверку, то она отправляется на доработку.
- 5) Если модель проходит экспертизу, то на её основе готовят рабочую документацию, по которой выполняются строительные работы.

2.2 Формализация знаний для анализа градостроительных проектов

Задача автоматизации поиска нормативных нарушений в процессе проектирования в строительстве является важным направлением цифровизации этой отрасли⁴. Единого стандарта, описывающего структурные связи и информационное наполнение цифровых моделей, нет, но необходимость поддерживать существующую нормативную базу является обязательной. При этом разные нормативные документы могут содержать взаимоисключающие требования, неоднозначные определения и понятия.

Например, в сфере градостроительства могут возникать противоречия между требованиями к плотности застройки и минимальными расстояниями между зданиями. Согласно одному нормативному документу, плотность жилой застройки в конкретной зоне может быть установлена на уровне 40%, что подразумевает максимальное использование территории под строительство (СП 42.13330.2016⁵ приложение Б.1). Другой нормативный акт (например, СП 476.1325800.2020⁶) содержит требование выдерживать минимальные расстояния между зданиями.

Неоднозначность терминологии также создаёт сложности для проектировщиков и застройщиков. Например, понятие «прилегающая территория» может трактоваться по-разному: в одних документах оно относится только к участкам, непосредственно примыкающим к зданию, а в других — ко всей территории, находящейся в пределах красных линий улиц.

В предметной области рассмотрены типы строительных объектов, своды правил (СП), санитарные правила и нормы (СанПиН), ГОСТы и другие нормативные документы, определены концепты и связи между ними. На рисунке 2 показаны основные концепты, которые использовались для построения онтологии, а на рисунке 3 представлен фрагмент структуры классов разработанной онтологии.

Для формализации знаний и анализа соответствия проектов требованиям нормативных документов использовался язык *SWRL* (*Semantic Web Rule Language*) [16], который представляет собой язык для формулирования правил вывода, расширяющий возможности онтологии. *SWRL*-правила состоят из антецедента и консеквента, которые формируются на основе атомов, переменных и констант.

- Атомы – это базовые составляющие правила, которые могут быть двух типов: классовые, например класс *Road(?r)*, где *Road* является классом, и переменные, где *?r* – экземпляр класса *Road*.
- Переменные, которые обозначаются с помощью префикса *?* (например, *?x*, *?y*) и используются для связывания различных атомов в одном правиле.
- Стандартные логические операторы конъюнкции и импликации.
- Антецедент — это часть правила, описывающая условия, при которых правило применяется.
- Консеквент — это часть правила, описывающая следствие, которое должно быть выполнено, если условия антецедента истинны.

⁴ В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 17.05.2024 № 614 предъявляются новые требования к составу сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства.

⁵ СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89.

⁶ СП 476.1325800.2020. Свод правил. Территории городских и сельских поселений. Правила планировки, застройки и благоустройства жилых микрорайонов" (утв. и введён в действие Приказом Минстроя России от 24.01.2020 N 33/пр).

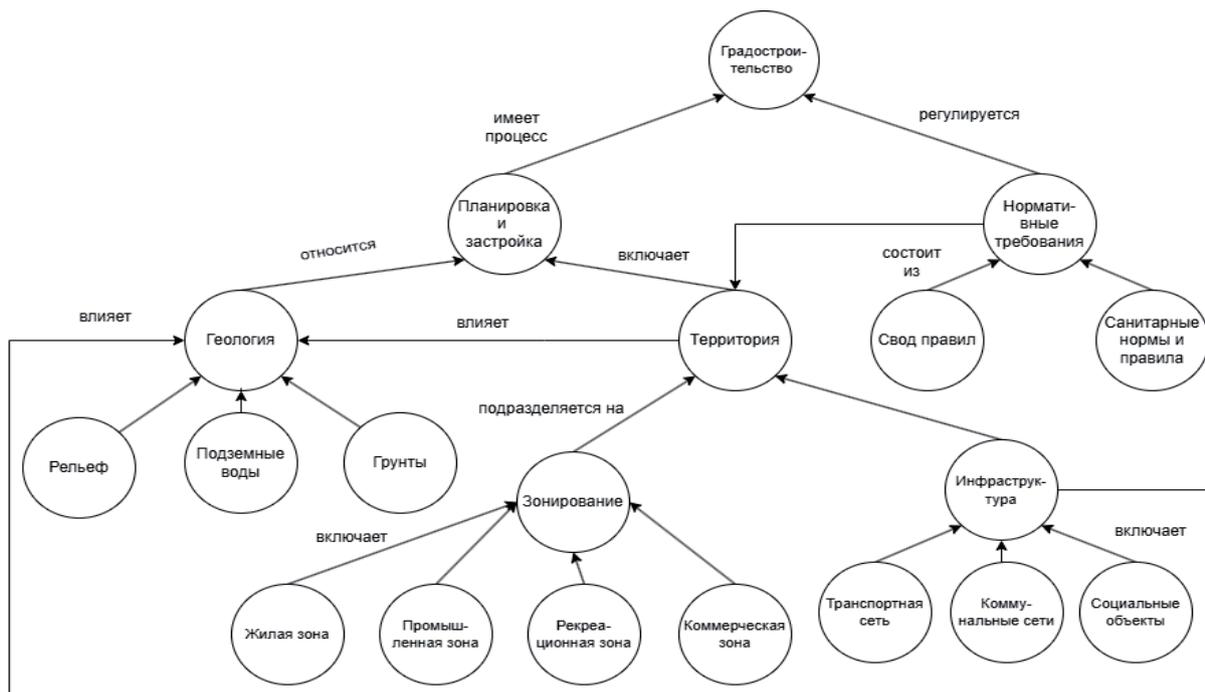


Рисунок 2 – Концептуальная модель знаний для анализа градостроительных проектов в нотации IDEF5 (фрагмент)

Пример формального представления правила:

$$A1 \wedge A2 \wedge \dots \wedge An \rightarrow B1 \wedge B2 \wedge \dots \wedge Bm,$$

где $A1, A2, \dots, An$ — атомы в антецеденте (условия правила); $B1, B2, \dots, Bm$ — атомы в консеквенте (следствия правила); $n \geq 1, m \geq 1$ — количество атомов в антецеденте и консеквенте.

Формализация правил позволяет автоматизировать процесс анализа модели и сопутствующей проектной документации т.к. появляется возможность напрямую работать с OWL классами, свойствами и индивидами и определять более сложные отношения и ограничения.

Для этого используются механизмы логического вывода, которые позволяют оценивать сложные условия и взаимосвязи между различными элементами модели. Например, если изменение проекта влияет на другие его части, система эти взаимосвязи учитываются при проверке. В работе сформировано 125 правил по различным нормативам и стандартам. Примеры правил представлены в таблице 1.

2.3 Метод анализа градостроительных проектов

Использование ОМ позволяет автоматизировать процессы, связанные с проверкой качества создаваемой цифровой модели и сопутствующей проектной документации. Экспертиза строительных проектов трудоёмкая, дорогостоящая и ответственная процедура, выполняемая специалистами высокой квалификации. Однако практика показывает, что ошибки могут обнаруживаться в процессе строительства и даже в эксплуатации. Высокий риск ошибок проектирования обусловлен:



Рисунок 3 – Иерархия классов онтологии (фрагмент)

- сложностью городской среды, состоящей из большого числа взаимосвязанных элементов;
- большим количеством нормативной документации и противоречиями в ней;
- постоянными изменениями в законодательстве;
- недостатком квалифицированных специалистов и др.

Таблица 1 – Примеры SWRL-правил

Раздел СП	Требование по СП	SWRL-правило
СП 42.13330.2016 п.7	Расстояние между домами свыше 9 этажей должно быть больше 25 м	MultiStoreyBuildings(?b1) ^ MultiStoreyBuildings(?b2) ^ hasFloors(?b1, ?f1) ^ hasFloors(?b2, ?f2) ^ swrlb:greaterThan(?f1, 9) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?f2, 9) ^ Distance(?d) ^ connects(?d, ?b1) ^ connects(?d, ?b2) ^ distanceBetween(?d, ?dist) ^ swrlb:lessThan(?dist, 25) -> InvalidDistance(?b1, ?b2)
СП 42.13330.2016 п.9	Площадь озеленённой территории микрорайона многоквартирной застройки жилой зоны должна составлять не менее 25% площади территории квартала.	Microdistrict(?d) ^ hasArea(?d, ?a) ^ hasGreenArea(?d, ?g) ^ swrlb:divide(?p, ?g, ?a) ^ swrlb:multiply(?p, ?p, 100) ^ swrlb:lessThan(?p, 25) -> has-InsufficientGreenery(?d, true)
СП 42.13330.2016 п.11.11	Расстояние между магистральной трассой и жилым домом, должно быть больше 50 м	TrunkRoad(?road) ^ ResidentialBuilding(?building) ^ hasDistanceTo(?road, ?building) ^ distanceBetween(?road, ?distance) ^ swrlb:lessThan (?distance, 50) -> InvalidDistance(?road, ? building)

Основные ошибки в градостроительном проектировании сооружений часто возникают на начальных этапах, когда проводятся изыскания, определяются инженерные, архитектурные и конструктивные характеристики при учёте множества факторов (геологические условия, климатические особенности, функциональное назначение объекта и др.). Вследствие этого велика вероятность сделать неверные предположения. Например, неточная информация о грунтах может привести к ошибкам в расчётах фундамента, что приводит к использованию материалов, не соответствующих требованиям безопасности.

Предлагаемый метод анализа градостроительных проектов включает следующие этапы:

- 1) загрузка информационной модели, созданной в программе градостроительного проектирования *Rhinoceros*⁷, и создание файла проекта формата *XML*;
- 2) передача параметров и данных модели через программный интерфейс (*Application Programming Interface, API*) и создание их списка – структурированного представления данных модели, которое включает ключевые характеристики и их значения; для извлечения параметров используются функции *Rhinoceros API*;
- 3) преобразование *SWRL*-правил в *JSON*-файл с помощью *OWL API* и создание массива для хранения правил;
- 4) чтение *JSON*-файла через *API* среды информационного моделирования;
- 5) интерпретация *JSON*-файла в список правил;
- 6) проверка соответствия параметров модели правилам онтологии.

В таблице 2 представлены элементы *XML*-файла и интерпретированные правила из *JSON*. Элементы *Building* содержат атрибуты *id*, *Name*, *Floors*, *Height*, *Location* и *AdjacentBuildings*, которые описывают характеристики здания и его расположение относительно других зданий. В начале процесса экспертизы интерпретируются *SWRL*-правила, описанные в *JSON* структуре. Каждое правило содержит ключи *ruleName*, *description*, *antecedent*, *consequent* и *condition*. Антецедент в правиле указывает, что необходимо проверить, являются

⁷ Rhinoceros 3D. - <https://www.rhino3d.com/>.

ся ли две сущности соседними зданиями и какое расстояние между ними. Эти условия связаны с элементами XML файла *Building*, *AdjacentBuildings* и атрибутом *distanceToBuilding*, описанным в JSON. После извлечения данных применяются логические условия, указанные в *condition JSON* структуры. Если условие выполняется, то применяется консеквент. В результате формируется список всех несоответствий с указанием на нормативные документы.

Таблица 2 – Проверка соответствия параметров модели правилам онтологии

Элемент XML-файла	Правила из JSON-файла
<pre> id="Building1" Residential Tower A <Floors>12</Floors> <Height>40m</Height> <AdjacentBuildings> <BuildingDistance id="Building2"> 25m </BuildingDistance> <BuildingDistance id="Building3"> 30m </BuildingDistance> </AdjacentBuildings> </Building> id="Building2" <Name>Residential Building B</Name> <Floors>8</Floors> <Height>25m</Height> <AdjacentBuildings> <BuildingDistance id="Building1"> 25m </BuildingDistance> <BuildingDistance id="Building3"> 20m </BuildingDistance> </AdjacentBuildings> </Building> </pre>	<pre> "swrlRules": [{ "ruleName": "BuildingSpacingRule" "antecedent": ["?b1 rdf:type :Building", "?b2 rdf:type :Building", "?b1 :hasAdjacentBuilding ?b2", "?b1 :distanceToBuilding ?d"], "consequent": ["?b1 :meetsBuildingSpacingRequirement true"], "condition": "?d > 25" }] </pre>

Диаграмма компонентов системы анализа градостроительных проектов в виде совокупности модулей показана на рисунке 4.

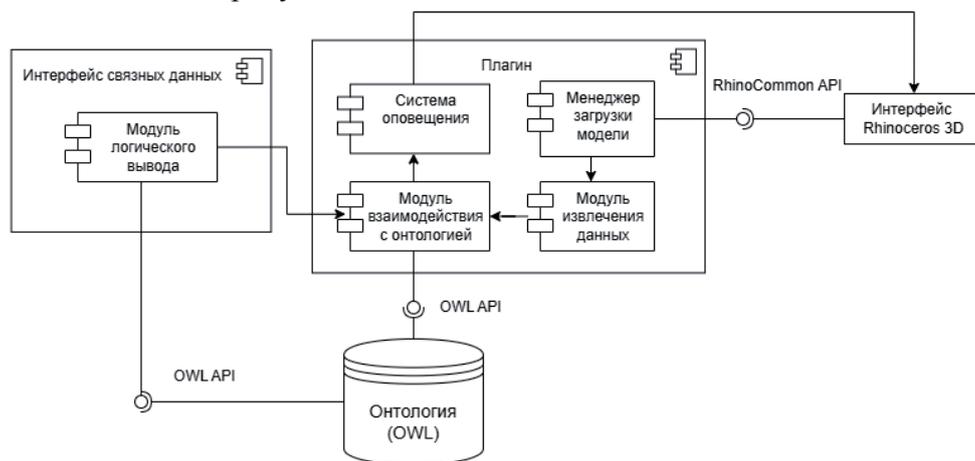


Рисунок 4 – Диаграмма компонентов системы анализа градостроительных проектов

- Интерфейс *Rhinoceros 3D* предназначен для взаимодействия пользователя с информационной моделью и получения предупреждения о несоответствиях, если таковые имеются.
- Плагин взаимодействует с интерфейсом через *RhinoCommon API* и состоит из следующих модулей:
 - Менеджер загрузки модели с помощью языка программирования *C#* обрабатывает данные информационной модели и формирует список её элементов.

- Модуль извлечения данных получает значения характеристик информационной модели и формирует её структуру.
- Модуль взаимодействия с онтологией обеспечивает связь между характеристиками информационной модели *Rhino* и онтологией. Этот модуль использует *OWL API* для аннотации объектов модели семантическими метаданными и установления связей между ними.
- *OWL API* является инструментом для работы с онтологией и предоставляет доступ к семантическим данным и регулирующим правилам.
- Модуль логического вывода осуществляет применение логических правил и выводов на основе данных модели и онтологии.

Результатом выполнения плагина является массив правил, который передаётся в модуль взаимодействия с онтологией, где правила обрабатываются и используются для проверки модели. Если в информационной модели найдены несоответствия, то система оповещения уведомляет пользователей об этом. Процедура поиска способов разрешения несоответствий проектировщиком может быть следующей:

- 1) анализ несоответствий (какие параметры не соответствуют требованиям и почему);
- 2) пересмотр параметров модели (изменение размеров, выбор других материалов и др.);
- 3) проверка модели (цикл повторяется до тех пор, пока все несоответствия не будут устранены);
- 4) если ошибки не выявлены, то принимается решение о формировании проектной документации.

3 Пример анализа градостроительного проекта

Рассматривается соответствие проектных решений своду правил СП 42.13330.2016 при проектировании жилого квартала. Проверка реализуется в виде запросов к модели проекта на языке *SPARQL*, что позволяет извлекать необходимые данные и анализировать их на соответствие семантическим связям, заданным в онтологии. Результаты проверки возвращаются в формате таблицы, где отображаются соответствия установленным правилам и возможные противоречия. Модель проекта представляет собой набор конкретных данных, таких как параметры зданий, характеристики участков или другие атрибуты, которые могут соответствовать правилам либо противоречить им. *SPARQL*-запросы используют онтологию как основу для проверки данных модели проекта, выявляя несоответствия или ошибки [16, 17]. Созданные запросы хранятся в файле и могут повторно использоваться. Примеры запросов и используемых при этом *SWRL*-правил представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Примеры *SPARQL*-запросов и результаты проверки

<i>SPARQL</i> -запросы	Результаты проверки
<pre>SELECT ?house1 ?property ?house2 ?value WHERE { ?house1 a ?class. FILTER(regex(str(?class), "MultiStoreyBuildings\$", "i")). ?house1 <http://www.semanticweb.org/gsher/ontologies/buildingFamily.owl#hasDistance> ?house2. ?house1 <http://www.semanticweb.org/gsher/ontologies/buildingFamily.owl#hasADistanceOf ?value }</pre>	<p>Расстояние между домами свыше 9-ти этажей должно быть больше 25 м согласно СП 42.13330.2016.</p>
<pre>SELECT ?district ?area ?greenArea ?greenPercentage WHERE { ?district a ?class . FILTER(regex(str(?class), "Microdistrict\$", "i")) . http://www.semanticweb.org/gsher/ontologies/buildingFamily.owl#hasArea> ?area. ?district http://www.semanticweb.org/gsher/ontologies/buildingFamily.owl#hasGreenArea> ?greenArea . BIND((?greenArea / ?area) * 100 AS ?greenPercentage) }</pre>	<p>Площадь озеленённой территории микрорайона многоквартирной застройки должна составлять не менее 25% площади территории микрорайона согласно СП 42.13330.2016.</p>
<pre>SELECT ?road ?property ?relatedRoad ?value WHERE { ?road a ?class. FILTER(regex(str(?class), "TrunkRoad\$", "i")) ?road http://www.semanticweb.org/gsher/ontologies/buildingFamily.owl#hasDistance > ?relatedRoad. ?road ?property ?value. }</pre>	<p>Расстояние между магистральной трассой и жилым домом должно быть больше 50 м согласно СП 42.13330.2016.</p>

Визуальное представление результатов проверки информационной модели в среде проектирования *Rhinoceros*, показаны на рисунке 5.

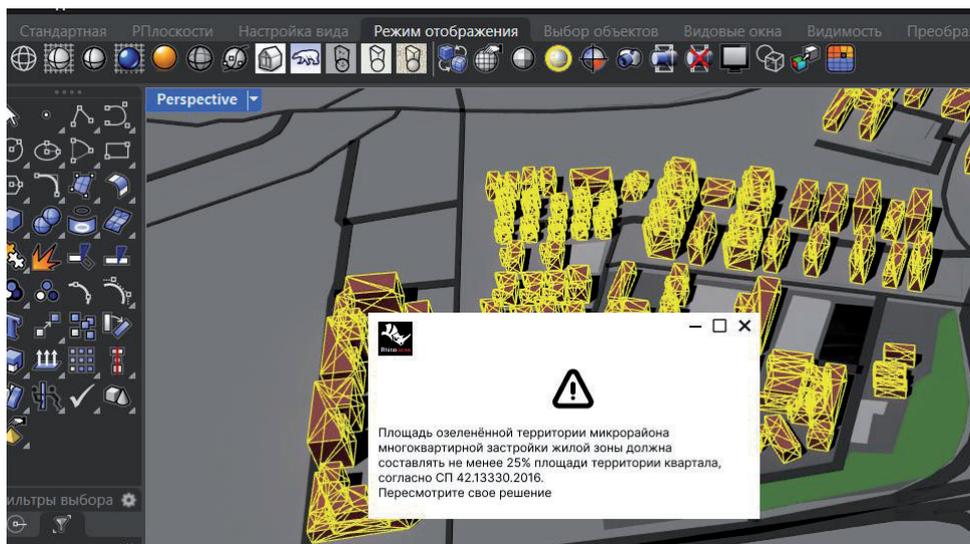


Рисунок 5 – Визуальное представление результатов анализа проекта в среде проектирования *Rhinoceros*

Заключение

Представлен подход к формализации знаний и интеграции данных на этапах проектирования градостроительных объектов. Разработана модель в виде онтологии для поддержки задач градостроительного проектирования.

Предложен метод анализа градостроительных проектов с использованием ОМ, позволяющий автоматизировать процессы, связанные с проверкой создаваемой цифровой модели и сопутствующей проектной документацией. Программное решение в виде модуля среды *Rhinoceros* для анализа градостроительных объектов позволяет интегрировать разработанную онтологию с BIM-моделями, организовать обмен информацией между цифровыми моделями, внешними программами и проектировщиками, снизить трудоёмкость экспертизы.

Список источников

- [1] **Оглоблин В.А.** Современные принципы градостроительной политики // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 6-1(57). С.227-229. DOI:10.24412/2500-1000-2021-6-1-227-229.
- [2] **Савинкин В.В., Дорофеева А.А.** Методы исследования и принципы проектирования городской среды. *Бизнес и дизайн ревью*. 2022. № 4(28). С.87-100.
- [3] **Верхоланцева Ю.Д.** Обзор практических методов поддержки принятия решений в управлении социально-экономическим развитием региона. *Умная цифровая экономика*. 2022. № 2(4). С.31-40.
- [4] **Анопченко Т.Ю., Трухачев С.Ю., Мурзин А.Д.** Система интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению городской средой / Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019 (17-20 июня 2019 г., Москва, Россия). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С.1864-1868. DOI:10.25728/vspu.2019.1864.
- [5] **Marcher C., Giusti A., Matt D.T.** Decision Support in Building Construction: A Systematic Review of Methods and Application Areas. *Buildings*. 2020. Vol. 10(10):170. DOI:10.3390/buildings10100170.
- [6] **Хорошевский В.Ф.** Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.429-448. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [7] **Авдошин С.М., Шатилов М.П.** Онтологический инжиниринг. *Бизнес-информатика*. 2007. № 2. С.3-13.
- [8] **Денисов Д.В., Журавлев М.Ю., Медведева Н.Ю., Журавлева Т.Д.** Онтологические модели освоения городских территорий с позиций прикладной культурологии. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №3(49). С.380-391. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-3-380-391.
- [9] **Detoly F., Kim K-Y., Horváth I.** Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design: deriving models based on ontologies for supporting engineering design. *Journal of Engineering Design*. 2019. Vol.30(10-12). P.405-416. DOI:10.1080/09544828.2019.1633626.

- [10] **Teller J., Keita A.K., Roussey C., Laurini R.** Urban Ontologies for an improved communication in urban civil engineering projects. *Cybergeo: European Journal of Geography*. 2007. Vol. 386. DOI:10.4000/cybergeo.8322.
- [11] **Caglioni M., Rabino G.A.** Theoretical approach to urban ontology: a contribution from urban system analysis // *Ontologies for Urban Development. Studies in Computational Intelligence*. 2007. Vol.61. P.109-119. DOI:10.1007/978-3-540-71976-2_10.
- [12] **Barton J., Yu H.** URBANIT - Urban Ontologies to Support Informed Urban Development and Planning // In: *Proceedings of the International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD-2010)*. 2010. P.224-228. DOI:10.5220/0003087202240228.
- [13] **Berta M., Caneparo L., Montuori A., Rolfo D.** Semantic urban modelling: Knowledge representation of urban space. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2016. Vol. 43(4). P.610-639. DOI:10.1177/0265813515609820.
- [14] **Борзест Н.М.** Социально-экономический эффект онтологического анализа при создании информационных систем. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, № 1(39). С.35-50. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-35-50.
- [15] **Горлов Д.А., Рашевский Н.М., Дятлов К.А., Залинян А.К., Щербаков А.Г.** Применение онтологической модели представления знаний в проектировании архитектурных объектов. *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2022. №6 (61). С.22-25.
- [16] **Hitzler P., Lehmann J., Polleres A.** Logics for the Semantic Web // *Handbook of the History of Logic*. 2014. Vol.9. P.679-710. DOI:10.1016/B978-0-444-51624-4.50016-2.
- [17] **Гориков С.** Введение в онтологическое моделирование: ревизия 2.4. ООО «ТриниДата», 2018. 150 с.

Сведения об авторах



Щербаков Артём Геннадьевич, 2000 г. рождения. Окончил ВолгГТУ в 2024 г. Ассистент кафедры «Цифровые технологии в урбанистике, архитектуре и строительстве» (ЦТУАС) ВолгГТУ. В списке научных трудов более 30 работ, в т.ч. в области онтологического инжиниринга и проектирования высоконагруженных систем. ORCID: 0009-0009-1008-9639; Author ID (РИНЦ): 1181934; Author ID (Scopus): 57802327000. artem.shcherbakov01@gmail.com.

Садовникова Наталья Петровна, 1967 г. рождения. Окончила Волгоградский государственный университет в 1990 г., д.т.н. (2014). Профессор кафедры ЦТУАС ВолгГТУ. В списке научных трудов более 200 работ в области анализа данных, компьютерного моделирования, создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений. ORCID: 0000-0002-7214-9432; Author ID (РИНЦ): 427120; Author ID (Scopus): 57210403332; Researcher ID (WoS): M-1564-2015. npsn1@ya.ru.



Парыгин Данила Сергеевич, 1984 г. рождения. Окончил ВолгГТУ в 2008 г., к.т.н. (2013). Заведующий кафедрой ЦТУАС ВолгГТУ. В списке научных трудов более 200 работ в области поддержки принятия решений на основе данных в задачах управления развитием сложных территориально-распределённых систем. ORCID: 0000-0001-8834-5748; Author ID (РИНЦ): 842349; Author ID (Scopus): 55913072300; Researcher ID (WoS): A-9781-2016. dparrygin@gmail.com. ✉.

Рашевский Николай Михайлович, 1991 г. рождения. Окончил ВолгГТУ в 2014 г., к.т.н. (2019). Доцент кафедры ЦТУАС ВолгГТУ. В списке научных трудов более 60 работ в области методов интеллектуального анализа данных, вычислительных экспериментов на моделях окружающей среды. ORCID: 0000-0002-8076-4187; Author ID (РИНЦ): 791634; Author ID (Scopus): 57190966857; Researcher ID (WoS): AAG-7764-2019. rashevsky.n@gmail.com.



Гуртяков Александр Сергеевич, 1987 г. рождения. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ в 2010 г., к.т.н. (2013). Доцент кафедры ЦТУАС ВолгГТУ. В списке научных трудов более 30 работ в области методов интеллектуального анализа данных и автоматизации бизнес-процессов. ORCID: 0000-0002-8013-5778; Author ID (РИНЦ): 1026582; Author ID (Scopus): 55801801100. agurtyakov@gmail.com.

Поступила в редакцию 28.09.2024, после рецензирования 12.04.2025. Принята к публикации 11.06.2025.



Intelligent support for the analysis of urban development projects based on ontology

© 2025, A.G. Shcherbakov, N.P. Sadovnikova, D.S. Parygin ✉,
N.M. Rashevskiy, A.S. Gurtyakov

Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia

Abstract

The design of urban development projects relies on approaches that involve the creation of new methods for knowledge extraction and representation. These approaches enable the adaptation of digital models to changing conditions and facilitate the coordination of interdisciplinary requirements. This article addresses the formalization of knowledge related to building structure types, regulatory standards, operational conditions, and other data that must be considered in urban development processes. Based on an analysis of design workflows and regulatory and reference documentation, an ontology has been developed to support the evaluation of urban development projects. The article proposes a method for analyzing such projects that integrates data from informational, geometric, and ontological models to verify the compliance of digital models and design documentation with relevant norms and standards. The method is applicable across a wide range of urban development projects; its use depends on the completeness of the databases and rule sets involved. The software implementation of the proposed method reduces the labor intensity of project review and contributes to improving the overall quality of urban development outcomes.

Keywords: decision support, knowledge representation model, urban development project, ontologies, design.

For citation: Shcherbakov AG, Sadovnikova NP, Parygin DS, Rashevskiy NM, Gurtyakov AS. Intelligent support for the analysis of urban development projects based on ontology [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(3): 436-448. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-436-448.

Financial support: The study was carried out with the support of the Center for Digital Scientific and Educational Projects and Developments in the Field of Industrial Artificial Intelligence (C2RED-AI) of Volgograd State Technical University, created as part of the implementation of top-level educational programs in the field of artificial intelligence (Agreement No. 70-2025-000756).

Acknowledgment: The authors express their gratitude to their colleagues from the Department of Digital Technologies in Urban Studies, Architecture and Construction of Volgograd State Technical University, who took part in the work.

Authors' contribution: Shcherbakov A.G. conducted a study of the application of the ontological approach. Sadovnikova N.P. developed a method for analyzing urban development projects using an ontological model. Parygin D.S. formulated the research problem and formulated an approach to its implementation. Rashevskiy N.M. proposed an approach to formalizing knowledge to support urban development design. Gurtyakov A.S. prepared and analyzed examples of the practical application of the developed approach.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and table

- Figure 1 - Stages of the urban development design process using digital models
- Figure 2 - Conceptual knowledge model for the analysis of urban development projects in IDEF5 notation (fragment)
- Figure 3 - Ontology class hierarchy (fragment)
- Figure 4 - Diagram of components of the urban development project analysis system
- Figure 5 - Visual representation of project analysis results in the *Rhinoceros* design environment
- Table 1 - Examples of SWRL rules
- Table 2 - Verification of model parameter compliance with ontology rules
- Table 3 - Examples of SPARQL queries and the result of the verification

References

- [1] **Ogloblin VA.** Modern principles of urban development policy [In Russian]. *Int. J. of Humanities and Natural Sciences.* 2021; 6-1(57): 227-229. DOI:10.24412/2500-1000-2021-6-1-227-229.
- [2] **Savinkin VV, Dorofeeva AA.** Research methods and principles of urban environment design [In Russian]. *Business and design review.* 2022; 4(28): 87-100.
- [3] **Verkholantseva YuD.** Review of practical methods for supporting decision-making in managing the socio-economic development of a region [In Russian]. *Smart digital economy.* 2022; 2(4): 31-40.
- [4] **Anopchenko TYu, Trukhachev SYu, Murzin AD.** Intelligent decision support system for urban environment management [In Russian]. In: Collection of papers of the XIII All-Russian Conference on Management Problems VSPU-2019 (Moscow, Russia, 2019, June 17-20). Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences; 2019: 1864-1868. DOI:10.25728/vspu.2019.1864.
- [5] **Marcher C, Giusti A, Matt DT.** Decision Support in Building Construction: A Systematic Review of Methods and Application Areas. *Buildings.* 2020; 10(10):170. DOI:10.3390/buildings10100170.
- [6] **Khoroshevsky VF.** Ontology driven software engineering: models, methods, implementations [In Russian]. *Ontology of designing.* 2019; 4(34): 429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [7] **Avdoshin SM, Shatilov MP.** Ontological engineering [In Russian]. *Business informatics.* 2007; 2: 3-13.
- [8] **Denisov DV, Zhuravlev MYu, Medvedeva NYu, Zhuravleva TD.** Ontological models of the development of urban areas from the standpoint of applied cultural studies [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 3(49): 380-391. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-3-380-391.
- [9] **Demoly F, Kim K-Y, Horváth I.** Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design: deriving models based on ontologies for supporting engineering design. *J. of Engineering Design.* 2019; 30(10-12): 405-416. DOI:10.1080/09544828.2019.1633626.
- [10] **Teller J, Keita AK, Roussey C, Laurini R.** Urban Ontologies for an improved communication in urban civil engineering projects. *Cybergeog: European Journal of Geography.* 2007; 386. DOI:10.4000/cybergeog.8322.
- [11] **Caglioni M., Rabino G.A.** Theoretical approach to urban ontology: a contribution from urban system analysis. *Ontologies for Urban Development. Studies in Computational Intelligence.* 2007; 61: 109-119. DOI:10.1007/978-3-540-71976-2_10.
- [12] **Barton J, YuH.** URBANIT - Urban Ontologies to Support Informed Urban Development and Planning. In: Proc. of the Int. Con. on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD-2010). 2010: 224-228. DOI:10.5220/0003087202240228.
- [13] **Berta M, Caneparo L, Montuori A, Rolfo D.** Semantic urban modelling: Knowledge representation of urban space. *Environment and Planning B: Planning and Design.* 2016; 43(4): 610-639. DOI:10.1177/0265813515609820.
- [14] **Borgest NM.** Socio-economic effect of ontological analysis when creating information systems [In Russian]. *Ontology of designing.* 2021; 1(39): 35-50. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-35-50.
- [15] **Gorlov DA, Rashevsky NM, Dyatlov KA, Zalinyan AK, Shcherbakov AG.** Application of an ontological model of knowledge representation in the design of architectural objects [In Russian]. *Natural and man-made risks. Safety of structures.* 2022; (61): 22-25.
- [16] **Hitzler P, Lehmann J, Polleres A.** Logics for the Semantic Web. *Handbook of the History of Logic.* 2014; 9: 679-710. DOI:10.1016/B978-0-444-51624-4.50016-2.
- [17] **Gorshkov S.** Introduction to Ontological Modeling: Revision 2.4 [In Russian]. TriniData LLC; 2018. 150 p.

About the authors

Artem Gennadievich Shcherbakov (b. 2000) graduated from the VSTU in 2024. He is an assistant at the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering at VSTU. He is a co-author of more than 30 scientific articles and abstracts, including in the field of ontological engineering and design of high-load systems. ORCID: 0009-0009-1008-9639; Author ID (RSCI): 1181934; Author ID (Scopus): 57802327000. artem.shcherbakov01@gmail.com.

Natalia Petrovna Sadovnikova (b. 1967) graduated from Volgograd State University in 1990, D. Sc. Eng. (2014). She is a professor at the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering of VSTU. She is a co-author of more than 200 scientific articles and abstracts in the field of data analysis, computer modeling, and the creation of intelligent decision support systems. ORCID: 0000-0002-7214-9432; Author ID (RSCI): 427120; Author ID (Scopus): 57210403332; Researcher ID (WoS): M-1564-2015. npsn1@ya.ru.

Danila Sergeevich Parygin (b. 1984) graduated from the VSTU in 2008, PhD (2013). He is the Head of the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering at VSTU. He is a co-author of more than

200 scientific articles and abstracts in the field of data-based decision support in the tasks of managing the development of complex geographically distributed systems. ORCID: 0000-0001-8834-5748; Author ID (RSCI): 842349; Author ID (Scopus): 55913072300; Researcher ID (WoS): A-9781-2016. *dparygin@gmail.com*. ✉.

Nikolay Mikhailovich Rashevskiy (b. 1991) graduated from the VSTU in 2014, PhD (2019). He is an associate professor at the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering of VSTU. He is a co-author of more than 60 scientific articles and abstracts in the field of data mining methods, decision support, computational experiments on environmental models. ORCID: 0000-0002-8076-4187; Author ID (RSCI): 791634; Author ID (Scopus): 57190966857; Researcher ID (WoS): AAG-7764-2019. *rashevsky.n@gmail.com*.

Alexander Sergeevich Gurtyakov (b. 1987) graduated from the National Research Nuclear University MEPhI in 2010, PhD (2013). He is an associate professor at the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering of VSTU. He is a co-author of more than 30 articles and abstracts in the field of data mining methods and business process automation. ORCID: 0000-0002-8013-5778; Author ID (RSCI): 1026582; Author ID (Scopus): 55801801100. *agurtyakov@gmail.com*.

Received September 28, 2024. Revised April 12, 2025. Accepted June 11, 2025.



Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла

© 2025, С.В. Доронин ✉, Ю.Ф. Филиппова

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск, Россия

Аннотация

Рассматривается вариант интеллектуальной поддержки жизненного цикла повреждаемых стержневых систем, а именно, информационное обеспечение принятия решений в слабоструктурированных ситуациях на стадии эксплуатации. Эти ситуации характеризуются необходимостью обоснования технических решений в сжатые сроки при отсутствии знаний о напряжённом состоянии и остаточной несущей способности повреждённой конструкции. Информационное обеспечение заключается в получении априорных данных о состоянии конструкции в случае разрушения каждого из её структурных элементов и сводится к построению цифровых моделей напряжённого состояния повреждаемой конструкции. Для типовой слабоструктурированной ситуации определено содержание задач принятия решений, каждой из которых поставлены в соответствие вопросы, требующие ответа. Эти вопросы обуславливают требования к содержанию цифровых моделей повреждаемых стержневых систем. Снижение неопределённости в слабоструктурированной ситуации осуществляется путём выполнения последовательности действий «оценка ситуации → анализ содержания задач принятия решений → формулировка вопросов и обоснование требований к цифровым моделям → многовариантное вычислительное моделирование и построение цифровых моделей для информационного обеспечения решений». Построение цифровых моделей предшествует эксплуатации стержневых систем и осуществляется путём многовариантного вычислительного моделирования разрушения структурных элементов и анализа его влияния на напряжённое состояние конструкции. Новизна заключается в том, что для повреждаемых стержневых конструкций установлено однозначное соответствие между задачами принятия решений относительно возможности их безопасной эксплуатации и технологиями имитации разрушения структурных элементов.

Ключевые слова: цифровые модели, вычислительный эксперимент, стержневые системы, интеллектуальная поддержка решений, жизненный цикл, безопасность эксплуатации.

Цитирование: Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.449-458. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Вклад авторов: Доронин С.В. – концепция построения и использования цифровых моделей поведения конструкций для поддержки жизненного цикла. Филиппова Ю.Ф. – обоснование и компьютерная реализация технологий имитации разрушения структурных элементов стержневых систем.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В настоящее время общепризнана фактическая невозможность обеспечения безотказности технических объектов в течение их жизненного цикла (ЖЦ). Это связано с протеканием естественных деградиционных процессов накопления повреждений [1], невозможностью учёта на стадии проектирования всех возможных воздействий и событий, оказывающих влияние на работоспособность объектов, исключения дефектов конструкционных материалов при изготовлении [2]. Под повреждаемыми понимаются конструкции, в которых на стадии

эксплуатации нарушаются условия прочности, возникает, развивается и завершается процесс разрушения, в результате чего конструкция становится повреждённой. Свойства конструкций в повреждённом состоянии слабо изучены и высока опасность непрогнозируемого их поведения, приводящего к нарушению работоспособности, в т.ч. к тяжёлым авариям и катастрофам. В связи с этим актуальны исследования, направленные на изучение свойств повреждаемых конструкций и возможностей включения этих результатов в информационную поддержку ЖЦ технических объектов. Создание цифровых моделей (ЦМ) позволяет осуществлять систематизацию и хранение данных о свойствах повреждаемых конструкций с учётом дискретности принимаемых во внимание факторов и накопленных повреждений.

В настоящей работе для стержневых систем рассматривается взаимосвязь способов имитации разрушения структурных элементов и типов задач, решаемых в течение ЖЦ объектов. От способа имитации разрушения структурных элементов зависит объём и достоверность оценок свойств повреждённых конструкций, что предопределяет возможность использования этих результатов для информационной поддержки задач управления их ЖЦ.

1 Взаимосвязь цифровых моделей и ситуаций принятия решений

Необходимость анализа поведения повреждаемых стержневых систем (ПСС) возникает на стадии их эксплуатации. Информационное обеспечение принятия решений с использованием предварительно подготовленных ЦМ основано на получении решения сложных ресурсоёмких задач анализа напряжённо-деформированного состояния ПСС до момента необходимости использования ЦМ. Эффективность применения ЦМ для информационной поддержки оценки уровня накапливаемых повреждений на стадии эксплуатации показана, например, в [3]. Информационная поддержка принятия решений с использованием заранее подготовленных ЦМ применяется для управления ЖЦ гидроагрегатов [4].

Взаимосвязь ЦМ и ситуаций принятия решений показана на рисунке 1.

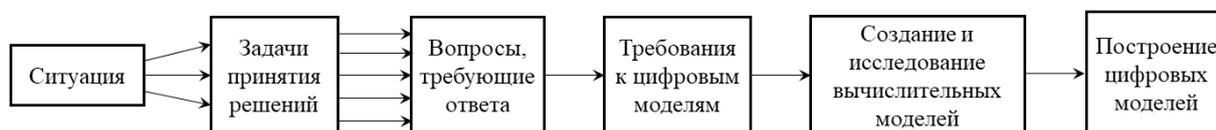


Рисунок 1 – Взаимосвязь цифровых моделей и ситуаций принятия решений

В ситуации принятия решения возникает ряд задач, которые определяют целесообразность одного из альтернативных вариантов действий. Решению этих задач предшествуют формулировка перечня вопросов и содержания ответов на них, а также требований к ЦМ, которые должны обеспечивать получение необходимых ответов. Эти ответы получают путём создания и применения соответствующих ЦМ. Результаты исследований ЦМ могут быть многократно использованы в ситуации быстрого принятия решений в практических задачах.

В качестве одной из типовых ситуаций для ПСС рассматривается разрушение структурного элемента стержневой системы. Для формализации определены следующие множества.

Множество задач принятия решений $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ содержит три элемента: оценка работоспособности повреждённой конструкции (a_1), оценка необходимости ремонтно-восстановительных работ (a_2), определение сценария аварийного разрушения (a_3).

Множество $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ включает в себя следующие вопросы:

- каковы напряжённое состояние и остаточная прочность конструкции при статическом нагружении? (b_1);
- каковы пиковые напряжения и характер колебаний при динамическом нагружении? (b_2);
- каков характер переходного процесса в момент разрушения стержня и не влечёт ли он каскад разрушений других структурных элементов? (b_3);
- необходимо ли удалять фрагменты разрушенного стержня? (b_4);

- необходимо ли восстанавливать целостность разрушенного стержня? (b_5).

Для ответов на эти вопросы необходимо получить информацию о напряжённом состоянии повреждаемой конструкции. В связи с этим в множество $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$ включены следующие требования к содержанию ЦМ – характеристики напряжённого состояния конструкции при:

- статическом нагружении с учётом изменения жёсткости вследствие разрушения стержня (c_1);
- статическом нагружении с учётом изменения жёсткости и массы вследствие удаления фрагментов разрушившегося стержня (c_2);
- динамическом нагружении с учётом изменения жёсткости вследствие разрушения стержня (c_3);
- динамическом нагружении с учётом изменения жёсткости и массы вследствие удаления фрагментов разрушившегося стержня (c_4);
- импульсном нагружении вследствие мгновенного разрушения стержня (c_5).

В предположении, что каждому требованию соответствует своя ЦМ напряжённого состояния, множество D , так же как и множество C , состоит из пяти элементов: $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$. Каждая ЦМ в общем случае представляет собой структурированный массив максимальных эквивалентных напряжений σ_{ij} в i -м стержне при разрушении j -го стержня: $d = (\sigma_{ij})$, $i=1, n$, $j=1, n$, где n – количество стержней в системе.

Соответствие между рассматриваемыми множествами (рисунок 2) конкретизирует общий вид взаимосвязи (рисунок 1) для ПСС.

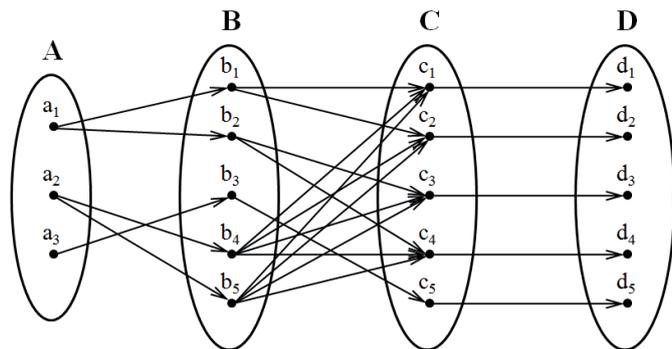


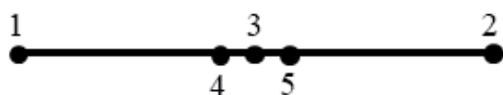
Рисунок 2 – Соответствия между множествами

2 Имитация разрушения структурных элементов стержневых систем

Для выполнения требований (множество C) к содержанию ЦМ (множество D) на стадии их создания и исследования необходимо использование аппарата, позволяющего отразить особенности поведения ПСС в момент разрушения её структурного элемента и в период после разрушения. Для анализа поведения ПСС используются методы механики деформируемого твёрдого тела, геометрические модели, создаваемые в программных комплексах автоматизированного проектирования (*CAD*-пакетах), и численные (конечно-элементные, КЭ) модели, создаваемые в программных системах инженерного анализа.

Возможно применение двух технологий моделирования разрушения стержней: удаление стержня целиком из расчётной схемы (модели) [5-10]; его виртуальное рассечение в поперечном сечении, путём модифицирования геометрической модели (разрезание стержня) средствами используемого *CAD*-пакета или применением к КЭ модели универсальной вычислительной технологии «рождения и смерти элементов» (РСЭ)¹ [11, 12]. Технология РСЭ применяется для моделирования разрушения и повреждения различной природы [11-15] и изменения конфигурации технического объекта при его создании [16]. Она заключается в мгновенном изменении (увеличении при «рождении» или уменьшении при «смерти») жёсткости КЭ. При мгновенном уменьшении жёсткости в «разрушаемом» сечении стержня (одном или нескольких КЭ) он остаётся в КЭ модели (сохраняя неизменным распределение массы), но перестаёт сопротивляться деформациям (что равносильно исключению из силовой схемы).

¹ANSYS 2022R1 Documentation. Houston: SAS Inc., 2022.



1, 2 – концевые точки стержня; 3 – точка «разрезания» стержня, 4, 5 – узловые точки конечного или структурного элемента с уменьшенным значением модуля Юнга

Рисунок 3 – Схема модификации разрушаемого структурного элемента

Указанные технологии поясняются следующей схемой (рисунок 3). Первоначально целостный структурный элемент ограничен точками 1 и 2. Анализ конструкции с удалённым стержнем предполагает исключение стержня 1-2; с рассечённым стержнем – замену стержня 1-2 парой стержней 1-3 и 3-2 с разрывом связи в точке 3. По технологии РСЭ возможны следующие варианты. В разрушаемом сечении стержня 1-2 генерируется «умирающий» КЭ 4-5 с пониженным модулем Юнга. В некоторых случаях возникает

необходимость имитировать технологию РСЭ на геометрической модели. Тогда исходный стержень 1-2 разделяется на три стержня 1-4, 4-5 и 5-2 с заданием для стержня 4-5 свойств материала с уменьшенным модулем Юнга.

Эти технологии могут быть применены к различным типам моделей конструкции: удаление и разрезание стержня возможно только в геометрической (до начала процесса решения), применение технологии РСЭ – в КЭ модели непосредственно в процессе решения задачи.

3 Схема построения цифровых моделей повреждаемых стержневых систем

В настоящем исследовании предполагается работа конструкционного материала в упругой стадии деформирования (запасы прочности неповреждённой конструкции соответствуют нормам проектирования, разрушение стержня является хрупким), что позволяет не учитывать влияние фактора физической нелинейности материала на выбор технологий анализа. Перемещения, возникающие при разрушении стержней, априори не могут считаться малыми, что требует учёта геометрической нелинейности. Разрушение стержней означает изменение расчётной модели конструкции, что является конструктивной (структурной) нелинейностью.

Рассматриваемый тип конструктивной нелинейности порождает динамический процесс, который не может быть исследован в статической постановке. Однако возможно исследование конструкции после завершения динамического процесса, т.е. в статической постановке возможен анализ повреждённых конструкций. Варианты учёта конструктивной нелинейности при построении ЦМ ПСС показаны на рисунке 4.

Геометрически нелинейный статический силовой анализ повреждённой конструкции при разрезании стержня учитывает изменение только жёсткости ПСС и обеспечивает выполнение элемента c_1 множества требований к ЦМ. Этот вариант даёт адекватный физическому состоянию конструкции результат после разрушения стержня (остающегося в ПСС), порождающего дополнительные силовые факторы от изгиба фрагментов разрушившегося стержня.

Геометрически нелинейный статический силовой анализ повреждённой конструкции при удалении стержня учитывает изменение массы и жёсткости ПСС и обеспечивает выполнение элемента c_2 множества требований к ЦМ. Этот вариант соответствует состоянию ПСС после физического удаления фрагментов разрушившегося стержня.

Геометрически нелинейный анализ вынужденных колебаний повреждённой конструкции при удалении и разрезания стержня учитывает изменение отклика вследствие изменения динамических характеристик из-за уменьшения массы и жёсткости (выполнение требования c_4) или только жёсткости (выполнение требования c_3) повреждённой конструкции.

Геометрически и структурно нелинейный анализ переходных процессов ПСС обеспечивает анализ её поведения в момент разрушения и непосредственно после него. Получаемые результаты соответствуют элементу c_5 множества требований к ЦМ.

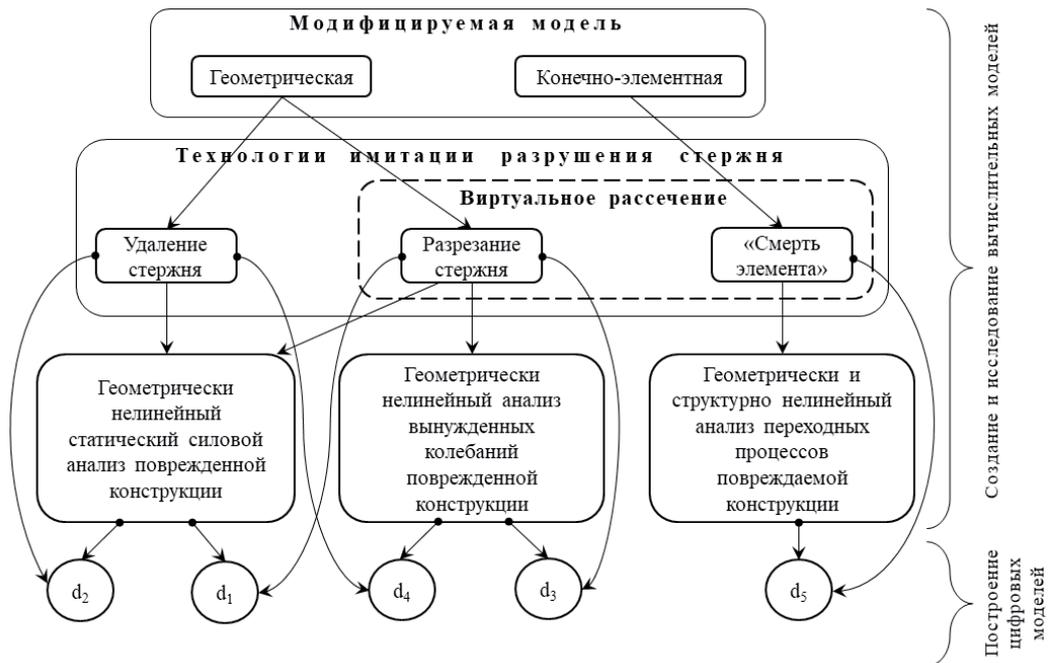


Рисунок 4 – Схема построения цифровых моделей повреждаемых стержневых систем

Таким образом, ЦМ можно рассматривать как продукт систематизации результатов, полученных с использованием рассмотренных технологий имитации разрушенных структурных элементов и выбираемых в связи с необходимостью быстрого получения ответов на заранее сформулированный перечень вопросов.

4 Численный пример

В качестве модельной задачи рассматривается стальная пространственная стержневая система рамного типа с жёсткой заделкой в четырёх точках. Система содержит 34 стержня (рисунок 5а), каждый из которых может быть разрушен. Статическая нагрузка представлена собственным весом G , динамическая – боковым ветром, скорость которого предполагается случайной величиной со значением, характерным для местности размещения конструкции (рисунок 5б). В качестве такого значения принята скорость $v = 25$ м/с.

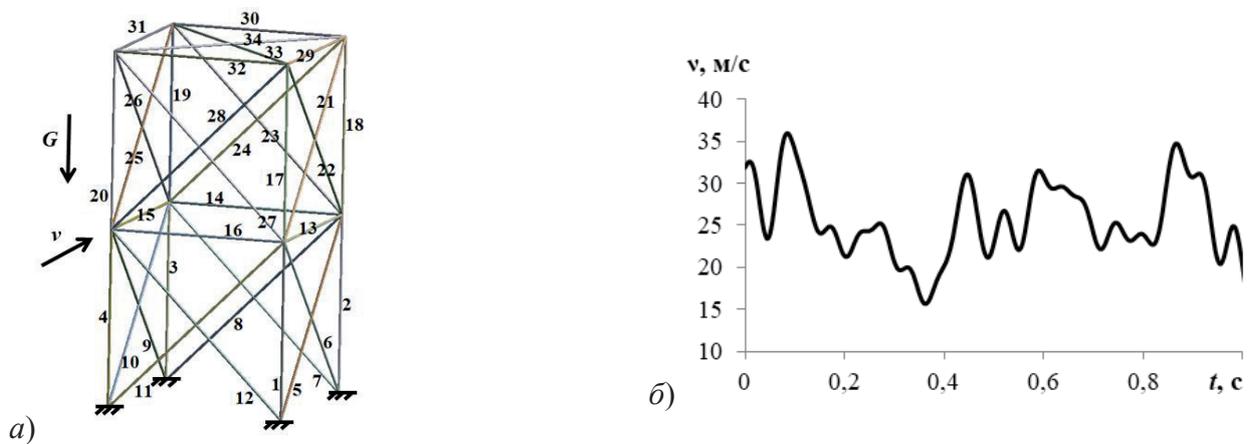


Рисунок 5 – Схема модельной задачи: а) конфигурация стержневой системы; б) характерный фрагмент изменения скорости ветра v

Компьютерное моделирование динамического нагружения ветром выполнено следующим образом. Статистические исследования [17] скорости ветра независимо от географического расположения местности, высоты над поверхностью почвы и особенностей ландшафта показали, что адекватной вероятностной моделью является закон Вейбулла с функцией распределения

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{g}\right)^h\right),$$

где g – параметр масштаба; h – параметр формы.

Установлено [17], что в большинстве случаев параметр формы близок к 2. Известно [18], что для распределения Вейбулла математическое ожидание случайной величины определяется с использованием гамма-функции Γ как $\bar{v} = g \cdot \Gamma((h+1)/h)$. Тогда из равенства $\bar{v} = 25 = g \cdot \Gamma((2+1)/2)$ можно найти значение параметра масштаба $g = 25/\Gamma(1,5) \approx 28,1$.

Случайные числа для распределения Вейбулла W : g, h получаются из случайных чисел для равномерного распределения R на интервале $[0,1]$ с помощью соотношения [18]: $W: g, h \rightarrow g \cdot (-\log R)^{1/h}$. Фрагмент сгенерированной таким образом временной зависимости скорости ветра $v = f(t)$ показан на рисунке 5б.

Давление воздушного потока p (Па) в связи со скоростью ветра v (м/с) определяется известным выражением $p = \rho v^2/2$ (ρ – плотность воздуха, кг/м³). В каждый момент времени это давление приложено ко всем стержневым элементам ПСС с учётом угла их наклона по отношению к направлению ветра.

Выполнено пять серий вычислительных экспериментов (каждая серия – отдельная ЦМ), в ходе которых осуществлена имитация разрушения каждого структурного элемента с определением максимальных напряжений σ_{ij} во всех элементах (в т.ч. в разрушенном, если он не удаляется из ПСС). Вычисления выполнены в геометрически нелинейной постановке с использованием пакета КЭ анализа ANSYS: цифровые модели d_1, d_2 получены в модуле *Static Structural*, d_3, d_4, d_5 – в модуле *Transient Structural*. Визуализация цифровых моделей в виде набора таблиц показана на рисунке 6.

Каждый столбец в таблице соответствует i -му структурному элементу модельной конструкции, каждая строка – разрушению j -го структурного элемента. Каждая ячейка таблицы содержит значение эквивалентного напряжения σ_{ij} : например, для ЦМ d_5 в процессе разрушения третьего структурного элемента ($j = 3$) во втором структурном элементе ($i = 2$) максимальные эквивалентные напряжения составляют $\sigma_{23} = 55$ МПа.

Сравнение значений σ_{ij} с величиной временного сопротивления конструкционного материала σ_b представляет собой известный критерий прочности $\sigma_{ij} < \sigma_b$. Возможны два варианта результата оценки: $\sigma_{ij} < \sigma_b$ – прочность обеспечена; $\sigma_{ij} \geq \sigma_b$ – не обеспечена.

Использование полученных ЦМ совместно с критерием прочности в случае разрушения j -го структурного элемента позволяет принять решение о работоспособности повреждённой конструкции (работоспособна, если $\sigma_{ij} < \sigma_b, i = 1, n$), необходимости ремонтно-восстановительных работ (необходимы, если $\sigma_{ij} \geq \sigma_b, i = 1, n$), возможности возникновения каскадных разрушений конструкции (возможны, если $\sigma_{ij} \geq \sigma_b, i = 1, n$). Для принятия решения необходимо извлечение из имеющихся ЦМ значений σ_{ij} и установление одного из двух вариантов выполнения критерия прочности.

Таким образом, построенные ЦМ, обеспечивая исходные данные для анализа условий прочности элементов ПСС, позволяют получить быстрые и достоверные ответы на вопросы множества B и обосновать решения задач множества A .

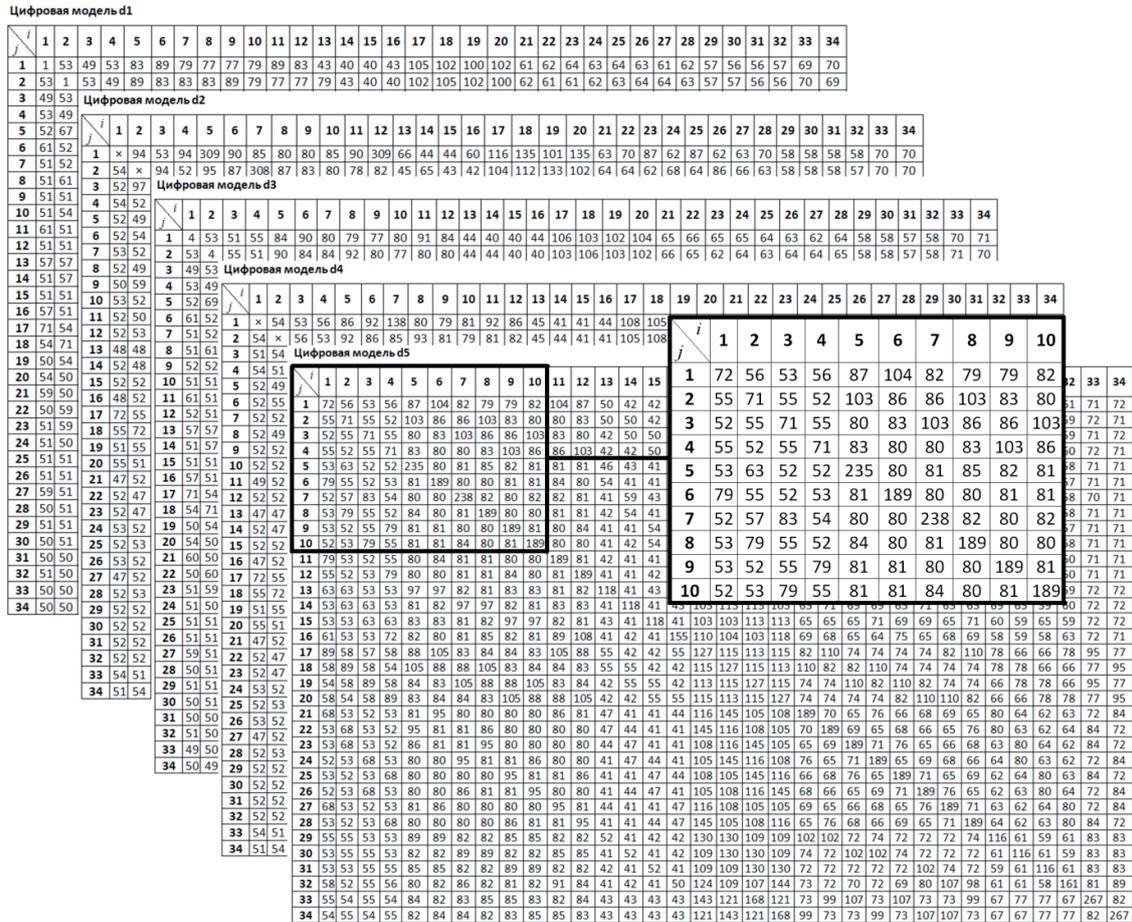


Рисунок 6 – Визуализация цифровых моделей напряжённого состояния повреждаемой конструкции

Заключение

В статье рассмотрен частный случай ПСС, характеризующийся хрупким разрушением отдельных структурных элементов. Предпосылкой построения ЦМ таких систем послужила декомпозиция проблемы принятия решений, касающихся повреждаемой конструкции, и представление её в виде группы трёх задач, для каждой из которых установлена однозначная взаимосвязь с технологиями имитации разрушения стержневых элементов и соответствующих вычислительных моделей. Полученные на этой основе ЦМ представляют собой результат интеллектуальной деятельности, выраженный в законченной самостоятельной форме. Это позволяет считать использование таких ЦМ интеллектуальной поддержкой эксплуатации как одной из стадий ЖЦ ПСС.

Список источников

- [1] *Берман А.Ф.* Деградация механических систем. Новосибирск: Наука, 1998. 320 с.
- [2] *Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П.* Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.
- [3] *Рейзмунт Е.М., Доронин С.В.* Цифровые модели нагруженности прецизионной зеркальной антенны для интеллектуальной поддержки стадии эксплуатации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. №2. С.53-60. DOI: 10.38028/ESI.22.2.005.
- [4] *Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В.* Цифровой двойник гидроагрегата: новое или хорошо забытое старое? *Гидротехника*. 2021. №2. С.90-93.

- [5] **Потанов А.Н.** Анализ колебаний конструкций с выключающимися связями. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2017. Т.17, №1. С.38-48. DOI: 10.14529/build170105.
- [6] **Behnam B., Shojaei F., Ronagh H.R.** Seismic progressive-failure analysis of tall steel structures under beam-removal scenarios. *Frontiers of structural and civil engineering*, 2019. Vol.13, Iss.4. P.904-917. DOI: 10.1007/s11709-019-0525-7.
- [7] **Fu Q., Tan K.-H.** Numerical study on steel-concrete composite floor systems under corner column removal scenario. *Structures*. 2019. №21. P.33-44. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.003.
- [8] **Izzuddin B.A., Vlassiss A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.** Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: simplified assessment framework. *Engineering structures*. 2008. №30. P.1308-1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011.
- [9] **Li Z.-X., Zhong B., Shi Y., Ding Y., Hao Y.** A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures. *International journal of protective structures*. 2019. №10(3). P.330-358. DOI: 10.1177/2041419619854768.
- [10] **Naji A.** Comparison of column removal methods in progressive collapse analysis of reinforced concrete moment-resisting frames. *Practice periodical on structural design and construction*. 2019. №24(4). 10 p. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000435.
- [11] **Yang F., Yang J.** Analysis on the dynamic responses of the broken conductors in transmission lines. *Applied mechanics and materials*. 2011. Vol. 50-51. P.511-515. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.50-51.511.
- [12] **Zhang Z., Lin Y., Li H.** Wind-induced progressive collapsed performance of cut-type transmission tower-line system. *Applied mechanics and materials*. 2013. Vol. 353-356. P.2392-2396. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2392.
- [13] **Chen W., Ye J., Li X.** Thermal behavior of gypsum-sheathed cold-formed steel composite assemblies under fire conditions. *Journal of constructional steel research*. 2018. № 149. P.165-179.
- [14] **Tong L., Li S., Xiong J.** Material parameter modeling and solution technique using birth-death element for notched metallic panel repaired with bonded composite patch. *Chinese journal of aeronautics*. 2014. №27(2). P.445-452. DOI: 10.1016/j.cja.2013.07.031.
- [15] **Xu P., Zheng J.Y., Liu P.F.** Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels. *Materials and design*. 2009. №30. P.2295-2301. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.006.
- [16] **Zheng J.** Improved nonlinear analysis method and application of construction mechanics for steel structures. *Journal of engineering research*. 2018. № 6(3). P.16-33.
- [17] **Patel Mukund R.** Wind and Solar Power Systems. L.; N. Y.; Washington, D. C.: CRC Press, 1999. 348 p.
- [18] **Хастингс Н., Пикок Дж.** Справочник по статистическим распределениям. М.: Статистика, 1980. 95 с.

Сведения об авторах



Доронин Сергей Владимирович, 1963 г. рождения. Окончил Красноярский институт цветных металлов им. М.И. Калинина в 1985 г., к.т.н. (1994). Ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительной механики и риск-анализа Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. В списке научных трудов более 200 работ в области прикладной механики и вычислительного моделирования. Author ID (РИНЦ): 116272; Author ID (Scopus): 57193348323; Researcher ID (WoS): V-5470-2017. SDoronin@ict.nsc.ru ✉.

Филиппова Юлия Федоровна, 1987 г. рождения. Окончила Сибирский федеральный университет в 2010 г., к.т.н. (2020). Научный сотрудник лаборатории вычислительной механики и риск-анализа Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. В списке научных трудов около 30 работ. Author ID (РИНЦ): 633598; Author ID (Scopus): 57193351701. Researcher ID (WoS): A-9919-2014. FilippovaJF@ict.nsc.ru.



Поступила в редакцию 08.04.2025, после рецензирования 26.05.2025. Принята к публикации 12.06.2025.



Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle

© 2025, S.V. Doronin ✉, Yu. F. Filippova

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

The article explores an approach to intelligent support for the life cycle of damaged rod systems, focusing on information support for decision-making in poorly structured operational scenarios. Such situations are marked by the need to justify technical solutions within limited timeframes and in the absence of reliable data on the stress state and residual load-bearing capacity of the damaged structure. The proposed information support involves obtaining a priori data on the structural condition under hypothetical failures of individual elements. This is achieved by constructing digital models that represent the stress state of the damaged system. For a typical poorly structured situation, the specific content of the decision-making tasks is identified, with each task linked to a set of key questions that must be answered. These questions in turn define the requirements for the digital models of damaged rod systems. Uncertainty in such weakly structured scenarios is addressed through a stepwise process: “situation assessment → analysis of decision-making content → formulation of key questions and definition of requirements for digital models → multivariate computational modeling and creation of digital models for decision support.” The development of digital models is carried out in advance of system operation and involves computational simulation of the failure of individual structural elements, followed by analysis of their impact on the system's overall stress state. The novelty of the approach lies in establishing a clear correspondence between the tasks of assessing the safe operability of damaged rod structures and the technologies used to simulate the failure of their components.

Keywords: digital models, computational experiment, rod systems, intelligent decision support, life cycle, operational safety.

For citation: Doronin SV, Filippova YuF. Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 449-458. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.

Financial Support: 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.

Authors' Contributions: Doronin S.V. – development of the concept for constructing and applying digital models of structural behavior to support the life cycle of rod systems. Filippova Yu.F. – justification and computational implementation of technologies for simulating the failure of structural elements in rod system.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 - The relationship between digital models and decision-making situations

Figure 2 - Correspondences between sets

Figure 3 - Modification scheme of a destructible structural element: 1, 2 – end points of the rod; 3 – “cut” point of the rod; 4, 5 – nodal points of the finite or structural element with a reduced value of Young's modulus

Figure 4 - Scheme for constructing digital models of damaged rod systems

Figure 5 - Schematic diagram of the model problem: a) configuration of the rod system; b) a fragment of the wind speed v change

Figure 6 - Visualization of digital models of the stress state of a damaged model structure

References

- [1] *Berman AF*. Degradation of mechanical systems [In Russian]. Novosibirsk: Nauka; 1998. 320 p.
- [2] *Lepikhin AM, Makhutov NA, Moskvichev VV, Chernjaev AP*. Probabilistic risk analysis of technical system designs [In Russian]. Novosibirsk: Nauka; 2003. 174 p.

- [3] **Reizmunt EM, Doronin SV.** Digital models of precision reflector antenna loading for intelligent support of the operational stage [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management.* 2021; 2: 53-60. DOI: 10.38028/ESI.22.2.005.
 - [4] **Georgievskaja EV, Georgievskij NV.** Digital twin of a hydroelectric unit: new or well-forgotten old? [In Russian]. *Hydraulic engineering.* 2021; 2: 90-93.
 - [5] **Potapov AN.** Analysis of vibrations of structures with switching connections [In Russian]. *Bulletin of SUSU. Series: Construction and architecture.* 2017; 17(1): 38-48. DOI: 10.14529/build170105.
 - [6] **Behnam B, Shojaei F, Ronagh HR.** Seismic progressive-failure analysis of tall steel structures under beam-removal scenarios. *Frontiers of structural and civil engineering.* 2019; 13(4): 904-917. DOI: 10.1007/s11709-019-0525-7.
 - [7] **Fu Q, Tan K.-H.** Numerical study on steel-concrete composite floor systems under corner column removal scenario. *Structures.* 2019; 21: 33-44. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.003.
 - [8] **Izzuddin BA, Vlassiss AG, Elghazouli AY, Nethercot DA.** Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: simplified assessment framework. *Engineering structures.* 2008; 30: 1308-1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011.
 - [9] **Li Z.-X, Zhong B, Shi Y, Ding Y, Hao Y.** A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures. *International journal of protective structures.* 2019; 10(3): 330-358. DOI: 10.1177/2041419619854768.
 - [10] **Naji A.** Comparison of column removal methods in progressive collapse analysis of reinforced concrete moment-resisting frames. *Practice periodical on structural design and construction.* 2019; 24(4): 10 p. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000435.
 - [11] **Yang F, Yang J.** Analysis on the dynamic responses of the broken conductors in transmission lines. *Applied mechanics and materials.* 2011; 50-51: 511-515. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.50-51.511.
 - [12] **Zhang Z, Lin Y, Li H.** Wind-induced progressive collapsed performance of cut-type transmission tower-line system. *Applied mechanics and materials.* 2013; 353-356: 2392-2396. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2392.
 - [13] **Chen W, Ye J, Li X.** Thermal behavior of gypsum-sheathed cold-formed steel composite assemblies under fire conditions. *Journal of constructional steel research.* 2018; 149: 165-179.
 - [14] **Tong L, Li S, Xiong J.** Material parameter modeling and solution technique using birth-death element for notched metallic panel repaired with bonded composite patch. *Chinese journal of aeronautics.* 2014; 27(2): 445-452. DOI: 10.1016/j.cja.2013.07.031.
 - [15] **Xu P, Zheng JY, Liu PF.** Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels. *Materials and design.* 2009; 30: 2295-2301. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.006.
 - [16] **Zheng J.** Improved nonlinear analysis method and application of construction mechanics for steel structures. *Journal of engineering research.* 2018; 6(3): 16-33.
 - [17] **Patel Mukund R.** *Wind and Solar Power Systems.* L.; N. Y.; Washington, D. C.: CRC Press, 1999. 348 p.
 - [18] **Hastings NA., Peacock JB.** *Statistical distributions: a handbook for students and practitioners.* N.Y, Wiley, 1975. 130 p.
-

About the authors

Sergey Vladimirovich Doronin (b. 1963) graduated from the Krasnoyarsk Institute of Non-Ferrous Metals named after M.I. Kalinin (KICM) in 1985, PhD (1994). Leading Researcher of the Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies. He is a co-author of about 200 scientific articles and abstracts in the field of applied mechanics and computational modeling. Author ID (RSCI): 116272; Author ID (Scopus): 57193348323; Researcher ID (WoS): V-5470-2017. SDoronin@ict.nsc.ru. ✉

Yulia Fedorovna Filippova (b. 1987) graduated from the Siberian Federal University (SFU) in 2010, PhD (2020). Researcher at the Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies. He is a co-author of about 30 works. Author ID (RSCI): 633598; Author ID (Scopus): 57193351701. Researcher ID (WoS): A-9919-2014. FilippovaJF@ict.nsc.ru.

Received April 04, 2025. Revised May 26, 2025. Accepted June 12, 2025.

КИИ-2025

XXII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием

6-10 октября 2025 года

г. Санкт-Петербург, Университет ИТМО

Основные направления

- Инженерия знаний
- Интеллектуальный анализ данных
- Моделирование рассуждений
- Интеллектуальный анализ текстов
- Когнитивные исследования в ИИ, философские проблемы ИИ
- Нечёткие модели, мягкие измерения и вычисления, биоинспирированные методы
- Интеллектуальные агенты, роботы, компьютерное зрение
- Интеллектуализация авиакосмической отрасли
- Интеллектуальное управление и поддержка принятия решений
- Машинное обучение, нейросетевые методы, нейроинформатика
- Трансформеры и генеративные модели
- Инструментальные системы, фреймворки для создания интеллектуальных систем.
- Технологии проектирования и разработки интеллектуальных систем
- Прикладные интеллектуальные системы

Сайт конференции: <https://rcai2025.raai.org/>

Саммит по онтологии 2025¹

Концептуализация, анализ и формализация

Джанкарло Гиццарди.

Объяснение, семантика и онтология.

Майкл Грюнингер.

Наследники шестой проблемы Гильберта.

Барри Смит.

Модели, теории и онтологии.

Кен Баклавски.

Концептуализация предметных областей.

Джон Сова.

Создание онтологий.

Ойстейн Линнебо.

Конструктивная онтология и критерии идентичности.

Андреа Вестеринен.

Нарративы для повышения ситуационной осведомлённости с помощью онтологий.

Аликан Тузун.

За пределами слепых зон: как семантические стратегии раскрывают скрытые возможности в мире бизнеса.

OntologySummit2024²

Ontologies, Neuro-Symbolic and Generative AI Technologies Toward Trustworthy AI Systems

*Kenneth Baclawski, Michael Bennett, Gary Berg-Cross, Todd Schneider,
Ravi Sharma, Mark Underwood, Andrea Westerinen*

Abstract. This article is the Communiqué of the Ontology Summit 2024 which dealt with how ontologies and knowledge graphs can both aid and benefit from neuro-symbolic and generative AI technologies. The article synthesizes and summarizes the main points presented and discussed during the summit. Neuro-symbolic systems integrate neural networks with systems based on forms of logic applied to human-readable symbolic representations. The advantages and disadvantages of current neural network technologies and symbolic technologies are listed and found to be mostly complementary, thereby motivating the development of neuro-symbolic systems. Representative examples of applications are presented that combine semantic technologies with neuro-symbolic and generative AI technologies, which could help improve trustworthiness of AI systems. The risks and ethics associated with these systems are also presented.

¹ *OntologySummit2025.* <https://ontologyforum.com/index.php/OntologySummit2025>.

² *OntologySummit2024.* Коммюнике. <https://ontologyforum.s3.us-east-1.amazonaws.com/OntologySummit2024/Ontologies,+Neuro-Symbolic+and+Generative+AI+Technologies.pdf>.



**15TH INTERNATIONAL CONFERENCE
ON FORMAL ONTOLOGY IN INFORMATION SYSTEMS**
Catania, September 8-12, 2025
<https://www.dmi.unict.it/fois2025/>



The
International
Association for
Ontology and
its Applications

The University of Catania is proud to host the 15th edition of the **International Conference on Formal Ontology in Information Systems (FOIS)** and the **Joint Ontology Workshops Episode XI (JOWO) 2025**, the flagship conference and joint workshops of the International Association of Ontology and its Applications (IAOA).
<https://iaoa.org/>

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирский государственный университет,
Российская ассоциация искусственного интеллекта, Российская инженерная академия
Institute of Electrical and Electronics Engineers

X Международная конференция ЗНАНИЯ – ОНТОЛОГИИ – ТЕОРИИ

20–24 октября 2025 г.

Новосибирск

Тематика конференции:

- **Обнаружение закономерностей и извлечение знаний**, скрытых в структурированных и неструктурированных данных. Машинное обучение. Распознавание образов, анализ данных. Прогнозирование. Индуктивный вывод.
- **Систематизация знаний, построение теорий предметных областей**. Инженерия знаний. Управление знаниями. Извлечение знаний из текстов на естественном языке. Разработка онтологий предметных областей, технологии создания и применения онтологий. Разработка семантических и онтологических моделей предметных областей. Анализ формальных понятий. Логическая семантика естественного языка. Нечёткие логики.
- **Современные методы и технологии искусственного интеллекта**. Большие языковые модели (БЯМ). Применение БЯМ для автоматизации построения онтологий предметных областей, обеспечения непрерывности бизнеса и функционирования больших систем. Методы объяснимого и доверенного искусственного интеллекта (ИИ). Построение объяснимого и доверенного ИИ на основе семантического и нейросимвольного подходов. Технологии разработки гибридного ИИ. Моделирование бизнеса и создание цифровых двойников бизнес-систем как семантических моделей с помощью нейросимвольного гибридного ИИ. Этические вопросы создания ИИ.

<http://math.nsc.ru/conference/zont/25>



Association for the
Advancement of
Artificial Intelligence

<https://aaai.org/>



The 40th Annual AAAI Conference
on Artificial Intelligence

JANUARY 20 □ JANUARY 27, 2026 | SINGAPORE

The purpose of the AAAI conference series is to promote research in Artificial Intelligence (AI) and foster scientific exchange between researchers, practitioners, scientists, students, and engineers across the entirety of AI and its affiliated disciplines. AAAI-26 will feature technical paper presentations, special tracks, invited speakers, workshops, tutorials, poster sessions, senior member presentations, competitions, and exhibit programs, and a range of other activities to be announced.

<https://aaai.org/conference/aaai/aaai-26/>

Индекс 29151

LVII *exitus*
magazine

**“ ONTOLOGISTS
AND DESIGNERS
OF ALL COUNTRIES
AND SUBJECT AREAS,
JOIN US! ”**



<https://www.ontology-of-designing.ru/>