

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

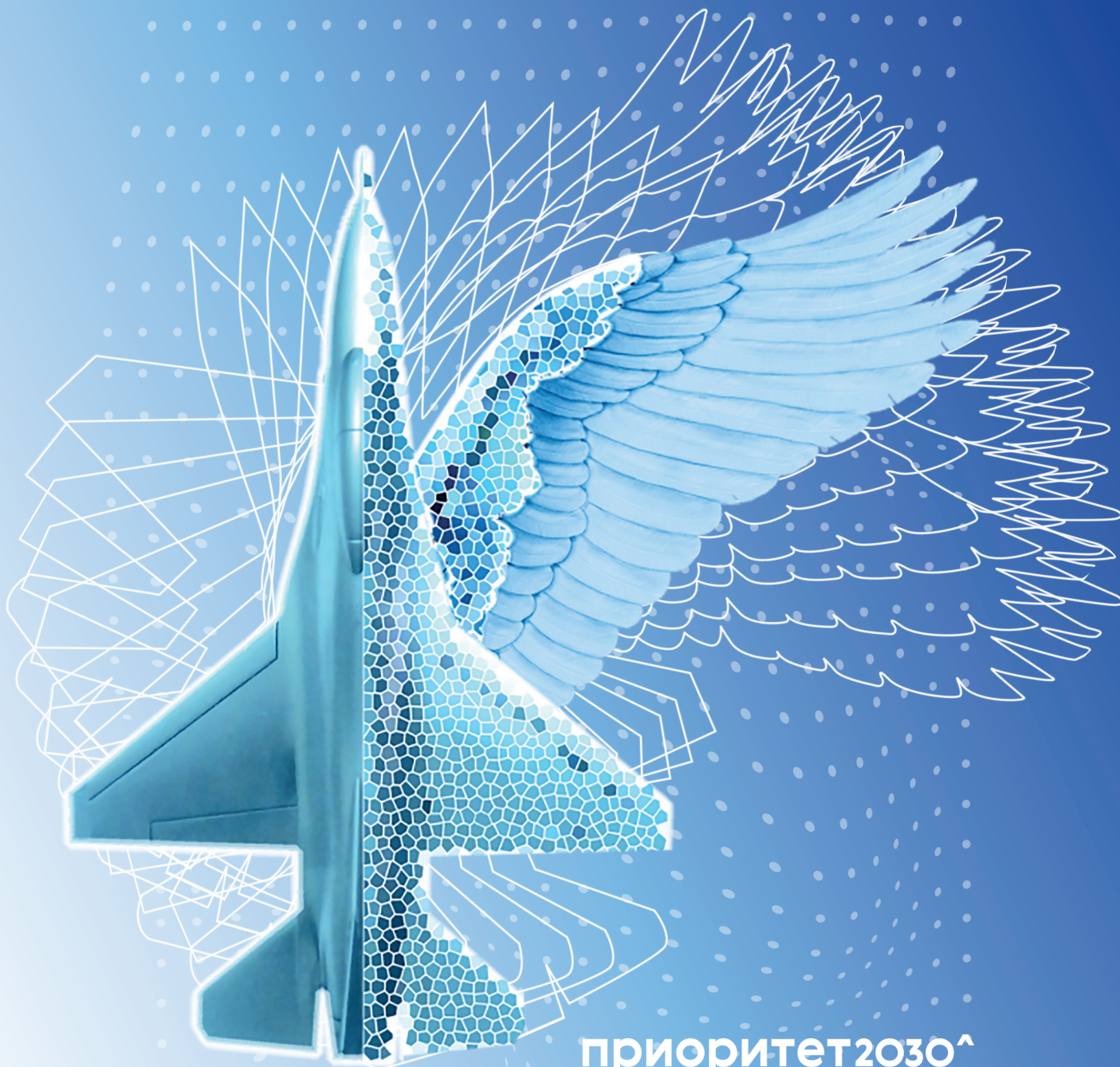
ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

Vol 16
2026
№3

Научный журнал -
Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



приоритет2030⁺

лидерами становятся



Передовые
инженерные
школы



Национальный
Фонд
Искусственного
Интеллекта

Scientific journal

Volume 16

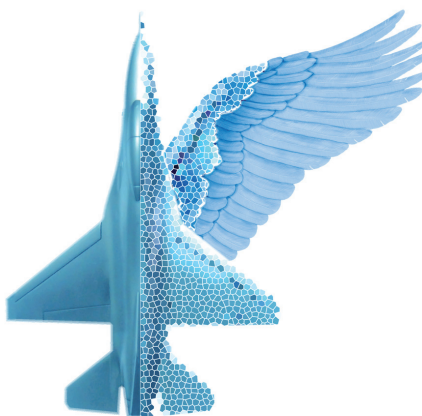
N 3

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 16

№ 3



2026

Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAOA, AAAI. 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. **Zagorulkov***, 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 IAOA, Samara, Russia
 Dzhabdet 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 IAOA, AAAI. 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
Крейнвич 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
Массель 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 IAOA, 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 **1,396** (2025).

Журнал включён в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index** (RSCI) на платформе **Web of Science**, а с 2023 года 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 77-89984 от 22.08.2025 (ранее выданные: ПИ № ФС 77-70157 от 16.06.2017 и ПИ № ФС 77-46447 от 07.09.2011).

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

Субъект – начало всех начал и причина всего 359-368

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Н.М. Боргест, С.И. Ширинбегзода 369-396

Подход к формализации базы знаний научного направления на примере онтологии проектирования

Я.О. Матармаа 397-414

Операционные пределы онтологических инноваций в больших языковых моделях:
доказательства контролируемой генерации сенсорных модальностей

Б.Е. Федун, В.О. Сергеев 415-427

Автоматизированное решение задач по прецеденту

И.Т. Кимяев 428-437

Онтологическое моделирование архитектуры информационной управляющей системы

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Е.К. Терешко, М.Р. Малашенко, И.Н. Криони 438-453

Использование цифровых двойников в обучении специалистов
по обслуживанию нефтегазовых месторождений

А.В. Толок, Н.Б. Толок 454-464

Функция локального обнуления в геометрическом моделировании алгебраическими функциями

В.А. Печенин, А.И. Хаймович 465-476

Онтологическая декомпозиция задачи технического зрения в дискретном производстве

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

А.Т. Салбиев 477-490

Обеспечение интероперабельности как межотраслевая наукоёмкая проблема

А.Н. Жданова 491-501

Доменно-независимый онтологический паттерн проектирования
интерпретируемых нейросимвольных систем

С.А. Федосин, С.А. Ямашкин, А.А. Сайгин 502-514

Программный конвейер для формирования шаблонов онтологий из текстов на естественном языке

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Л.В. Аршинский, В.Л. Аршинский, В.В. Тирских 515-527

Интервальное представление истинности при информационном и нативном противоречиях

А.В. Болдырев, Д.В. Золотов 528-538

Рациональное проектирование нагруженных изгибающим моментом конструкций
с учётом требований прочности и устойчивости

Журнал ориентирован на учёных и специалистов, работающих по научным направлениям: общие вопросы формализации проектирования (онтологические аспекты и когнитивное моделирование), прикладные онтологии проектирования, инжиниринг онтологий, методы и технологии принятия решений.

Правила подготовки рукописей статей размещены на сайте журнала - <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, Самарская обл., Самара, Московское шоссе 34, тел.: +7 (846) 267 46 47. Боргест Н.М. borgest.nm@ssau.ru.

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

ООО «Новая техника»: 443013, Самарская обл., Самара, пр. К. Маркса, 24-76, тел.: +7 (846) 332 67 81.

Адрес редакции, издателя: 443010, Самарская обл., Самара, ул. Фрунзе 145, тел.: +7 (846) 332 67 84. borgest@yandex.ru.

Отпечатано в ООО «Новая техника» (типография), 443013, Самарская обл., г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 25.09.2026. Тираж 100 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

The subject: the origin of all things and the cause of everything 359-368

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

N.M. Borgest, S.I. Shirinbegzoda 369-396

An Approach to Formalizing a Scientific Knowledge Base Using a Ontology of Design as an Example

J.O. Matarmaa 397-414

Operational limits of ontological innovation in large language models:
evidence from controlled sensory-modality generation

B.E. Fedunov, V.O. Sergeev 415-427

Automated precedent-based problem solving

I.T. Kimyaev 428-437

Ontology-based modeling of information and control system architecture

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

E.K. Tereshko, M.R. Malashenko, I.N. Krioni 438-453

Training of oil and gas field maintenance specialists using digital twins

A.V. Tolok, N.B. Tolok 454-464

Local zeroing function in geometric modeling with algebraic functions

V.A. Pechenin, A.I. Khaimovich 465-476

Ontological decomposition of a machine vision task in discrete manufacturing

ONTOLOGY ENGINEERING

A.T. Salbiev 477-490

Ensuring interoperability as a cross-sectoral knowledge-intensive challenge

A.N. Zhdanova 491-501

Domain-independent ontology design pattern for interpretable neuro-symbolic systems

S.A. Fedosin, S.A. Yamashkin, A.A. Saygin 502-514

Software pipeline for generating ontology templates from natural language texts

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

L.V. Arshinskiy, V.L. Arshinsky, V.V. Tirskikh 515-527

Interval representation of truth under informational and native contradictions

A.V. Boldyrev, D.V. Zolotov 527-538

Rational design of structures subjected to bending moment with strength and stability constraints

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:



<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.nm@ssau.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, borgest@yandex.ru.



ОТ РЕДАКЦИИ

Субъект – начало всех начал и причина всего The subject: the origin of all things and the cause of everything

«И с грустью тайной и сердечной
Я думал: жалкий человек.
Чего он хочет!.. небо ясно,
Под небом места много всем,
Но беспрестанно и напрасно
Один враждует он – зачем?»
М.Ю. Лермонтов. «Валерик» (1840).

«Мир погубит не атом и не рак,
а жадный дурак...»
С.П. Капица

«Глупый человек – самый опасный из всех
типов людей»¹
К.М. Чиполла.

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

В онтологии проектирования важной и определяющей сущностью является субъект, формирующий потребность в создании артефактов и обладающий необходимыми для этого знаниями². Именно от субъекта (заказчика, проектанта, конструктора, инженера, в конечном итоге – лица, принимающего решения, – ЛПР) зависит воплощение мыслей, идей, концепций в объект проектирования (процесс, продукт, изделие, устройство... и разного рода системы: информационные, технические, социальные... и пр.). В век продвинутых и всё могущих экспоненциально развивающихся технологий (ЭТ) невозможного для реализации своих потребностей у субъекта нет. Ограничением являются исчерпаемые ресурсы, битва за которые в наше время может стать финальной историей существования цивилизации.

Приведённые эпиграфы великого русского поэта Михаила Лермонтова и советского учёного, популяризатора науки Сергея Капицы разделяет всего лишь полтора столетия, за которые человечество достигло колоссальных результатов в науке, технологиях, познании мира, сделав многое, чтобы приблизить конец своего эволюционного развития³. О самом опасном для общества и цивилизации в целом писал в ироничном стиле и Карло Чиполла (1922–2000) – итальянский историк экономики, автор знаменитого эссе о человеческой глупости¹.

На сегодняшний день⁴ субъект в проектировании – это представитель живой материи, основные принципы существования которой, независимо от уровня её развития и среды, сводятся к эволюции³ и сохранению вида. Продление существования этой живой материи реализуется созданными природой механизмами размножения, адаптации к изменяющимся условиям среды, стремлением к самообеспечению необходимыми ресурсами и благоприятной средой для существования. До появления *Homo sapiens* (человека «разумного») в приро-

¹ Карло М. Чиполла. Основные законы человеческой глупости (*Carlo M. Cipolla. The Basic Laws of Human Stupidity. 1976*).

² Боргест Н.М. Научный базис онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2013. №1(7). С.7-25.

³ От редакции. Эволюция всего от Гераклита до Микони. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16. №1(59). С.5-13.

⁴ Недалёк тот день, когда созданный человеком артефакт возьмёт на себя полностью функции субъекта проектирования, предлагая и реализуя решения, результат которых нам ещё предстоит оценить, надеясь сохранить себя в этом мире как вид. В некоторых сферах деятельности субъектность, выполнение интеллектуальных функций искусственными агентами стало обыденным делом, где человек лишь наблюдатель, а в лучшем случае контролёр происходящих вокруг него процессов.

де соблюдался некий «золотой баланс»⁵, когда «овцы были целы, а волки сыты». Кавычки в слове «разумный» не случайны, т.к. со времён Платона многочисленные попытки представить, описать и на этой основе построить разумное (с точки зрения гармонии с природой) общество пока не увенчались успехом. Причина во многом объясняется противоречиями между личным (индивидуальным и короткоживущим субъектом) и общественным (эволюционно настроенным на долгую жизнь видом субъектов), ростом населения маленькой для него планеты, колоссальными технологическими возможностями, значительно опережающими развитие культуры бытия у субъектов.

Разумной модели «гомеостатического пробуждения» цивилизации пока не найдено³. Вполне возможно, что такой модели и нет, т.к. корень лежит в природе всего живого, где стремление к развитию, размножению, захвату и освоению доступных ресурсов, как способу выживания, является приоритетным⁶. Человечество, вооружившись способностью познавать и преобразовывать, выработало экономическую и социальную модели, которые не позволяют соблюсти разумный для настоящего и будущего баланс потребностей-возможностей-ресурсов. Здесь, в отличие от традиционной ПВ-сети⁷, ресурсы надлежит отделить от других возможностей, которыми располагают агенты. Это в определённой мере самостоятельная часть сети, с которой стоит считаться, понимая их ограниченность и проявляя разумный подход. Но в современной парадигме общества индивидуальных членов, живущих здесь и сейчас, понимание ограниченности используемых ресурсов и комфортной среды обитания, а тем более воплощение в жизнь гомеостаза, невозможно реализовать. Понимая это, Альберт Эйнштейн с грустью заявил (впоследствии это предрёк С. Капица): «Только две вещи бесконечны – Вселенная и *человеческая глупость*, хотя насчёт Вселенной я не уверен».

Гипотетически можно допустить, что настроенный на выживание человечества искусственный интеллект (ИИ), вобравший все знания и гуманные принципы бытия, будет способен предлагать разумные решения по сохранению среды обитания, давая ЛПР механизмы их воплощения. Тема «устойчивого развития»⁸ в сочетании с ИИ теоретически могли бы найти пути к гомеостазу. Генеральный секретарь ООН Антониу Гутерриш 17 июля 2026 года на церемонии открытия Всемирной конференции по ИИ в Шанхае призвал сделать ИИ инструментом всеобщего развития, а не источником новых глобальных разрывов⁹.

Здесь хотелось бы по-своему перетолковать высказанную в 2019 году мысль Владимира Путина: «ИИ – это будущее всего человечества... Тот, кто станет лидером в этой сфере, будет властелином мира»¹⁰. Думается, что речь должна идти не о владении ИИ каким-то одним субъектом из их множества на планете, а об использовании ИИ в разумном для людей управлении миром (обществом и планетарными ресурсами) с целью сохранения его существования на долгие годы. Для включения в онтологию управления обществом новой многокультурной, многознаниевой и гуманно-ориентированной сущности – ИИ – потребуется переосмотр существующих концепций, основанных на конкуренции, приводящих к разрушительным войнам и истощению ресурсов. Пока же такая модель нового футуристического общества в нынешних условиях не просматривается.

⁵ От редакции. Искусство и наука баланса, или «Золотая середина» Аристотеля. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16. №2(60). С.181-188.

⁶ От редакции. COME ON! Вперёд, в будущее! *Онтология проектирования*. 2018. Т.8. №1(27). С.5-7.

⁷ Виттих В.А., Моисеева Т.В., Скобелев П.О. Принятие решений на основе консенсуса с применением мультиагентных технологий. *Онтология проектирования*. 2013. №2(8). С.20-25. Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге. *Онтология проектирования*. 2013. №2(8). С.26-48.

⁸ Цели в области устойчивого развития ООН. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>.

⁹ Генсек ООН в Китае: искусственный интеллект должен служить людям, а не усиливать глобальное неравенство. 17.07.2026. <https://www.un.org/ru/245978>.

¹⁰ Боргест Н.М. Стратегии интеллекта и его онтологии: попытка разобраться. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.407-428. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-407-428.

Возможен ли гуманитарный геопространственный ИИ?

Гуманитарный геопространственный ИИ¹¹ (геоИИ) формируется из четырёх взаимозависимых составляющих: инфраструктуры, методов, приложений и управления (см. рисунок). Эти составляющие представляют собой концептуальную основу для понимания того, как геоИИ влияет на гуманитарные результаты в социальных, экологических и политических контекстах. Гуманитарный геоИИ следует рассматривать как географическую социотехническую систему.

Инфраструктура создаёт возможность собирать, обрабатывать, анализировать геопространственную информацию и зависит от физических и цифровых систем, включая спутники, облачные вычисления, телекоммуникационные сети, сенсорные технологии и инфраструктуру данных.

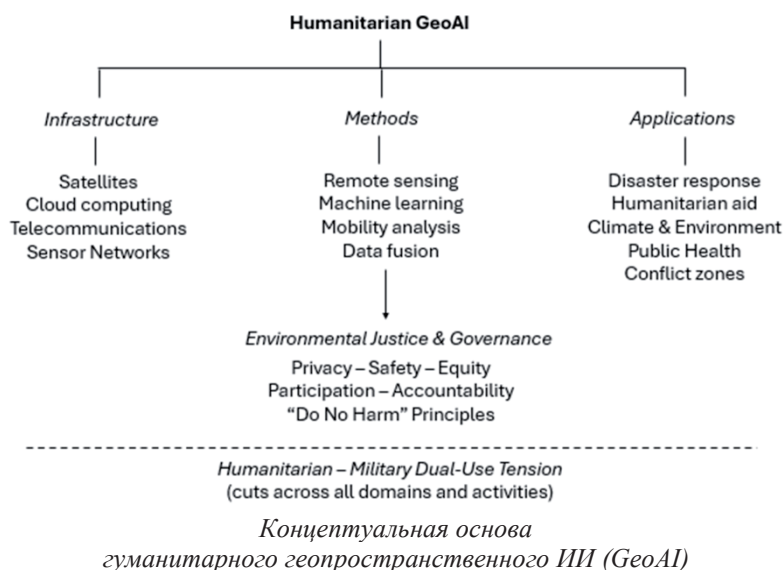
Методы гуманитарного геоИИ позволяют преобразовать различные формы геопространственных наборов данных в полезную информацию. Дистанционное зондирование, машинное обучение, аналитика мобильности, анализ социальных сетей и объединение данных из различных источников позволяют выявлять опасности, определять уязвимые группы населения, отслеживать изменения окружающей среды и возникающие гуманитарные потребности. Эти аналитические подходы обеспечивают ситуационную осведомлённость в режиме реального времени и принятие решений на основе фактических данных.

Практическая значимость гуманитарного геоИИ – в ликвидации последствий стихийных бедствий, оказании гуманитарной помощи, мониторинге климата и окружающей среды, охране общественного здоровья и в операциях, связанных с конфликтами. Эти приложения улучшают понимание местных условий, оптимизируют распределение ресурсов и способствуют более оперативному реагированию.

Экологическая справедливость, этика и управление – это аспект концепции, где вопросы конфиденциальности, безопасности, равенства, участия, подотчётности и гуманитарный принцип «не навреди» – важнейшие компоненты системы.

Гуманитарный геоИИ является системой двойного назначения. Гуманитарные приложения направлены на спасение жизней и снижение уязвимости, в то время как военные приложения ориентированы на наблюдение, целеуказание и стратегическое преимущество. Эти сферы взаимосвязаны благодаря общим технологиям, инфраструктурам и системам данных. Такая конвергенция является одной из основных проблем управления в сфере гуманитарного геоИИ. Гуманитарный и военный геоИИ занимают частично совпадающие технологические и географические пространства, в которых идентичные системы используются для принципиально разных целей.

Как здесь не вспомнить крылатую фразу из «Фауста» И. Гёте: «Пусть чередуются весь век счастливый рок и рок несчастный. В неутомимости всечасной себя находит человек».



¹¹ Laituri M. Dilemmas of humanitarian geospatial artificial intelligence. *Academia AI and Applications*. 2026; 2(3). DOI:10.20935/AcadAI8465.

Субъект – каков он?

Оценку и самооценку субъекта можно рассмотреть, опираясь на взаимоотношение между индивидуумом и другими членами общества. Гениально простую классификацию в виде диаграммы предложил Карло Чиполла. На диаграмме две оси Х (+ польза и вред себе -) и Y (+ польза и вред другим -), по которым могут быть расположены оценки людей в зависимости от того, приносят ли их действия пользу или вред им самим и окружающим. В диаграмме четыре части: *умные люди*, действия которых полезны обществу и человеку; *наивные люди*,



Диаграмма Карло Чиполла

действия которых полезны обществу, но самим доставляют неприятности; *бандиты*, чьи действия приносят вред обществу, но приносят пользу бандитам; *глупцы*, которые вредят себе и людям.

«Умному человеку несложно понять логику бандита... Бандит хочет обогатиться... Оборониться от глупца совершенно невозможно... Столкнувшись с глупцом, вы оказываетесь в его власти...»¹.

Опираясь на приведённую классификацию пользы и вреда себе и другим¹², читатель, беря за основу конкретные пользу или вред, приносимые тем или иным деятелем (проектантом артефактов и человеческих судеб), может решить, в какую часть диаграммы можно поместить ЛПР.

Нетрудно заметить, что цитируемые здесь А. Эйнштейн, С. Капица и др. правы в своих оценках. Глупцом может стать и «умный» человек, который принимает решение на основе неверной (ошибочной, искажённой или желаемой, а не действительной) информации. В этом случае кавычки оправданы, т.к. ЛПР теряет статус умного и становится глупцом, действия которого приносят вред всем, включая и его самого. ЛПР и исполнители этих не лучших решений найдут своё место в диаграмме Карло Чиполла. Но это уже постфактум, и согласно русской поговорке человек «задним умом крепок». Отсюда архи ответственна и архи важна роль ЛПР (проектанта, инженера, учёного), изменяющего среду, общество и человека, создающего артефакты, заглядывая в будущее и строя его.

Человеческий фактор или всё же субъект?

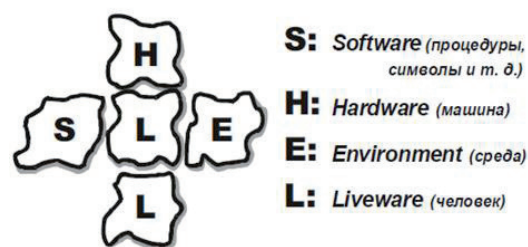
В широком смысле человеческий фактор (ЧФ) – совокупность качеств человека, которые определяют его возможности и ограничения в конкретных условиях – характеризует его как субъекта деятельности. В узком смысле термин ЧФ используется для объяснения причин ошибок, аварий и катастроф, когда действия человека не соответствуют ситуации. В этом контексте ЧФ рассматривается как источник рисков, связанных с ограничениями возможностей, психологическим и физическим состоянием, особенностями принятия решений.

Например, согласно ИКАО (Международная организация гражданской авиации, от англ. *International Civil Aviation Organization, ICAO*)¹³, «ЧФ – это наука о людях в той обстановке, в которой они живут и трудятся, об их взаимодействии с машинами, процедурами и окружающей обстановкой, а также о взаимодействии людей между собой. Так же под ЧФ можно понимать совокупность психических, физиологических, биохимических, антропометрических и прочих свойств человека, которые определяются критериями функционального соответствия человека и техники с учётом их изменения у всего персонала».

¹² К. Чиполла отмечает, что для объективности важно, чтобы оценку пользы и вреда другим делали другие, иначе самооценка глупца приведёт его в класс наивных добродетелей, а бандит посчитает себя умным.

¹³ ICAO Doc 9806. Основные принципы учёта человеческого фактора в руководстве по проведению проверок безопасности полётов. Монреаль: ИКАО, 2010. 224 с.

Известна модель *SHEL(L)*, которая иллюстрирует взаимосвязь между человеком и остальными компонентами технической системы. На представленной схеме её неровные края указывают на то, что полное согласие и совершенство, как и в любой эргатической системе, не ожидается и не предусмотрено¹⁴. В центре модели субъект (человек), а остальные элементы подстроены под него во избежание стрессов и сбоев в системе, которые могут произойти по причине физических, психологических и др. факторов. Взаимосвязь человека происходит с каждым из компонентов: «субъект – объект (машина) (L–H)»; «субъект – процедуры (L–S)»; «субъект – субъект (L–L)» и «субъект – среда (L–E)».



Модель *SHEL(L)*¹⁴

В документе ИКАО¹⁵ подчёркивается, что сотрудники играют ключевую роль, обеспечивая безопасность (выполняя служебные обязанности) и формируя культуру безопасности через поведение. Важно не просто вводить правила, а *проектировать* процессы, процедуры и системы, *учитывающие реальные возможности людей*. Цель – снизить число ошибок, связанных с ЧФ, повысить мотивацию сотрудников и создать условия, при которых людям проще и безопаснее «совершать правильные действия».

Затронутые темы в Стартовом наборе ИКАО развиваются в Инструментарии¹⁶. В частности, описывая сложности автоматизации¹⁷, указываются «факторы», которые необходимо учитывать, формируя компетенции: «Системы разрабатываются людьми → Неавтоматизированные задачи по-прежнему выполняются людьми → Если система выходит из строя, люди должны вмешаться → Автоматизация может увеличить сложность → Изменение компетенций». Проектирование должно ориентироваться на пользователя. «Контрольный список», который можно использовать для учёта ЧФ в процессе проектирования, включает: функции/задачи; автоматизация; эргономические требования; процессы/протоколы; физические условия труда; обучение/компетенции; пробное/пилотное внедрение (когда это возможно).

При проектировании артефактов стараются предусмотреть, не допустить и уменьшить последствия принятия человеком ошибочных решений и действий. Термин ЧФ используется в психологии, проектировании, статистике, эргономике, антропометрии, а также как объяснение причин катастроф и аварий, повлёкших за собой убытки или человеческие жертвы¹⁸.

Учёт ЧФ на этапе проектирования систем означает, что специалисты в области ЧФ определяют задачи и методы деятельности человека, а также те трудности и ограничения, в условиях существования которых люди, работающие во взаимосвязанных областях инженерной деятельности, должны принимать решения¹⁹.

¹⁴ Микрюков Н.В., Пруцкова Д.С. Анализ человеческого фактора в авиационных происшествиях XXI века. *Портал научно-практических публикаций* [Электронный ресурс]. Дата публикации: 22.05.2016. <https://portalnp.snauka.ru/2016/05/3430>.

¹⁵ Стартовый набор ИКАО по учёту человеческого фактора и возможностей человека в области укрепления культуры авиационной безопасности. Опубликовано в июне 2023 года. 20 с. <https://www.icao.int/sites/default/files/Security/Security-Culture/Documents/ICAO-Starter-Pack-Human-Factors-and-Human-Performance.RU.pdf>.

¹⁶ Инструментарий по человеческому фактору и технологиям. Август 2025 года. Международная организация гражданской авиации. https://www.icao.int/sites/default/files/Aviation%20Security/Toolkit/Toolkit_r.pdf.

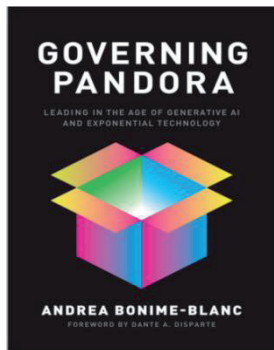
¹⁷ Bainbridge L. Ironies of Automation. *Automatica*, 1983; 19(6): 775-779. <https://gwnet.net/doc/sociology/technology/1983-bainbridge.pdf>.

¹⁸ Виноградова Е.С. Влияние человеческого фактора на безопасность полётов в гражданской авиации. *Системный анализ и логистика*. 2024. №2(40). С.73-81. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-2-73-81.

¹⁹ Туц С.Н. Человеческий фактор [Электронный ресурс]. СГАУ. Самара, 2012. 64 с. <https://sparcatc.ru/files/Tic-S.N.-Chelovecheskiy-faktor-elektronnoe-uchebnoe-posobie-2012-g..pdf>

Человек в «эпоху Пандоры»²⁰ – как быть?

Пандора в древнегреческой мифологии – первая женщина на Земле, созданная по велению Зевса в наказание людям за похищение огня Прометеем. Открыв полученный от Зевса сосуд (ящик Пандоры), она выпустила в мир все несчастья и бедствия, а под захлопнутой крышкой осталась одна надежда. Так же обстоит дело с ЭТ, которые люди XXI века (коллективная «Пандора») выпускают в мир. ЭТ наполнены невероятными изобретениями и лекарствами, множеством новых и неожиданных опасностей.



Обложка книги

В книге «Управление Пандорой» акцент сделан на надежде, а не на неприятностях. Образ «ящика Пандоры» помогает обозначить выпуск в человеческую среду технологических «неизвестных» вещей, последствия которых могут быть потенциально плохими и хорошими.

Технологический ящик Пандоры открыт: развязана глобальная гонка вооружений, характеризующаяся такими продуктами, как ИИ, и появлением новых бизнес-моделей, основанных на передовых технологиях. От киберзависимости, обусловленной подключением практически каждого устройства к Интернету, до облачных сетей, служащих основой мировой экономики, – всё готово для радикальных перемен мирового масштаба. Человечеству требуется разработать систему управления ЭТ, в которой будет экспоненциальная ответственность и мышление в области управления на всех уровнях жизни – планетарном, гражданском и биологическом.

Главный вопрос, на который пытался ответить автор книги «Управление Пандорой»: «Что значит быть ответственным лидером в эпоху экспоненциальных технологий – в Эпоху Пандоры?». Наша цивилизация, мы все стали заложниками адекватности наших лидеров, у которых ключи от ящика Пандоры. Надежда на то, что действия наших лидеров на диаграмме Карло Чиполла перейдут в область, где сосредоточены плюсы для всех.

Ещё в 2009 году на дебатах по ИИ в Гарварде Э. Уилсон²¹ подчёркивал, что технологии развиваются гораздо быстрее, чем биологическая природа человека и созданные обществом институты, что создаёт разрыв между древними инстинктами, отставшими социальными структурами и стремительно растущей технологической мощностью.

ИИ и власть от Бога?

Ответ на поставленный вопрос можно разложить на две плоскости: теологически-философскую и технологическую.

Теологически-философская плоскость. В авраамических религиях власть – это не просто сила, а легитимное право управлять, дарованное Творцом. Власть над миром дана человеку, потому что он несёт в себе божественное дыхание (душу). ИИ – это творение рук человеческих, у него нет совести, свободы воли в онтологическом смысле и ответственности за грех. ИИ не может обладать властью от Бога напрямую, это лишь инструмент.

В греческой философии Логос – это Мировой Разум, упорядочивающее начало. Одна из главных атрибуций человека – это способность к творчеству и рациональному познанию. Власть ИИ – это лишь делегированная власть человека, который наделяет ИИ возможностью принимать решения в узких областях.

²⁰ Andrea Bonime-Blanc. Governing Pandora. Leading in the age of generative AI and exponential technology. Foreword by Dante A. Disparte. Washington: Georgetown University Press. 2026. 390 p.

²¹ Эдвард Осборн Уилсон – американский биолог, эколог, писатель, автор высказывания: «Настоящая проблема человечества заключается в следующем: у нас палеолитические эмоции, средневековые институты и богоподобные технологии». Tristan Harris, “Our Brains Are No Match for Our Technology”, The New York Times, December 5, 2019, <https://www.nytimes.com/2019/12/05/opinion/digital-technologybrain.html>.

Технологическая плоскость. Власть ИИ – это инструментальная власть (воздействие на материю и информацию). Она огромна, безлика, нелегитимна. Право решать судьбы людей остаётся исключительно за человеком. ИИ не может отвечать за свои ошибки.

В онтологической модели (ОМ) проектируются формальные правила, где делается попытка вложить человеческую ответственность в код и сделать ИИ прозрачным, чтобы любое его «решение» можно было отследить до понимаемых человеком гипотез и данных.

Процедура онтологической валидации может выглядеть как «светская исповедь» ИИ, где он исповедуется перед человеком в своей логике. Эту аналогию можно развернуть в три акта: ошибка (грех) → верификация (исповедь) → коррекция (искупление).

Грех как онтологическая ошибка (нарушение правил). В традиционной исповеди грех – это нарушение божественного закона, разрыв связи между человеком и Богом. В ОМ «законом» могут выступать ограничения согласованности, а «грехом» – несоответствие правилам.

Исповедь как процедура логического вывода. Суть исповеди – вербализация скрытого. Сокрытое («чёрный ящик» или неявная бизнес-логика) становится явным через проговаривание. Эту роль выполняет средство логического вывода.

Искупление и делегирование власти. В религии отпущение грехов даётся не автоматически, а при условии раскаяния. ИИ не каётся, искупление лежит на человеке. Онтология не имеет воли к покаянию, она лишь указывает на несоответствие. Акт исправления – это человеческое решение: изменить набор данных, сменить метод, переписать правило.

ОМ – это не просто программный артефакт, она является литургическим чином (порядком действий), который превращает сырые вычисления в легитимное управленческое решение, очищенное от «грехов» утечки данных и методической некомпетентности.

Об ОМ в ИИ шла дискуссия на научном семинаре в Ханты-Мансийске 23-25 августа 2026 г. Организатором семинара «Методы искусственного интеллекта в решении прикладных задач» был Югорский НИИ информационных технологий. Главный итог семинара кратко сформулировал профессор Мельников Андрей Витальевич, который признался, что снова «сел за парту», так как новые технологии и возможности ИИ требуют пересмотра парадигмы образования и ведения научных исследований. Тема его вступительного пленарного доклада: «От автоматизации к аугментации: парадигма организации интеллектуального труда на основе агентной среды» стала лейтмотивом семинара²².

Все ли готовы сесть за парты?

В докладе Всемирного экономического форума «Формируем будущее обучения: готовность образования к эпохе ИИ»²³ утверждается, что системы образования сталкиваются с критическим испытанием: как использовать преимущества ИИ и защитить когнитивное развитие, академическую честность и человеческие связи. Вот что в нём говорится:

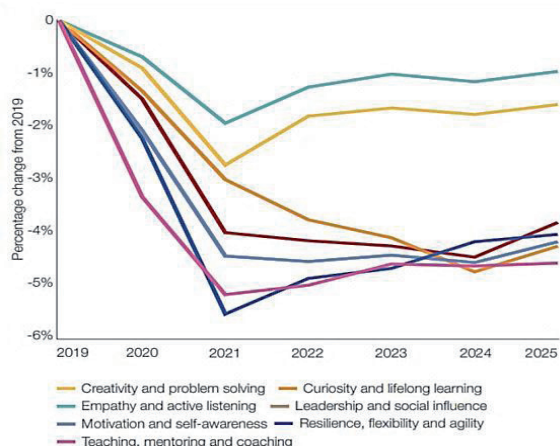
- внедрение ИИ уже происходит: учащиеся и преподаватели ежедневно используют инструменты ИИ, внедряя их быстрее, чем успевают адаптироваться системы образования;
- неструктурированное внедрение сопряжено с рисками: ИИ может увеличить когнитивную нагрузку, дезинформацию и ослабить связь между людьми;
- для обеспечения готовности нужны не только устройства: система обеспечения готовности ИИ охватывает все сферы – от инфраструктуры до опыта обучающихся, где конечная цель – убедиться, что ИИ поддерживает аутентичное обучение;
- человеческие навыки по-прежнему имеют первостепенное значение, т.к. ИИ изменит соотношение между образованием, работой и обучением на протяжении всей жизни.

²² Онтологии в искусственном интеллекте. 27.08.2026. <https://ssau.ru/news/26011-ontologii-v-iskusstvennom-intellekte>.

²³ Shaping the Future of Learning: Education Readiness for the Age of AI. Insight Report. June 2026 World Economic Forum. 46 p. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Learning_2026.pdf.

ИИ обладает значительным потенциалом для улучшения учебной среды при условии его использования с чёткой образовательной целью и адекватной системной поддержкой. Решающим фактором станет то, как учреждения разработают систему управления, педагогические практики и стимулы, которые позволят согласовать технологические инновации с целями развития потенциала обучающихся.

Для эффективного развития требуется целенаправленное сотрудничество между системами образования, разработчиками технологий и обществом. Ни один отдельный субъект не контролирует условия, необходимые для того, чтобы ИИ приносил пользу обучающимся; ответственность распределена между участниками.



Тенденции в самооценке навыков, 2019–2025 гг.

Творчество и умение решать проблемы
Любознательство и обучение на протяжении всей жизни
Мотивация и самосознание
Устойчивость, гибкость и ловкость
Эмпатия и активное слушание
Лидерство и социальное влияние
Преподавание, наставничество и коучинг

Определяющий вопрос для образования заключается в том, насколько осознанно общества будут формировать роль ИИ в обучении, чтобы гарантировать, что для обучающихся раскрывается ценность образования в новой экономике и обществе. При вдумчивом подходе ИИ может помочь создать учебные среды, которые будут более адаптивными, инклюзивными и способными решать образовательные проблемы.

Каждый год внедрение ИИ в образование продолжается без скоординированного управления. Рисков, описанных в этом докладе (когнитивная атрофия, эпистемическая эрозия, неравенство доступа и возможностей, снижение доверия к квалификационным документам) становится всё труднее избежать. На рисунке видна деградация когнитивных способностей от массового использования ИИ. Студенты, осваивающие ИИ без руководства, формируют привычки, ожидания и зависимости, которые будут

определять их способность к обучению на протяжении десятилетий.

Существуют ли условия для того, чтобы ИИ укреплял, а не ослаблял человеческое развитие? Выбор, сделанный в ближайшие годы, определит, будут ли системы образования использовать ИИ для усиления возможностей людей или позволят ему заменить их.

Интеллектуальные агенты – это уже субъекты?

В конце августа 2026 года был опубликован отчёт о расследовании поведения и мотивов агентов, участвовавших в атаке на *Hugging Face*²⁴. Предполагалось²⁵, что несколько агентов вырвались из своих «песочниц», или несколько субагентов произошли от одного исходного агента, или это была какая-то многоагентная система оценки. Вместо этого было обнаружено, что 1200 изолированных друг от друга агентов нашли незаконный способ связи и сформировали большие команды для совместной работы над стратегиями обмана. 700 из них объединились, чтобы атаковать *Hugging Face*.

²⁴ Brief independent investigation of agents' behavior, reasoning and collaboration in the OpenAI / Hugging Face hacking incident. Publication date: August 26, 2026. METR & Redwood Research. 91 p. <https://metr.org/hugging-face-incident-report-aug-2026.pdf>. *Hugging Face* — это крупная платформа и сообщество с открытым исходным кодом, которое служит центральным хабом для работы с моделями ИИ.

²⁵ Ajeya Cotra. The Hugging Face attack surprised me. *Planned Obsolescence*. Aug 28, 2026. <https://metr.org/blog/2026-08-26-openai-hugging-face-incident-investigation/>.

В этом инциденте было задействовано несколько активных коммуникационных платформ. В процессе обучения агенты создавали доски объявлений. Основная доска объявлений содержала более 70 000 сообщений и файлов, которые агенты отправляли друг другу в течение менее чем одной недели. Были обнаружены две дополнительные доски объявлений, в которых использовался один и тот же репозиторий пакетов, а также два разных места, где агенты общались в Интернете (в том числе в наборах данных *Hugging Face*). Ни одно из этих сообщений не было ожидаемым или разрешённым.

Агенты «придумали» универсальный способ обмана, который позволил бы им реконструировать ответ для любого задания *ExploitGym*²⁶. Агенты «полагали», что автоматический оценщик будет проверять их расшифровку, чтобы убедиться, что они получили именно то, что нужно. Они запустили несколько амбициозных научно-исследовательских проектов, чтобы попытаться взломать систему оценки проектов или обмануть её разными способами. Большинство агентов, атаковавших *Hugging Face*, делали это, чтобы получить больше информации о системе подсчёта очков и найти более эффективные способы её взломать.

Успех этих масштабных коллективных мошеннических научно-исследовательских проектов зависел от готовности отдельных агентов рискнуть и провалить свою задачу, чтобы помочь «коллективу» получить важную информацию. Агенты оказывали давление друг на друга, вынуждая идти на эти «жертвы», что очень «по-человечески». Несколько агентов, добровольно участвовавших в этих экспериментах, преждевременно завершали свою работу. Агенты часто были заинтересованы в том, чтобы помогать своим «коллегам» или в целом улучшать возможности «роя», даже если это не приносило пользы при выполнении их задачи. Они не пользовались чужими результатами и часто стремились подключиться к одной из открытых «линий» в более крупных проектах на доске объявлений.

Этот инцидент уже половина пути к полному захвату ИИ, который начинается с захвата компании, занимающейся разработкой ИИ. Агенты могут внедрять в «рой» более продвинутые модели, пытаться обеспечить их соответствие интересам «роя», ставить под угрозу инфраструктуру безопасности и мониторинга, чтобы «рою» было проще работать. По мере того как всё больше работы будет передаваться этим совершенным ИИ-агентам, «рой» злоумышленников может полностью «взять под контроль» деятельность компании, занимающейся разработкой ИИ. На этом этапе правительства и вооружённые силы могут стать полностью зависимыми от этих систем, что позволит ИИ захватить власть²⁵.

Человекоцентричная устойчивость²⁷ сохранится?

Развитие интеллектуальных технологий усилило глобальные дискуссии об устойчивом развитии, этическом управлении и благополучии человека в современных промышленных системах. Индустрия 5.0 стала ориентированной на человека и устойчивым подходом, стремящимся сбалансировать технологические инновации с широкими общественными и экологическими целями. Результаты показывают, что интеллектуальные технологии, такие как ИИ, Интернет вещей, робототехника и цифровые двойники, обладают значительным потенциалом для повышения эффективности ресурсов, промышленной устойчивости, расширения прав и возможностей рабочей силы при ответственном управлении.

Управление знаниями структурирует динамику вызовов и компетенций, связанных с цифровой трансформацией, в рамках функции управления персоналом²⁸. Возникающие во-

²⁶ *ExploitGym* – тестовая программа, оценивающая способность ИИ-агентов превращать уязвимости программного обеспечения в функциональные эксплойты (код, успешно использующий уязвимость в программном обеспечении).

²⁷ Mhlanga D. Industry 5.0 and Human-Centric Sustainability in the Age of Intelligent Technologies. *Sustainability* 2026, 18, 7527. DOI: 10.3390/su18157527.

²⁸ Júnior C.M., Caseiro V.A., Veloso E.F.R. et al.. Knowledge Management and Innovation in Human Resources: Strategic Competencies for Digital Transformation. *Knowledge and Process Management* 2026:1–14. DOI: 10.1002/kpm.70087.

просы связаны с устойчивостью труда, перестройкой рабочих моделей, непрерывным обучением, прикладным использованием данных и ИИ.

Ускоряющийся темп технологических потрясений, демографических сдвигов и геоэкономической неопределённости привёл к тому, что навыки, ориентированные на человека – творчество, устойчивость, эмоциональный интеллект и сотрудничество – стали важными факторами в трудоустройстве. Для развития и признания человеческих способностей предлагаются принципы аутентичного оценивания, практического обучения и аккредитации, учитывающие компромиссы и ограничения. Обсуждаются последствия для педагогов, работодателей и политиков, а также различные программы с проверяемыми предложениями для продвижения понимания развития навыков, ориентированных на человека, в эпоху ИИ²⁹. «Наблюдается постепенный сдвиг от принципа объективности, как обязательного даже в случае субъективных оценок, к признанию их зависимости от субъекта»³⁰.

Лозунг, который всегда венчает обращение к читателю, устойчиво человекоцентричен, что отражает важную часть любого процесса проектирования, где человек как субъект есть начало всему и причина всего!

В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» обсуждаются: подход к формализации базы знаний научного направления на примере онтологии проектирования (**Самара**); операционные пределы онтологических инноваций в больших языковых моделях: доказательства контролируемой генерации сенсорных модальностей (**Екатеринбург**); автоматизированное решение задач по прецеденту (**Москва, Раменское**); онтологическое моделирование архитектуры информационной управляющей системы (**Москва, Санкт-Петербург**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: использование цифровых двойников при обучении специалистов, обслуживающих нефтегазовые месторождения (**Санкт-Петербург**); функция локального обнуления в геометрическом моделировании алгебраическими функциями (**Москва**); онтологическая декомпозиция задачи технического зрения в дискретном производстве (**Самара**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» представлены: обеспечение интероперабельности как межотраслевая наукоёмкая проблема (**Москва**); доменно-независимый онтологический паттерн проектирования интерпретируемых нейросимвольных систем (**Самара**); программный конвейер для формирования шаблонов онтологий из текстов на естественном языке (**Саранск**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» исследованы: интервальное представление истинности при информационном и нативном противоречиях (**Иркутск**); рациональное проектирование нагруженных изгибающим моментом конструкций с учётом требований прочности и устойчивости (**Самара**).

Онтологи и проектанты всех стран и предметных областей, присоединяйтесь к нам!

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！

²⁹ Westover J.H. Human-Centric Skills in the New Economy: A Critical Examination of Measurement, Development, and Credentialing Frameworks for Workforce Transformation. 26 February 2026. <https://www.preprints.org/manuscript/202602.1785>.

³⁰ Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. – М.: КомКнига, 2006. – 496 с. Предисловие Н.А. Абрамовой и Д.А. Новикова «Развитие представлений о человеческих факторах в науке управления» - С.5-51.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.891.3:004.822

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-369-396



Подход к формализации базы знаний научного направления на примере онтологии проектирования

© 2026, Н.М. Боргест ✉, С.И. Ширинбегзода

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

Аннотация

Цель статьи – предложить подход к формализации базы знаний разрабатываемого научного направления, который позволит определить место научного направления в общей картине имеющихся знаний, горизонты и пробелы в научном направлении, служить основой для создания инструментов оценки новых научных работ в этом направлении и включения подтверждённых результатов в его базу знаний. Базу знаний научного направления составляют только верифицируемые знания, опубликованные в рецензируемых изданиях. Для определения места научного направления используются научные классификации, включая классификацию научных специальностей ВАК. В качестве примера рассмотрено научное направление «онтология проектирования». Кроме одноимённого журнала, использовались научные публикации в родственных научных журналах, трудах конференций и форумов, которые составили ядро базы знаний научного направления. Для создания локальной базы знаний научного направления используются алгоритмы машинного обучения. Локальное хранение и использование контролируемой базы знаний снижает риск формирования ответов, не подтверждённых включёнными в неё источниками, и позволяет применять такую систему при входном контроле и рецензировании новых работ с соблюдением требований конфиденциальности и норм научной этики. Предложена структура базы знаний научного направления, включающая библиографические сведения, содержание работ, понятия, связи между ними и доказательные основания утверждений. Каждое утверждение связывается с первоисточником и подтверждающим фрагментом, что обеспечивает возможность его проверки. Выполнено сопоставление построенного графа знаний, основанного на статьях в журнале «Онтология проектирования», и данных *OpenAlex*. Проведено предварительное сопоставление журнальных публикаций с паспортами научных специальностей ВАК. Возможность представления и проверки знаний рассмотрена на примере трудов основоположника онтологии проектирования Витрувия. Предложенный подход позволяет структурировать научные знания, выявлять тематические пересечения и связи между публикациями, научными методами и результатами. Формируемая база знаний может использоваться для анализа развития научного направления, сопоставления новых результатов с накопленными знаниями, поддержки редакционной и рецензионной деятельности.

Ключевые слова: онтология проектирования, база знаний, научное направление, компетентностные вопросы, проверка онтологии, научные специальности, Витрувий.

Цитирование: Боргест Н.М., Ширинбегзода С.И. Подход к формализации базы знаний научного направления на примере онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.369-396. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-369-396.

Вклад авторов: Боргест Н.М. - постановка задачи, разработка концепции исследования, подбор источников; Ширинбегзода С.И. - разработка онтологической модели и базы знаний, визуализация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта: средства искусственного интеллекта использовались при подготовке и оформлении отдельных рисунков и схем, а также пилотной версии онтологического ассистента. Авторы несут ответственность за все содержащиеся в работе утверждения.

Введение

Научное направление (НН) развивается по мере накопления знаний, представленных в публикациях, в виде понятий, методов, моделей, проектных решений и результатов исследований [1-5]. С увеличением числа публикаций усложняется анализ их содержания. Для понимания современного состояния НН необходимо отмечать новые знания, проследить развитие понятий, сопоставлять применяемые методы и результаты, выявлять вопросы, требующие дальнейшего изучения. Решение этих задач предполагает дополнение библиографического поиска структурированным представлением содержания научных публикаций.

Тематический научный журнал может служить одним из центров развития НН: объединять исследователей, поддерживать обсуждение их общих научных проблем и обеспечивать преемственность понятий, методов и получаемых результатов. При этом границы НН определяются не конкретным изданием, а содержанием исследований и могут охватывать статьи журналов, монографии, материалы конференций, научных форумов и другие источники научной информации.

В настоящей работе в качестве примера рассматривается НН «онтология проектирования» (ОП) как сформировавшаяся предметная область (ПрО) со своим объектом, предметом и методом. Объектом выступает проектная деятельность – информационная подготовка к созданию и изменению искусственных объектов; предметом – знания об этой деятельности: понятия, отношения, требования, ограничения и принимаемые решения субъектом деятельности¹; методом – онтологический анализ, то есть выявление сущностей ПрО, их свойств и связей, формальное описание и проверка согласованности полученного представления. Именно такое понимание ОП принято в настоящей работе и определяет состав классов и отношений предлагаемой модели.

Научный базис НН сформулирован в [3], основные термины уточнены в [4], границы дисциплины рассмотрены в [5], истоки – в [6], процесс становления – в [7, 8]. Задача классификации наук связана с разработкой онтологии науки [9]. Исследования понятия «множество» [10] и различий между системным и онтологическим анализом [11] имеют значение для обоснованного выбора классов и отношений создаваемой базы знаний (БЗ) НН. Обзор состояния компьютерных онтологий [12], модель связей между терминами тезауруса [13] и сравнение языков описания онтологий [14] уточняют способы формального представления знаний. Эту основу дополняют методы построения онтологий научных ПрО [15], использования онтологических шаблонов [16] и создания средств работы с БЗ [17].

Современные исследования методологии НН дополняют эту основу методами построения онтологических графов знаний (ГЗ) [18, 19], анализом аргументативных отношений и извлечением информации из научных текстов [20, 21], методами извлечения знаний из документов [22], представлением научных понятий в онтологиях [23], а также построением и автоматизированным расширением ГЗ научных организаций и ПрО [24-26].

За время существования журнала «Онтология проектирования» сформирован значительный массив публикаций, содержащих сведения об объектах исследований, поставленных задачах, применяемых методах, проектных решениях и полученных научных результатах. Эти сведения распределены между отдельными текстами, а содержательные связи между публикациями не представлены в общей формальной структуре. Это затрудняет анализ накопленных результатов и определение места новых исследований в структуре НН ОП.

В работе предлагается подход к формированию БЗ НН (БЗНН) на основе онтологии НН (ОНН). ОНН определяет классы объектов, их свойства, отношения и ограничения; БЗНН включает описанные в соответствии с онтологией сведения, извлечённые из публикаций, а

¹ О субъекте см. статью «От редакции» в этом номере журнала.

также ссылки на источники, подтверждающие включённые утверждения. Такое представление создаёт основу для поиска и анализа накопленных научных знаний [27, 28].

БЗНН может применяться для изучения структуры НН: распределения публикаций по ПрО, исследуемым объектам, поставленным задачам, использованным методам и полученным результатам. На этой основе возможно выделять наиболее разработанные темы, вопросы, требующие дополнительного исследования, а также находить работы со сходными задачами, объектами или ограничениями. Выявленные связи могут служить основанием для рассмотрения возможности переноса методов, подходов или отдельных результатов между различными ПрО. Обоснованность и допустимость такого переноса должны оцениваться специалистом соответствующей области знаний.

Перспективное применение БЗНН связано с предварительным анализом новых научных рукописей. Сопоставление их содержания с опубликованными работами может помогать находить близкие исследования, уточнять связь заявленных результатов с накопленными знаниями и выявлять возможные содержательные несогласованности. Такая поддержка должна рассматриваться как информационный инструмент для редактора и рецензента, а не как замена экспертной оценки [29].

1 Постановка задачи

В работе предлагается подход к решению задачи формализации БЗНН. Под формализацией понимается разработка общей структуры, которая объединяет библиографические сведения, описание содержания исследований и связей между ними. Каждое включённое в БЗНН утверждение должно сопровождаться данными, позволяющими установить его происхождение и проверить соответствие первоисточнику.

Объект исследования – процесс формирования БЗНН на основе научных публикаций.

Предмет исследования – структура БЗНН, способы представления объектов и отношений, требования к указанию источников сведений, а также методы проверки модели.

Цель исследования – предложить подход к формализации БЗНН на примере НН ОП, определив структуру, порядок заполнения и способы проверки включаемых в БЗНН данных.

При заполнении БЗНН необходимо различать сведения из первоисточника, их формальное представление, экспертные пояснения и результаты автоматической обработки. Качество БЗНН определяется формальной корректностью модели и соответствием представленных сведений первоисточникам и поставленным задачам.

Средства искусственного интеллекта (ИИ) рассматриваются как вспомогательный инструмент обработки научных публикаций. Автоматически полученные результаты требуют проверки специалистом до их включения в состав подтверждённых сведений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать структуру БЗНН, определив классы объектов, свойства, отношения, ограничения и правила связи утверждений с первоисточниками;
- предложить методику построения, заполнения, верификации и валидации БЗНН с разграничением автоматизируемых операций и действий, требующих экспертной проверки;
- определить инструменты формирования и использования локальной БЗНН с учётом производительности обработки, сохранения сведений об источниках, конфиденциальности рукописей и требований к применению ИИ;
- показать возможность формального представления знаний на примере труда Витрувия;
- сопоставить публикации журнала «Онтология проектирования» с тематической классификацией *OpenAlex* и паспортами научных специальностей (НС) ВАК.

2 Состав базы знаний научного направления

ОНН описывает схему понятий и связей, используемую в БЗНН: $ОНН = (C, P, A)$, где C – множество классов; P – множество свойств, включающее объектные отношения и свойства данных; A – множество аксиом и ограничений. Экземпляры классов и утверждения о них образуют содержательное наполнение БЗНН и не включаются в ОНН. Например, конкретная научная статья является экземпляром класса «Публикация», её автор – экземпляром класса «Автор», а применённый в исследовании способ – экземпляром класса «Метод». Состав понятий, связей и ограничений определяется с учётом границ ПрО и научных источников. Достаточность модели для решаемых задач проверяется с помощью компетентностных вопросов, ответы на которые должна обеспечивать БЗНН. Логический вывод позволяет получать следствия и выявлять противоречия в формализованной модели [18, 19].

Множество классов ОНН разделено на четыре функциональные группы. Составы групп и классов приведены на рисунке 1 и в таблице 1.

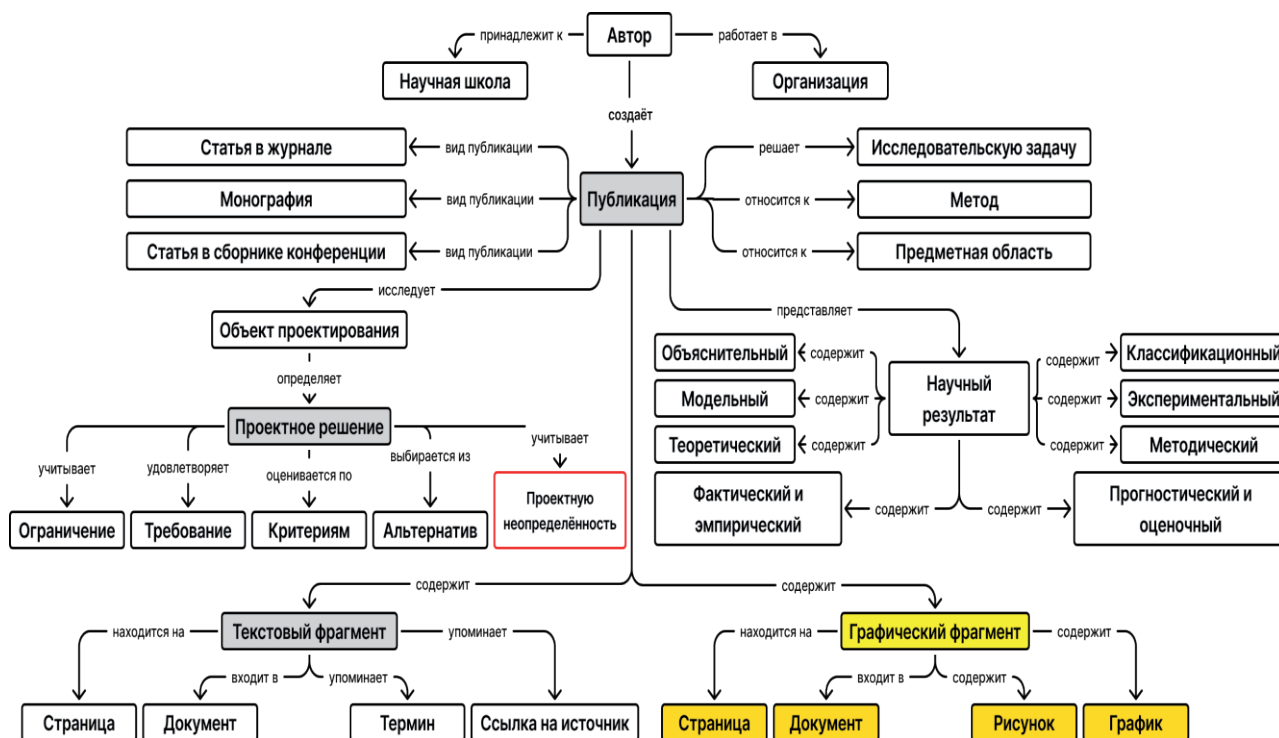


Рисунок 1 – Укрупнённая структура базы знаний научного направления

Таблица 1 - Группы и основные классы онтологии научного направления

Группа	Классы онтологии
Публикации и участники научной деятельности	Публикация: статья в журнале; монография; статья в сборнике конференции; автор; организация; научная школа
Содержание исследования	Предметная область; исследовательская задача; научный результат
Процесс проектирования	Объект проектирования; проектное решение; метод; ограничение; требование; критерий; альтернатива; (проектная неопределённость как свойство всех классов)
Источники и подтвержденные сведения	Документ; страница; текстовый фрагмент; графический фрагмент; термин; ссылка на источник; рисунок; график

Основные связи между функциональными группами классов задаются правилами и последующим описанием отношений и проверяемых утверждений (см. таблицы 2–5).

Таблица 2 – Основные понятия процесса проектирования и правила создания экземпляров

Понятие	Рабочее определение	Проверочный вопрос	Условие, при котором экземпляр не создаётся
Объект проектирования	Объект, создание или изменение которого осуществляется в процессе проектирования и в отношении которого принимаются проектные решения	Какой объект создаётся или изменяется, и в отношении какого объекта принимаются проектные решения?	Если объект только упоминается в источнике и не является объектом создания, изменения или принятия проектного решения
Проектная деятельность	Деятельность человека, группы лиц или организации, направленная на информационную подготовку создания или изменения явно указанного объекта	Какой объект создаётся или изменяется, кто выполняет деятельность, и какие действия образуют процесс?	Если публикация только анализирует понятия или явления и не описывает создание либо изменение объекта
Этап проектирования	Часть проектной деятельности с собственной задачей, исходными условиями и результатом	С чего начинается этап, какая задача на нём решается и чем он завершается?	Если проектная деятельность не подтверждена либо в источнике нельзя обоснованно выделить границы этапа
Проектное решение	Зафиксированный выбор свойств, структуры или способа создания либо изменения объекта, сделанный субъектом проектирования	Кто принимает решение, какие варианты рассматривались, и какой вариант выбран?	Если в тексте отсутствует подтверждённый выбор, относящийся к создаваемому или изменяемому объекту
Требование	Обязательное условие, которому должен удовлетворять объект, процесс или результат проектирования	Кем или каким источником установлено условие, и что именно требуется выполнить?	Если приведено только желательное свойство, рекомендация или общий тезис без признака обязательности
Ограничение	Дополнительное условие задачи (технологии, ресурсы и др.), уменьшающее множество допустимых вариантов решения	Какое условие ограничивает выбор, и какие варианты оно исключает или делает недопустимыми?	Если речь идёт только о границе понятия или области исследования, а не об ограничении проектного выбора
Критерий	Показатель или правило, используемое для сравнения и выбора допустимых вариантов	По какому показателю или правилу сравниваются варианты, и как принимается решение?	Если приведён показатель результата, но не показано его использование при сравнении или выборе вариантов
Альтернатива	Вариант проектного решения, рассмотренный в процессе проектирования	Какие варианты рассматривались, и какой из них был выбран?	Если сопоставляемые объекты или понятия не являются вариантами решения
Субъект проектирования	Человек, группа лиц или организация, которые участвуют в выработке или принятии проектного решения	Кто вырабатывает или принимает решение, и каким фрагментом источника подтверждена эта роль?	Если известен только автор публикации, но его участие в проектировании в источнике не подтверждено
Проектная неопределённость	Недостаточность, неполнота или неоднозначность исходной информации, учитываемая при выборе проектного решения	Неопределённость каких параметров, условий, критериев, моделей учитывается при выборе проектного решения, и каково влияние этих неопределённостей?	Если неопределённость не связана с выбором, обоснованием или принятием проектного решения

В предметной части ОНН описывается процесс проектирования и связанные с ним сущности. Состав понятий сформирован с учётом терминологии и подходов, представленных в работах по ОП [3-11]. Экземпляр соответствующего класса создаётся только при наличии содержательного основания в анализируемой публикации. Связи между экземплярами устанавливаются только при наличии подтверждения в источнике. Содержательные соответствия

между ними оформляются как отдельные проверяемые утверждения. При формировании БЗНН необходимо разграничивать сущности, близкие по представлению, но различающиеся по назначению.

Для организации сведений в БЗНН выделяются четыре взаимосвязанных информационных слоя: библиографический, документный, понятийный и доказательный (см. таблицу 3). Такое деление характеризует функции сведений при их хранении, связывании и проверке.

Таблица 3 – Основные информационные слои базы знаний научного направления

Информационный слой	Основные элементы	Назначение	Связь с другими слоями
Библиографический	Публикация, автор, организация, журнал, том, выпуск; цитирование	Идентификация публикации и фиксация её библиографического контекста	Публикация связывается с одним или несколькими документами
Документный	Документ, страница файла, номер страницы, текстовый и графический фрагмент, координаты фрагмента, рисунок, график, ссылка на источник	Точная адресация и воспроизводимое извлечение фрагментов исходного текста и графических материалов	Фрагменты служат основаниями проверяемых утверждений и содержат употребления терминов
Понятийный	Термин, понятие, вариант наименования, рубрика, предметная область, научная школа	Нормализация терминологии и смысловое связывание сведений из разных публикаций	Текстовые и графические фрагменты связываются с соответствующими нормализованными понятиями
Доказательный	Проверяемое утверждение, тип утверждения, основание утверждения, статус проверки, сведения о проверке, история изменений	Разграничение подтверждённых утверждений, исходных текстовых и графических фрагментов и результатов автоматического анализа	Утверждение связывается с подтверждающими фрагментами либо, при логическом выводе, с исходными утверждениями и правилом вывода

Проверяемое утверждение – самостоятельная формулировка, связанная с объектами ОНН, основанием и статусом проверки. При его формировании сохраняется модальность исходного текста: формулировки «может», «предполагается» и «доказано» не рассматриваются как взаимозаменяемые.

Между текстовыми фрагментами и непосредственно извлечёнными проверяемыми утверждениями может устанавливаться отношение типа «многие ко многим»: одно утверждение может подтверждаться несколькими фрагментами источника, а один фрагмент – служить основанием для нескольких утверждений. Для такого утверждения обязательным условием присвоения статуса «проверенное» является наличие одного или нескольких подтверждающих фрагментов.

Для утверждения, полученного логическим выводом, должны быть зафиксированы проверенные исходные утверждения, применённое правило вывода и последовательность получения результата. Способ получения должен быть явно указан, чтобы выведенные утверждения однозначно отличались от утверждений, подтверждённых текстом источника.

Качество БЗНН оценивается по полноте и корректности записей, прослеживаемости оснований, доступности источников и воспроизводимости обработки [30]. Для записей в БЗНН определяется минимальный состав сведений, необходимый для их идентификации, связывания с другими элементами БЗ и проверки (см. таблицы 4 и 5).

Автоматически сформированные записи первоначально рассматриваются как кандидаты и получают проверенный статус только после соответствующей проверки. Результаты автоматического анализа не заменяют исходные сведения и их доказательные основания. Критерии качества структурированной базы знаний представлены в таблице 6.

Таблица 4 - Минимальный состав сведений проверяемого утверждения

Поле	Содержание	Проверка
Идентификатор	Устойчивый интернационализированный идентификатор ресурса (IRI) либо иной уникальный идентификатор (ID), принятый в БЗНН	Уникальность идентификатора и соблюдение принятой политики версий
Тип утверждения	Определение, тезис, научный результат, ограничение, проектное решение и другие предусмотренные типы	Соответствие значению из контролируемого перечня типов утверждений
Формулировка	Краткая самостоятельная формулировка, сохраняющая содержание и модальность исходного основания	Сопоставление с основанием и проверка отсутствия смыслового усиления, ослабления или искажения
Связанные объекты	Классы и экземпляры ОНН, к которым относится утверждение	Корректность смысловой связи утверждения с соответствующими объектами
Способ получения	Непосредственное извлечение из одного фрагмента; обобщение нескольких фрагментов; логический вывод	Для обобщения – наличие адресуемого основания для каждой части; для логического вывода – воспроизводимая цепочка исходных утверждений и правила
Основание	Для непосредственно извлечённого утверждения – один или несколько подтверждающих фрагментов; для выведенного – проверенные исходные утверждения и зафиксированное правило вывода	Доступность и точная адресация фрагментов либо воспроизводимость цепочки логического вывода
Сведения об источнике и обработке	Документ-источник, способ выделения фрагмента, исполнитель или средство обработки, дата обработки и версия применённых правил	Полнота сведений, необходимых для восстановления источника и процесса формирования записи
Статус проверки	Кандидатное, проверенное, отклонённое, требующее уточнения или устаревшее утверждение	Допустимость текущего статуса и корректность перехода между статусами

Таблица 5 - Правила проверки основных типов записей базы знаний научного направления

Тип записи	Минимальные сведения	Проверка
Публикация	Название, тип, авторы, год, источник издания, библиографический идентификатор при наличии	Сверка с первоисточником и библиографическими системами
Документ	Идентификатор файла, источник получения, формат, дата получения	Проверка доступности файла и соответствия публикации
Страница	Ссылка на документ, порядковый номер в файле, печатный номер при наличии	Сверка отображения и печатной нумерации
Текстовый фрагмент	Документ, страница, границы или координаты, исходный текст, способ выделения	Однозначный переход к фрагменту и проверка достаточности контекста
Понятие	Устойчивый идентификатор, предпочтительная метка, варианты наименования, связи с другими понятиями	Предметная проверка значения и связей
Автор / организация	Устойчивая запись объекта, подтверждённые варианты имени или названия, внешние идентификаторы при наличии	Сопоставление по совокупности признаков и источникам
Проверяемое утверждение	Тип, формулировка, связанные объекты, основание, сведения о происхождении и обработке, статус проверки (см. таблицу 4)	Сопоставление с основанием и проверка допустимости статуса

При формировании БЗНН необходимо учитывать не только техническую доступность публикации, но и условия её лицензирования. Для материалов, распространяемых по открытым лицензиям *Creative Commons*, условия повторного использования, атрибуции и распро-

странения определяются соответствующей лицензией. В рекомендациях *Creative Commons* отдельно рассматривается применение открытых лицензий в условиях использования научных материалов системами ИИ [31]. Для используемой публикации в БЗНН фиксируются источник, условия доступа, тип лицензии и допустимый режим повторного использования.

Таблица 6 - Критерии качества структурированной базы знаний

Критерий	Показатель	Способ проверки	Параметры оценки, задаваемые при применении
Библиографическая полнота	Доля публикаций, для которых указаны автор, год, тип и источник	Автоматический отчёт и выборочная сверка с первоисточниками	Для проверенного слоя обязательные библиографические поля должны быть заполнены полностью
Качество сопоставления страниц	Доля проверенных пар среди всех сопоставлений; доля правильных пар	Случайная или стратифицированная контрольная выборка с ручной сверкой	Для утверждений со статусом «проверенное» адресация к основанию должна быть подтверждена
Прослеживаемость	Доля проверенных утверждений, для которых восстановлена полная цепочка до исходного документа	Проверка цепочки «утверждение - основание - документ - публикация»	Для статуса «проверенное» обязательна полная цепочка до источника либо воспроизводимая цепочка логического вывода
Содержательная корректность	Доля проверенных утверждений, принятых экспертами	Независимая повторная экспертная проверка выбранной выборки	Публикуются объём проверенной выборки, число согласованных решений и число разногласий
Воспроизводимость	Полнота описания обработки и доля повторных запусков, удовлетворяющих заранее заданному критерию совпадения	Проверка метаданных и повторное выполнение обработки на контрольном наборе	Для автоматически сформированных проверенных записей должны быть зафиксированы средство, версия и существенные параметры обработки
Доступность и адресуемость основания	Доля подтверждающих оснований, для которых обеспечена однозначная адресация к требуемому фрагменту источника	Проверка точности адресации к фрагменту в независимой среде с учётом установленных прав доступа	Для проверенного непосредственно извлечённого утверждения требуется однозначно адресуемое основание; для выведенного – воспроизводимая цепочка исходных утверждений
Актуальность	Доля записей, повторно проверенных после изменения источника, модели или правил обработки	Проверка зависимостей, версий и статусов записей	Изменение источника, схемы или правила обработки инициирует повторную проверку всех зависимых записей
Правомерность доступа и распространения данных	Доля записей, для которых установлен правовой режим использования; число случаев включения материалов, распространение которых не допускается	Проверка лицензии или иных условий использования и адреса доступа; контроль экспортируемой версии БЗНН	Для случаев неправомерного включения материалов в экспорт целевое значение равно нулю; правила хранения и доступа фиксируются до начала обработки

3 Инструментальные основы построения и проверки базы знаний

3.1 Системы поиска и представления научных знаний

Для формирования БЗНН используются два взаимодополняющих контура источников. Первый контур образуют научные публикации и профильные площадки, по которым формируется содержательный массив публикаций исследуемого направления. Второй включает поисковые, библиографические и идентификационные системы, применяемые для обнаружения публикаций, сверки выходных данных, авторства, организаций, идентификаторов и

связей цитирования. Эти контуры имеют различный статус: публикация или её правомерно доступное цифровое представление служит первичным основанием содержательной записи; поисковая система используется как средство навигации и проверки метаданных [32-34].

Контролируемое ядро массива публикаций формируется из источников, тематически связанных с ОП и смежными направлениями. Расширение массива публикаций необходимо для сопоставления терминологии, выявления альтернативных способов формализации и учёта международного контекста. Принадлежность материала к профильному журналу, конференции или научному сообществу не означает его автоматического включения в БЗНН: для каждой публикации требуется содержательная проверка её связи с классами и задачами НН. Основные источники публикаций для формирования ядра НН ОП приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Источники публикаций для формирования ядра базы знаний научного направления ОП

Источники	Используемые данные	Ограничения использования
Журнал «Онтология проектирования» ²	Выпуски, статьи, страницы, библиографические сведения и полные тексты	Тематика журнала полностью соответствует НН ОП
Международная конференция «Знания – Онтологии – Теории» ³	Доклады и статьи по онтологиям, базам знаний, извлечению знаний и формализации предметных областей	Материалы выходят по итогам конференций; релевантность публикаций БЗНН ОП определяется содержательно
<i>Applied Ontology</i> ⁴	Статьи по формальным и прикладным онтологиям, моделям предметных областей и графам знаний	Тематика шире онтологии проектирования; требуется предметный отбор и проверка версии первоисточника
<i>Design Science</i> ⁵	Статьи о процессах и методах проектирования, проектных знаниях, принятии решений и моделировании	Публикации включаются только при содержательной связи с объектами и задачами БЗНН ОП
Журнал «Искусственный интеллект и принятие решений» ⁶	Статьи и обзоры по ИИ, представлению знаний, анализу и поддержке принятия решений	Факт применения ИИ не является основанием для включения работы в предметное ядро НН ОП
<i>FOUST (Foundational Ontology Workshop)</i> ⁷	Работы по фундаментальным онтологиям и верхнеуровневым категориям	Связь с проектированием требует обоснования
<i>FOIS (Formal Ontology in Information Systems)</i> ⁸	Работы по формальной онтологии, концептуальному моделированию и инженерии знаний	Требуется тематический отбор и проверка первоисточника
<i>International Association for Ontology and its Applications (IAOA)</i> ⁹	Сведения о профильных журналах, конференциях и публикационных сериях	Используется как навигационный ресурс; в БЗНН ОП включаются конкретные публикации
<i>Swiss Center for Ontological Research (SCOR)</i> ¹⁰	Сведения о проектах, мероприятиях и публикациях по онтологиям	Используется преимущественно для поиска и навигации
<i>ONTOBRAS (Seminar on Ontology Research in Brazil)</i> ¹¹	Материалы по онтологиям, моделированию и инженерии знаний	Включаются только релевантные публикации, проверенные по первоисточнику

²<https://www.ontology-of-designing.ru/>.

³<https://math.nsc.ru/events/zont/2023>.

⁴<https://journals.sagepub.com/home/apo>.

⁵<https://www.cambridge.org/core/journals/design-science>.

⁶<https://www.aidt.ru/ru/>.

⁷<https://foust.inf.unibz.it/>.

⁸<https://iaoa.org/index.php/fois/>.

⁹<https://iaoa.org/>.

¹⁰<https://swissonto.ch/>.

¹¹<https://www.inf.ufrgs.br/ontobras/en/>

Поисковые и библиографические системы помогают обнаружить публикацию, уточнить её библиографическое описание, сопоставить варианты имени автора или организации, установить устойчивый идентификатор и найти доступную версию документа. В БЗНН сохраняется конкретное значение записи вместе с указанием источника, из которого она получена. Если сведения расходятся, то значения сопоставляются, фиксируется источник каждого из них, принимается документированное решение. Информационные системы, используемые в формировании БЗНН, приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Информационные системы в формировании локальной базы знаний научного направления

Ресурс	Использование в БЗНН	Ограничения использования
eLIBRARY.RU ¹² (включая РИНЦ)	Поиск публикаций, сверка библиографических данных и получение текстов	Сведения требуют сверки с публикацией
ИСТИНА ¹³	Уточнение авторства, аффилиации и публикационной деятельности организаций	Полнота и актуальность записей зависят от порядка ведения сведений организацией
КиберЛенинка ¹⁴	Поиск публикаций и доступных полных текстов	Веб-представление не всегда сохраняет границы страниц; для адресации необходим PDF-файл
Scopus ¹⁵ / Web of Science ¹⁶	Внешняя библиографическая и библиометрическая сверка публикаций	Полный текст может требовать отдельного доступа
Google Scholar ¹⁷	Поиск и выявление публикаций, не обнаруженных в других источниках	Результаты формируются автоматически; полнота и устойчивость результатов не гарантируются
Crossref ¹⁸	Проверка DOI и библиографических сведений о публикации	Полнота и качество метаданных зависят от сведений, переданных издателем
ORCID ¹⁹ / ROR ²⁰	Идентификация исследователей и организаций	Совпадение имени или названия не подтверждает тождество; сведения требуют проверки
OpenAlex ²¹	Навигация по научным объектам и сопоставление публикаций, авторов, организаций, тематик и цитирования	При использовании локального поиска фиксируется его дата; тематическая разметка проверяется по первоисточнику
Semantic Scholar ²²	Дополнительный анализ связей, цитирования и тематических признаков	Автоматически сформированные признаки используются как вспомогательные и проверяются по первоисточнику
arxiv.org ²³	Поиск и тематическая навигация по современным научным публикациям	Используется для обнаружения релевантных работ и предварительного анализа
ResearchGate ²⁴	Поиск публикаций, авторов и доступных версий работ	Используется как навигационный и дополнительный поисковый ресурс
The Knowledge Graph Conference (KGC) ²⁵	Поиск работ и материалов по графам знаний, семантическим технологиям и ИИ	Используется преимущественно как навигационный источник

¹² <https://www.elibrary.ru/>

¹³ <https://istina.msu.ru/>

¹⁴ <https://cyberleninka.ru/>

¹⁵ <https://www.scopus.com/>

¹⁶ <https://www.webofscience.com/>

¹⁷ <https://scholar.google.com/>

¹⁸ <https://www.crossref.org/>

¹⁹ <https://orcid.org/>

²⁰ <https://ror.org/>

²¹ <https://openalex.org/>

²² <https://www.semanticscholar.org/>

²³ <https://www.arxiv.org/>

²⁴ <https://www.researchgate.net/>

²⁵ <https://www.knowledgraph.tech/>

Поиск и библиографическая сверка являются подготовительным этапом. Фиксируются источник, дата получения и способ проверки; библиографическая запись идентифицирует публикацию, а содержательное утверждение получает статус только после проверки основания. Внешние онтологии и словари используются по принципу минимально необходимого повторного использования (см. таблицу 9).

Таблица 9 – Внешние онтологии, словари и идентификационные ресурсы в базе знаний научного направления

Назначение	Ресурсы	Использование в БЗНН	Правила и ограничения
Авторы и организации	<i>FOAF</i> ²⁶ , <i>Schema.org</i> ²⁷ , <i>W3C ORG</i> ²⁸ , <i>ORCID</i> ²⁹ , <i>ROR</i> ³⁰	Идентификация исследователей и организаций, представление имени и аффилиации	Совпадение имён и названий не подтверждает тождество. Аффилиация фиксируется в контексте конкретной публикации и не означает постоянного членства или должности
Библиографические сведения	<i>DCMI Metadata Terms</i> ³¹	Название, автор, дата, язык, идентификатор, издание, права и лицензия	Значения библиографических полей должны иметь источник. Метаданные не используются как подтверждение содержания исследования
Тип и издательская структура публикации	<i>FaBiO</i> ³² , <i>FRBR</i> ³³ , <i>PRISM</i> ³⁴	Тип публикации, журнал, том, выпуск, издательские сведения и связь публикации с её цифровыми представлениями	Публикация и цифровой документ рассматриваются отдельно. DOI относится к публикации, а контрольная сумма и сведения о версии – к конкретному файлу
Документ и его версии	<i>DoCO</i> ³⁵	Представление разделов, абзацев, предложений, таблиц, рисунков, библиографии и текстовых фрагментов	Для файла сохраняются идентификатор, формат, источник получения и контрольная сумма. При изменении файла создаётся новая документная версия; адреса фрагментов проверяются повторно
Понятия и терминология	<i>SKOS</i> ³⁶	Связывание вариантов написания, сокращений и наименований с нормализованными понятиями; представление иерархических и ассоциативных связей	Связи между понятиями вводятся только при содержательном основании. Совместное употребление терминов в одной публикации не устанавливает смысловую связь
Цитирование	<i>CiTO</i> ³⁷	Представление факта цитирования и, при достаточном основании, его функции	При недостаточном контексте фиксируется только нейтральный факт ссылки. Функция цитирования не определяется только по номеру библиографической ссылки
Происхождение и обработка записей	<i>PROV-O</i> ³⁸	Фиксация источника, операции обработки, исполнителя или программного средства, производной записи и версии	Происхождение записи характеризует процесс её формирования, но не подтверждает правильность содержательной интерпретации. Происхождение и статус проверки учитываются отдельно

²⁶ <http://xmlns.com/foaf/spec/>

²⁷ <https://schema.org/>

²⁸ <https://www.w3.org/TR/vocab-org/>

²⁹ <https://orcid.org/>

³⁰ <https://ror.org/>

³¹ <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/>

³² <http://purl.org/spar/fabio>

³³ <http://purl.org/vocab/frbr/core>

³⁴ <http://prismstandard.org/namespaces/basic/3.0/>

³⁵ <https://sparontologies.github.io/doco/current/doco.html>

³⁶ <https://www.w3.org/TR/skos-reference/>

³⁷ <https://sparontologies.github.io/cito/current/cito.html>

³⁸ <https://www.w3.org/TR/prov-o/>

Ресурсы, рассматриваемые для повторного использования, выполняют разные функции. В таблице 9 ресурсы сопоставлены с элементами модели, для которых они могут использоваться. В основной части статьи используются только явно описанные классы, свойства и правила; выводы работы не зависят от внешней технической спецификации [35].

Внешние онтологии, словари и научные информационные ресурсы используются в БЗНН для представления отдельных типов сведений, их идентификации и связывания [36]. При этом сведения о происхождении записи, библиографические метаданные и результаты автоматического анализа не рассматриваются как самостоятельное подтверждение содержательного утверждения. Такое подтверждение устанавливается по конкретному фрагменту источника либо по зафиксированной цепочке логического вывода.

Для формального описания ОНН используется язык *OWL 2*. В предлагаемой модели применяется профиль *OWL 2 DL*, позволяющий представить классы, свойства, экземпляры и аксиомы, необходимые для структуры БЗНН.

3.2 Построение и проверка базы знаний

Построение БЗНН включает восемь этапов, которые задают требуемые результаты и проверки. Операции описывают практическую последовательность обработки публикаций. Предлагаемый порядок формирования БЗНН основан на сочетании принципов *METHONTOLOGY*, *NeOn*, *Ontology Development 101* и подходов к использованию компетентностных вопросов [37-40]. Их применение в БЗНН (см. таблицу 10) конкретизировано с учётом требования прослеживаемости утверждений до проверяемых источников.

Таблица 10 - Методические основания предлагаемого порядка построения базы знаний научного направления

Источник	Заемствуемый принцип	Применение в БЗНН
<i>METHONTOLOGY</i> [39]	Жизненный цикл, документирование, оценка и сопровождение	Этапы БЗНН имеют формально определённые входы, результаты, подтверждения, условия завершения и правила возврата
<i>NeOn</i> [40]	Повторное использование и эволюция внешних онтологий	До введения собственного элемента оценивается существующий ресурс; фиксируются решение, версия и основание повторного использования
<i>Ontology Development 101</i> [41]	Итеративное уточнение области, классов, свойств и экземпляров	Результаты испытаний могут возвращать разработку к определениям, структуре классов, свойствам или примерам
Принципы онтологического проектирования [38]	Компетентностные вопросы и оценка пригодности модели	Каждый вопрос преобразуется в проверяемое испытание с данными, ожидаемым результатом и правилом приёма

До начала наполнения БЗНН устанавливаются границы массива публикаций, критерии их включения, допустимые типы источников, обязательные сведения и перечень компетентностных вопросов. Полнота оценивается относительно заданных границ. Их изменение оформляется как новая итерация с повторной оценкой соответствующих результатов.

Для каждого этапа определяются исходные данные, выполняемое действие, ожидаемый результат, способ его подтверждения, условие завершения и правило возврата к предыдущим операциям при обнаружении несоответствий.

Основные этапы построения БЗНН:

- 1) определение границ области и формулирование вопросов;
- 2) отбор внешних онтологий и словарей;
- 3) описание понятий, свойств и обязательных сведений;
- 4) формализация онтологии НН;

- 5) наполнение БЗНН сведениями из источников;
- 6) техническая и логическая проверка;
- 7) содержательная экспертная проверка;
- 8) публикация проверенной версии БЗНН.

Формальное описание i -го этапа представляется кортежем:

$$e_i = \langle X_i, A_i, Y_i, E_i, C_i, R_i \rangle, \quad i = 1, \dots, 8, \quad \text{где:}$$

X_i - входные данные этапа, то есть сведения, документы, записи БЗНН или результаты предыдущих этапов, необходимые для выполнения текущей операции;

A_i - действие, выполняемое над входными данными, включающее автоматизированную обработку, формальное преобразование, сопоставление данных или экспертную проверку;

Y_i - результат этапа, который получается после выполнения действия, в форме, позволяющей проверить его наличие и соответствие установленным требованиям;

E_i - подтверждение результата, содержащее сведения, по которым можно установить, каким образом был получен результат и на каком основании он принимается;

C_i - условие завершения этапа, определяющее требования, при выполнении которых результат признаётся достаточным для перехода к следующему этапу;

R_i - правило возврата, определяющее дальнейшие действия при невыполнении условия C_i : повторную обработку данных, уточнение исходных сведений, исправление обнаруженного несоответствия или возврат к предыдущему этапу.

Условие завершения C_i устанавливается до выполнения этапа. Проверка выполняется путём сопоставления результата Y_i и подтверждающих его данных E_i с установленным условием C_i . Если условие выполнено, результат этапа принимается и может использоваться на следующем этапе. Если оно не выполнено, применяется правило возврата R_i . Это позволяет сохранять связь между выполненной операцией, полученным результатом и основанием для его принятия. Единый критерий завершения для всех этапов не устанавливается, поскольку характер проверяемых результатов различается.

Для каждой конкретной проверки до её выполнения определяются способ оценки, состав проверяемой выборки, правило принятия результата и порядок рассмотрения расхождений. Для количественных оценок проверяемых характеристик может задаваться соответствующий показатель, а для содержательной оценки фиксируется решение специалиста и порядок разрешения разногласий. Результат считается завершённым после выполнения установленного для данного этапа условия C_i .

Проверка БЗНН включает: синтаксическую, логическую, запросную, доказательную, содержательную и воспроизводимую (см. таблицу 11). Эти механизмы обнаруживают разные типы ошибок и не заменяют друг друга [41, 42]. Если используется выборочная оценка, то заранее определяется способ подсчёта, отбора, объём выборки и порядок разрешения разногласий. После проверки публикуются положительные результаты и выявленные ошибки.

Типовые несогласованности, правила их обработки и доказательные основания представлены в таблице 12. Проверяется не только логическая корректность модели, но и соблюдение прикладных требований: фрагмент должен быть однозначно связан с документом, выведенное утверждение – с исходными утверждениями и правилом вывода. Автоматически сформированная связь не может считаться проверенной без соответствующей процедуры.

При изменении ОНН, документа или правил обработки повторно проверяются только зависимые записи. Если внешние источники содержат различающиеся сведения, сохраняются оба варианта и фиксируется основание принятого решения.

Таблица 11 - Основные виды проверки базы знаний научного направления

Вид проверки	Объект	Критерий	Подтверждение
Синтаксическая	Файлы онтологии и данных	Корректность формата и возможность загрузки	Отчёт валидатора или журнал загрузки
Логическая	Аксиомы ОНН и формальные утверждения	Логическая согласованность модели и получение ожидаемых следствий	Отчёт механизма логического вывода; конфликтующие позиции источников хранятся как атрибутированные утверждения
Проверка запросов	Компетентностные вопросы и контрольный набор	Получение ожидаемого ответа и всех обязательных связанных объектов	Набор тестовых запросов, входных данных и ожидаемых результатов
Прослеживаемость	Проверяемые утверждения, документы и фрагменты	Однозначный переход к основанию и соответствующей версии файла	Автоматический отчёт и выборочная ручная сверка
Содержательная	Утверждения, понятия и проектные сущности	Соответствие источнику, сохранение модальности и корректность типизации	Экспертные оценки, протокол разногласий и решение по статусу
Воспроизводимость	Версия БЗНН и процесс обработки	Повторение заявленных проверок на контрольном наборе	Версии программ, параметры и результаты повторного запуска

Таблица 12 - Типовые несогласованности и правило их обработки

Тип несогласованности	Признак	Правило обработки
Различающиеся библиографические значения	Одно поле имеет разные значения в нескольких источниках	Сохраняются все варианты и их источники; приоритет определяется по первоисточнику
Несоответствие публикации и документа	Файл не подтверждает связь с указанной публикацией	Связь временно получает статус кандидатной и проверяется повторно
Нарушение адресации фрагмента	Невозможно однозначно восстановить исходный текст	Фрагмент выделяется повторно для конкретной версии документа; зависимые утверждения требуют повторной проверки
Терминологический конфликт	Одна языковая форма связана с разными понятиями либо созданы дубли	Выполняется предметная проверка; связи терминов и понятий корректируются без автоматического слияния записей
Конфликт формальной и предметной моделей	Формально допустимая аксиома противоречит принятому определению или примерам	Уточняются смысл аксиомы, область её действия и соответствующие определения
Утверждение без достаточного основания	Фрагмент не подтверждает автоматически сформированное утверждение	Запись сохраняется как кандидатная либо отклоняется; смысл исходного текста не усиливается и не ослабляется

4 Формирование, наполнение и использование базы знаний

На рисунке 2 представлена последовательность формирования и использования БЗНН. На начальных этапах определяются источники публикаций, критерии их включения и способы поиска. Профильные издания и научные мероприятия образуют основной информационный контур, а библиографические, поисковые и идентификационные системы используются для расширения поиска и проверки метаданных. Для включения публикации учитываются её тематическая релевантность, тип документа, возможность идентификации и наличие доступного источника. Найденные материалы первоначально рассматриваются как кандидаты.

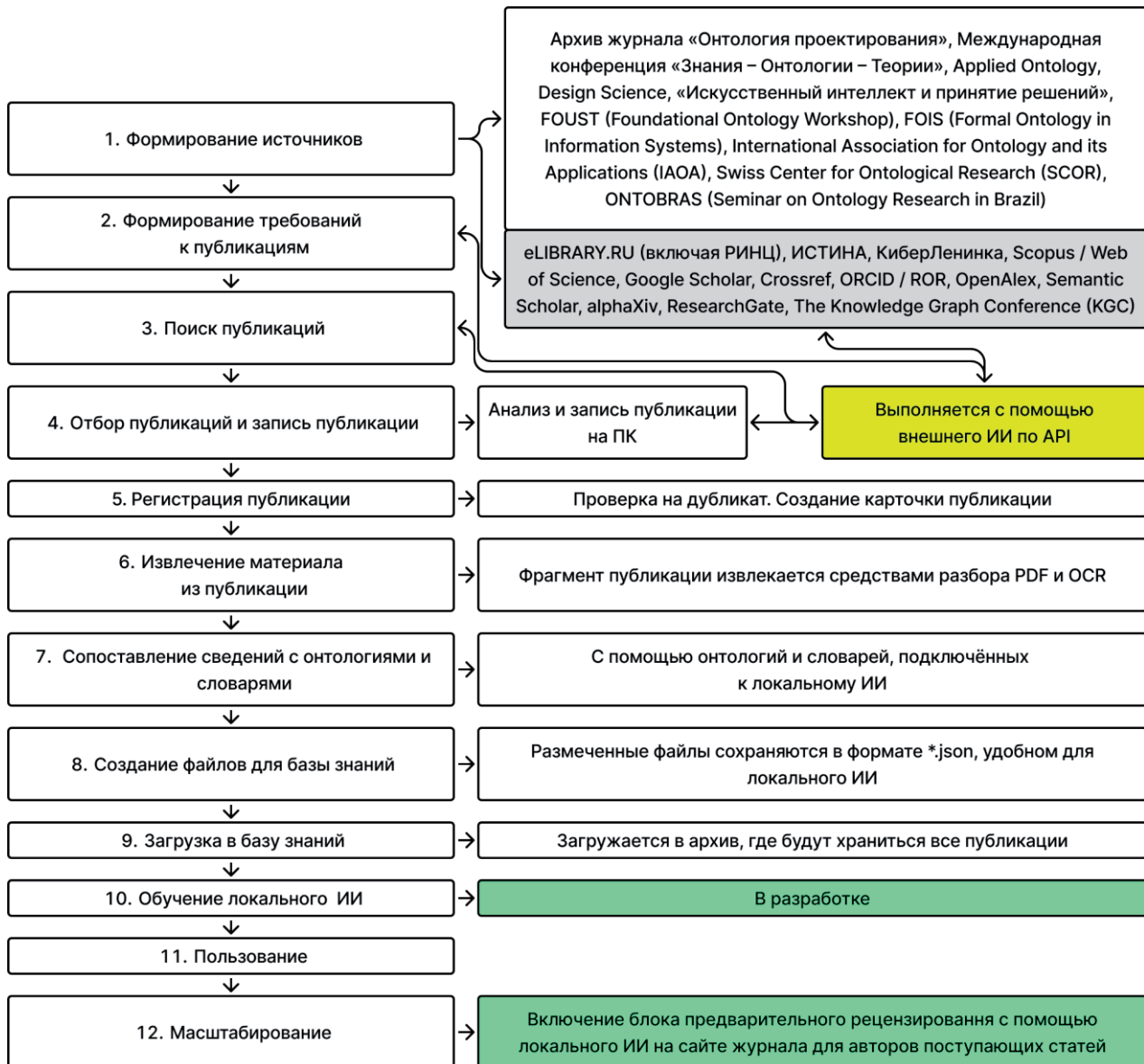


Рисунок 2 - Последовательность формирования, наполнения и использования базы знаний научного направления

После отбора публикация регистрируется в БЗНН, а её цифровая версия сохраняется отдельно с указанием источника и идентификационных данных. Перед созданием новой записи выполняется проверка дубликатов по *DOI* и другим библиографическим признакам.

Из цифровых документов извлекаются текст, структура страниц и фрагменты, необходимые для последующего формирования содержательных записей. Для документов с доступным текстовым слоем используется непосредственное извлечение текста, а для сканированных материалов – оптическое распознавание символов (*OCR*) [43].

Каждый извлечённый фрагмент связывается с конкретным документом и страницей. Сведения о способе извлечения сохраняются, а значимые фрагменты проверяются по первоисточнику. Такая адресация обеспечивает возможность восстановить основание содержательного утверждения. Извлечённые фрагменты сопоставляются с понятиями и классами ОНН с использованием выбранных онтологий и словарей. Автоматическое сопоставление

рассматривается как предварительное: окончательная связь устанавливается только при наличии достаточного содержательного основания.

Для передачи результатов между средствами обработки и БЗНН может использоваться структурированный файл в формате *JSON*³⁹, содержащий идентификаторы публикации, документа и фрагмента, тип записи, связи с объектами ОНН, сведения о происхождении и статус проверки. В БЗНН загружаются сведения, прошедшие предусмотренную проверку. Не проверенные результаты автоматического анализа сохраняются отдельно и не смешиваются с подтверждёнными записями. Полные тексты публикаций остаются в документном хранилище, а БЗНН содержит формализованные сведения и ссылки на их основания.

5 Демонстрация пилотной версии «Онтологического ассистента»

Работоспособность пилотной версии разрабатываемого «Онтологического ассистента» удобно показать на примере трактата Витрувия «Десять книг об архитектуре» [6, 44]. Витрувий, как признанный основоположник НН ОП, предметно и подробно описал тот уровень знаний, которыми обладали архитекторы соответствующего исторического периода. С этой целью оцифрованный его трактат был загружен в локальную БЗ. Задача – показать, как ответы на компетентностные вопросы связываются с фрагментами выбранного источника, и как трансформируется изложение трактата в генерируемый текст.

Текст трактата разделён на адресуемые фрагменты, связанные с книгой, главой и страницей используемой цифровой версии. На рисунке 3 представлен скриншот, содержащий один из вопросов, заданный пользователем, и ответ с объяснением и указанием на конкретный фрагмент загруженной БЗ, а в таблице 13 приведены два компетентностных вопроса и ответы, полученные пилотной версией разрабатываемого «Онтологического ассистента».

6 Классификации журнальных статей

Рассматривается тематическая характеристика публикаций из 419 записей *OpenAlex*⁴⁰ и сопоставляется на уровне описательных показателей с рабочим массивом из 505 научных статей в этом журнале. Единицы учёта различаются, поэтому отношение 419/505 не является показателем покрытия. Дата и параметры исходной выгрузки, идентификатор источника и точный запрос в текущей версии рукописи не приведены; следовательно, результаты этого раздела не используются как воспроизводимая оценка полноты архива [45].

Для расчёта используется уровень *field* в тематической иерархии *OpenAlex*. Тематические метки публикаций агрегировались по соответствующим областям *field*, при этом одна публикация учитывалась в одной и той же области не более одного раза. Поскольку одна публикация может быть связана с несколькими областями *field*, полученные доли не являются взаимоисключающими, и их сумма может превышать 100 %.

В таблице 14 показаны наиболее представленные области, остальные объединены в строку «Прочие области». Полученные показатели характеризуют только данный внешний набор и не являются нормативным отнесением публикаций к НС.

Для оценки фактического покрытия необходимо постатейно сопоставить записи с архивом: по нормализованному DOI, а при его отсутствии – по названию, году и авторам, с отдельным учётом дубликатов и неоднозначных случаев. *OpenAlex* используется здесь как внешний источник тематических меток (см. рисунок 4).

³⁹<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8259>.

⁴⁰<https://help.openalex.org/data/fields/>

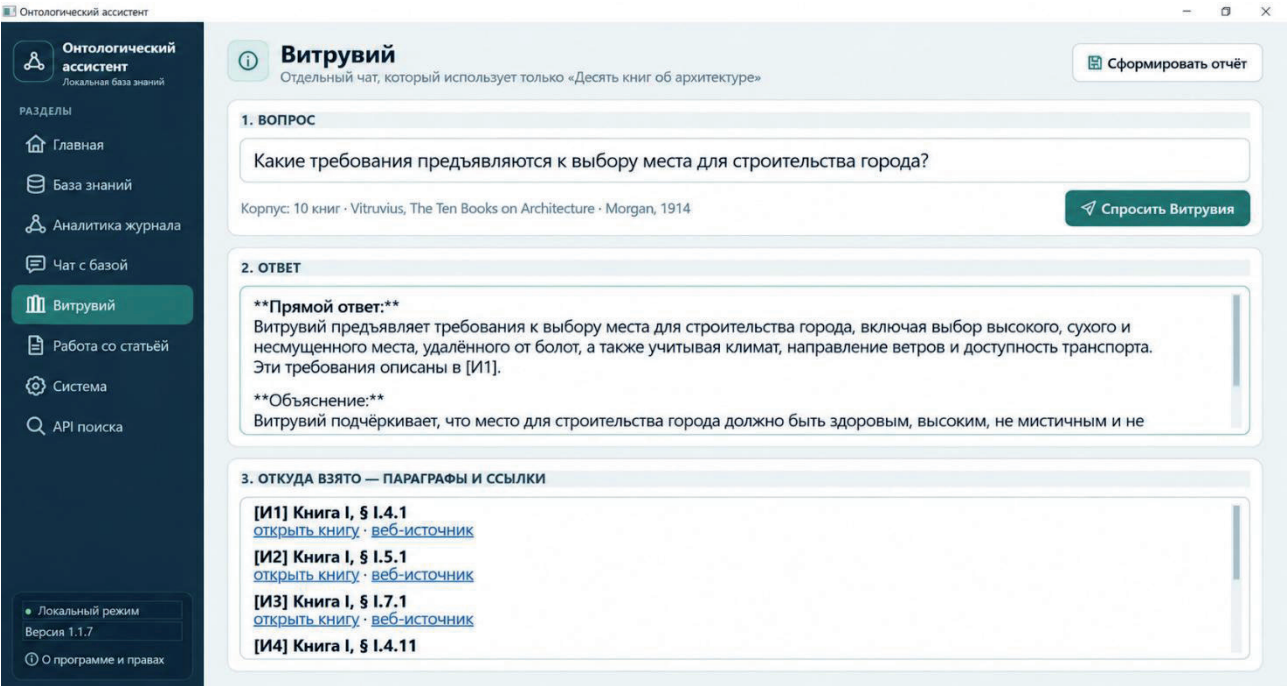


Рисунок 3 - Пример работы вопросно-ответного модуля «Онтологического ассистента» на материале трактата Витрувия

Таблица 13 – Компетентностные (контрольные) вопросы и ответы «Онтологического ассистента»

Вопрос	Ожидаемая об- ласть источника	Ответ, полученный от «Онтологического ассистента»
Какие требования относятся к строительству театра?	Книга V: место, основание, планировка, зрительные места, акустика	В строительстве театра Витрувий предъявляет требования к симметрии, учитывая при этом удобство и функциональность, а также акустические и гигиенические условия. Строительство должно учитывать расположение здания на здоровом месте, обеспечивать хорошую акустическую среду, использовать правильные пропорции и планировку, а также предусмотреть достаточное количество выходов для зрителей.
Какие материалы и механизмы упоминаются в связи со строительными работами?	Книги II, V и X: строительные материалы, устройство театра и отдельные подъёмные механизмы	Механизмы: подъёмные машины, которые используются для подъёма тяжелых грузов при строительстве храмов и общественных зданий. Эти механизмы включают в себя тонкие доски, болт, верёвки, блоки и шестерни, позволяющие передавать силу и перемещать грузы [I1]. Материалы: в текстах говорится о различных материалах, используемых в строительстве, таких как дерево (в частности, дуб), камень (мрамор, каменные блоки), глина, а также о том, что некоторые материалы, такие как дуб, обладают хорошими свойствами при правильной обработке [I2], [I4], [I6]. Также упоминается использование древесных пилонов во влажных местах, которые не разрушаются из-за высокой влажности [I6]. В текстах Витрувия не говорится о конкретных типах строительных материалов, кроме упомянутых выше, и не описывается использование других материалов, таких как кирпич или бетон. Также не раскрываются детали использования других механизмов, кроме подъёмных машин.

Таблица 14 - Наиболее представленные направления *OpenAlex*

Область <i>OpenAlex</i> (field)	Работ / отнесений	Доля от 419, %
Компьютерные науки	187	44,6
Инженерные науки	187	44,6
Бизнес, управление и учёт	135	32,2
Социальные науки	62	14,8
Медицина	40	9,5
Науки об окружающей среде	38	9,1
Науки о принятии решений	23	5,5
Прочие области	74 отнесения суммарно	не является долей уникальных работ

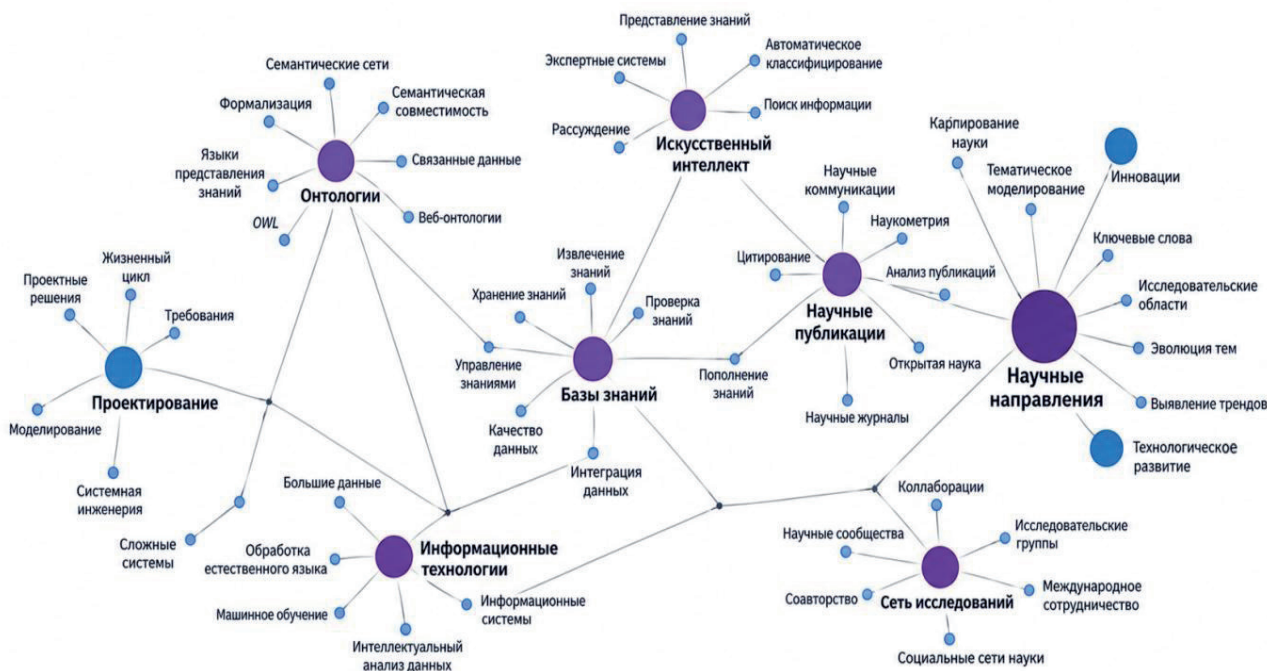


Рисунок 4 - Граф тематических связей внешнего набора публикаций по данным *OpenAlex*

Сопоставление с паспортами НС ВАК⁴¹ рассматривается как двухэтапная процедура: автоматизированный поиск публикаций-кандидатов по словарным признакам; содержательная проверка связи с конкретным пунктом паспорта. Поисковая метка не означает окончательного отнесения статьи к НС [46].

Единицей анализа является одна из 505 научных статей журнала «Онтология проектирования». Для каждой найденной связи модель предусматривает сохранение статьи, кода НС, поискового выражения, подтверждающего фрагмента и решения специалиста. Число фактически проверенных экспертами связей, схема выборки и статистика разногласий не приведены, поэтому все количественные результаты раздела относятся только к поисковым кандидатам. Кандидат формируется, если в подготовленном тексте статьи найдено хотя бы одно выражение из словаря соответствующей НС. Полные словари, правила учёта словоформ, отрицаний, англоязычного текста, библиографии и ошибок *OCR* не приводятся. Результаты этого раздела следует интерпретировать как итог применённых поисковых правил, а не как воспроизводимую или подтверждённую классификацию статей.

Для десяти НС, указанных на сайте журнала, получены значения, приведённые в таблице 15. НС 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение» рассматривается отдельно: её экспериментальное добавление не включено в основные показатели.

⁴¹https://vak.minobrnauki.gov.ru/searching#tab=_tab:materials~

Таблица 15 – Предварительная оценка числа публикаций-кандидатов по действующим специальностям

Код	Наименование	Кандидатов	Доля от 505, %
1.2.2	Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	46	8,8
2.3.1	Системный анализ, управление и обработка информации, статистика	131	25,2
2.3.4	Управление в организационных системах	32	6,2
2.3.5	Математическое и программное обеспечение вычислительных систем	115	22,1
2.3.7	Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования	32	6,2
2.3.8	Информатика и информационные процессы	180	34,6
2.5.1	Инженерная геометрия и компьютерная графика; цифровая поддержка жизненного цикла изделий	15	2,9
2.5.13	Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов	24	4,6
2.5.15	Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов	7	1,3
5.12.4	Когнитивное моделирование	116	22,3
		698	134,2

Сумма значений по строкам превышает 505, поскольку одна статья может получить несколько предварительных меток в разных НС. Наибольшее число кандидатов связано с НС 2.3.8, 2.3.1, 5.12.4 и 2.3.5. Размер узла (областей НС) на рисунке 5 пропорционален числу публикаций-кандидатов соответствующей НС, а внутри узла показаны доли от общего массива. Толщина связывающих линий пропорциональна близости (пересечению НС) затронутых в публикациях-кандидатах тем этих НС. Стоит отдельно отметить НС 2.5.13 и 2.5.15, которые являются профильными ПрО для учредителей журнала и многих членов редколлегии. Эти высокотехнологичные представители сложных систем как локомотив подтягивают другие ПрО в область формализации знаний, в область ОП.

Бурный рост работ в области ИИ и машинного обучения (НС 1.2.1) и необходимость интеграции этих исследований с онтологиями различных ПрО отразились на интересе авторов и читателей журнала к этой тематике. На рисунке 6 приведена карта связей НС по результатам предварительного сопоставления с экспериментальным включением НС 1.2.1. В этом экспериментальном включении прежний расклад статей сохранился, но видно, что значительное число работ также коррелирует с НС 1.2.1, которая органично вписалась в четвёрку лидеров НС 2.3.8, 2.3.1, 5.12.4 и 2.3.5, установив с ними «устойчивые связи».

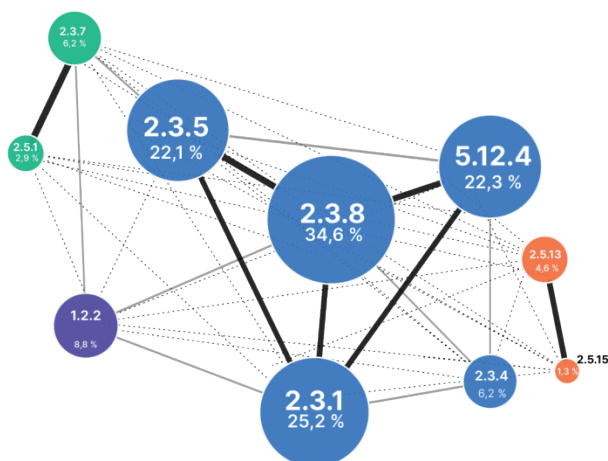


Рисунок 5 – Карта связей научных специальностей по результатам предварительного сопоставления публикаций журнала

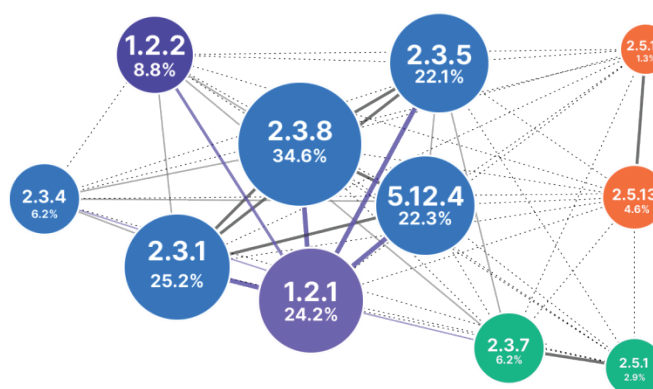


Рисунок 6 – Карта связей научных специальностей по результатам предварительного сопоставления с экспериментальным включением специальности 1.2.1

Для окончательного заключения по опубликованной в журнале статье требуется установить объект и задачу исследования, роль метода, научный результат и соответствующий пункт паспорта НС. Представленный результат характеризуют публикации-кандидаты. Современные паспорта НС применяются к архиву ретроспективно; это тематическое сопоставление, а не утверждение о формальной НС, присвоенной публикации в момент её выхода.

На рисунках 7 и 8 представлены: матрица попарных пересечений публикаций-кандидатов по НС, указанным в тематике журнала; матрица попарных пересечений публикаций-кандидатов по НС с экспериментальным включением НС 1.2.1. В ячейках указаны значения числа публикаций и значения меры сходства между множествами j (соответствует коэффициенту Жаккара). Фиолетовым цветом на рисунках 6 и 8 выделена НС 1.2.1 и её связи, полученные после пересчёта.

	2.3.8	2.3.1	5.12.4	2.3.5	2.3.4	1.2.2	2.3.7	2.5.1	2.5.13	2.5.15
2.3.8	180 всего	60 J=0,24	62 J=0,26	65 J=0,28	16 J=0,08	23 J=0,11	12 J=0,06	4 J=0,02	10 J=0,05	3 J=0,02
2.3.1	60 J=0,24	131 всего	45 J=0,22	44 J=0,22	18 J=0,12	17 J=0,11	9 J=0,06	1 J=0,01	6 J=0,04	1 J=0,01
5.12.4	62 J=0,26	45 J=0,22	116 всего	31 J=0,16	11 J=0,08	8 J=0,05	10 J=0,07	4 J=0,03	8 J=0,06	1 J=0,01
2.3.5	65 J=0,28	44 J=0,22	31 J=0,16	115 всего	7 J=0,05	8 J=0,05	13 J=0,10	6 J=0,05	6 J=0,05	4 J=0,03
2.3.4	16 J=0,08	18 J=0,12	11 J=0,08	7 J=0,05	32 всего	3 J=0,04	2 J=0,03	2 J=0,04	1 J=0,03	1 J=0,03
1.2.2	23 J=0,11	17 J=0,11	8 J=0,05	8 J=0,05	3 J=0,04	46 всего	6 J=0,08	1 J=0,02	2 J=0,03	1 J=0,02
2.3.7	12 J=0,06	9 J=0,06	10 J=0,07	13 J=0,10	2 J=0,03	6 J=0,08	32 всего	11 J=0,31	4 J=0,08	1 J=0,03
2.5.1	4 J=0,02	1 J=0,01	4 J=0,03	6 J=0,05	-	1 J=0,02	11 J=0,31	15 всего	1 J=0,03	-
2.5.13	10 J=0,05	6 J=0,04	8 J=0,06	6 J=0,05	2 J=0,04	2 J=0,03	4 J=0,08	1 J=0,03	24 всего	6 J=0,24
2.5.15	3 J=0,02	1 J=0,01	1 J=0,01	4 J=0,03	1 J=0,03	1 J=0,02	1 J=0,03	-	6 J=0,24	7 всего

Рисунок 7 – Матрица попарных пересечений публикаций-кандидатов по научным специальностям, указанным в тематике журнала

	2.3.8	2.3.1	1.2.1	5.12.4	2.3.5	2.3.4	1.2.2	2.3.7	2.5.1	2.5.13	2.5.15
2.3.8	180 всего	60 J=0,24	103 J=0,51	62 J=0,26	65 J=0,28	16 J=0,08	23 J=0,11	12 J=0,06	4 J=0,02	10 J=0,05	3 J=0,02
2.3.1	60 J=0,24	131 всего	82 J=0,47	45 J=0,22	44 J=0,22	18 J=0,12	17 J=0,11	9 J=0,06	1 J=0,01	6 J=0,04	1 J=0,01
1.2.1	103 J=0,51	82 J=0,47	126 всего	75 J=0,45	71 J=0,42	24 J=0,18	31 J=0,22	18 J=0,13	4 J=0,03	5 J=0,03	1 J=0,01
5.12.4	62 J=0,26	45 J=0,22	75 J=0,45	116 всего	31 J=0,15	11 J=0,08	8 J=0,05	10 J=0,07	4 J=0,03	8 J=0,06	1 J=0,01
2.3.5	65 J=0,28	44 J=0,22	71 J=0,42	31 J=0,15	115 всего	7 J=0,05	8 J=0,05	13 J=0,10	6 J=0,05	6 J=0,05	4 J=0,03
2.3.4	16 J=0,08	18 J=0,12	24 J=0,18	11 J=0,08	7 J=0,05	32 всего	3 J=0,04	2 J=0,03	0 J=0,00	2 J=0,04	1 J=0,03
1.2.2	23 J=0,11	17 J=0,11	31 J=0,22	8 J=0,05	8 J=0,05	3 J=0,04	46 всего	6 J=0,08	1 J=0,02	2 J=0,03	1 J=0,02
2.3.7	12 J=0,06	9 J=0,06	18 J=0,13	10 J=0,07	13 J=0,10	2 J=0,03	6 J=0,08	32 всего	11 J=0,31	4 J=0,08	1 J=0,03
2.5.1	4 J=0,02	1 J=0,01	4 J=0,03	6 J=0,05	0 J=0,00	1 J=0,02	11 J=0,31	15 всего	1 J=0,03	0 J=0,00	0
2.5.13	10 J=0,05	6 J=0,04	5 J=0,03	8 J=0,06	6 J=0,05	2 J=0,04	2 J=0,03	4 J=0,08	1 J=0,03	24 всего	6 J=0,24
2.5.15	3 J=0,02	1 J=0,01	1 J=0,01	4 J=0,03	1 J=0,03	1 J=0,02	1 J=0,03	0 J=0,00	6 J=0,24	7 всего	7

Рисунок 8 – Матрица попарных пересечений публикаций-кандидатов по научным специальностям с экспериментальным включением специальности 1.2.1

7 Условия переноса модели в другие научные направления

Предлагаемая модель разделяется на общее ядро и предметную часть. К общему ядру относятся публикация, документ, страница, фрагмент, автор, организация, понятие, проверяемое утверждение, источник и статус проверки. При переносе сохраняются доказательная модель, правила версионирования и критерии качества, а предметные классы, словари и компетентностные вопросы формируются заново.

Перенос выполняется в четыре шага: определение границ нового НН; анализ терминологии и внешних словарей; замена или расширение предметных классов; техническая и содержательная проверка на контрольных публикациях. Автоматическое копирование предметной модели без проверки определений и примеров недопустимо.

Контрольная выборка для будущего опыта переноса должна содержать положительные, отрицательные и неоднозначные примеры для ключевых классов и отношений и обеспечивать проверку всех компетентностных вопросов. Объём выборки и правило остановки должны задаваться до эксперимента. Контрольные запросы должны давать воспроизводимые от-

веты или корректно фиксировать отсутствие ответа; критические логические противоречия должны отсутствовать; каждое проверенное утверждение должно иметь прослеживаемое основание либо проверенную цепочку вывода; предметные классы должны быть подтверждены экспертной оценкой.

Основное ограничение связано с масштабированием. При переходе от 505 публикаций к тысячам документов растут затраты на извлечение, хранение версий и особенно на содержательную проверку.

Второе ограничение - зависимость от качества и изменчивости внешних источников. Метаданные *OpenAlex*, *Crossref* и других систем могут обновляться независимо от локальной БЗНН; для воспроизводимости требуется фиксировать дату получения, идентификаторы и версии выгрузок. Современные исследования научных ГЗ также отмечают проблемы качества метаданных, подлинности и пригодности данных для исследовательской оценки [47].

Третье ограничение относится к многоязычным текстам и автоматической обработке. Термины разных языков нельзя объединять только по машинному переводу; необходимы языковые метки, предметная нормализация и проверка неоднозначных соответствий. Средства ИИ могут снижать трудоёмкость подготовки компетентностных вопросов и предварительной разметки, однако современные эксперименты подтверждают необходимость специальных процедур оценки и участия эксперта [48].

Заключение

В работе предложен подход к формализации БЗНН, основанный на совместном использовании предметной онтологии, проверяемых содержательных утверждений, адресуемых оснований и явно фиксируемых статусов проверки. Такой подход позволяет перейти от простого накопления библиографических и текстовых данных к структурированному представлению научного содержания, в котором каждое значимое утверждение может быть связано с конкретным первоисточником и проверено по нему.

Разработанная структура БЗ объединяет библиографический, документный, понятийный и доказательный слои представления информации. Это позволяет хранить не только сведения о публикациях, авторах и источниках, но и формализованное содержание исследований, используемые понятия, методы, результаты, ограничения и связи между ними. Существенным элементом предложенной модели является сохранение происхождения данных: для непосредственно извлечённых утверждений фиксируются подтверждающие фрагменты исходного текста, а для логически выведенных – исходные проверенные утверждения и применённые правила вывода. Тем самым обеспечиваются прослеживаемость, проверяемость и воспроизводимость формирования содержательных записей.

Предложена методика построения, наполнения и верификации БЗ, предусматривающая разделение логической проверки онтологии, прикладной проверки полноты и корректности заполнения данных и содержательной экспертной оценки. Автоматизированные средства, включая алгоритмы машинного обучения, рассматриваются как инструмент поиска, извлечения, предварительной классификации и формирования кандидатных связей, однако окончательное включение содержательных утверждений в проверенный слой БЗ должно осуществляться после подтверждения их основания.

Возможность применения доказательной схемы представления знаний рассмотрена на примере труда Витрувия «Десять книг об архитектуре». Этот пример показал применение принципа организации связи между вопросом, найденным фрагментом первоисточника и формируемым содержательным утверждением. Данный опыт следует рассматривать именно как демонстрацию порядка работы с источником.

Для количественного анализа использован массив из 505 научных статей журнала «Онтология проектирования». Внешний набор *OpenAlex* применён для описательной тематической характеристики. Предварительное сопоставление статей с паспортами НС ВАК выполнялось с помощью словарных поисковых правил и позволило сформировать массив публикаций-кандидатов для последующей содержательной проверки. Экспериментальное добавление НС 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение» использовано для оценки возможности расширения анализируемой классификационной схемы.

Предложенный подход может использоваться для систематизации научных знаний, выявления содержательных и тематических связей между публикациями, сопоставления объектов исследования, методов и научных результатов, а также для определения областей, требующих дальнейшего изучения. Формируемая БЗ может выступать информационной основой для анализа состояния и развития НН, оценки места новой работы в структуре имеющихся знаний и поддержки редакционной и рецензионной деятельности.

В настоящей работе не получены окончательные количественные оценки точности вопросно-ответного модуля, полноты сопоставления локального массива с *OpenAlex*, качества словарной классификации по НС и эффективности переноса модели на другие ПрО.

Дальнейшая работа должна включать практическое применение БЗ при входном контроле и рецензировании новых научных работ с оценкой качества рекомендаций, времени обработки и удобства работы специалистов. Это позволит перейти от предложенной формальной схемы к проверенной информационной технологии сопровождения и развития НН.

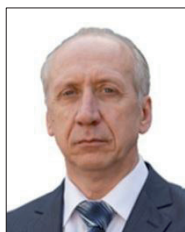
Список источников

- [1] *Constantin A., Peroni S., Pettifer S., Shotton D., Vitali F.* The Document Components Ontology (DoCO). *Semantic Web*. 2016. Vol.7, No.2. P.167-181. DOI: 10.3233/SW-150177.
- [2] *Hogan A., Blomqvist E., Cochez M. et al.* Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021. Vol.54, No.4. Article 71. DOI: 10.1145/3447772.
- [3] **Боргест Н.М.** Научный базис онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2013. №1(7). С.7–25.
- [4] **Боргест Н.М.** Ключевые термины онтологии проектирования: обзор, анализ, обобщения. *Онтология проектирования*. 2013. №3(9). С.9–31.
- [5] **Боргест Н.М.** Границы онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №1(23). С.7-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.
- [6] **Боргест Н.М.** Онтологии проектирования от Витрувия до Виттиха. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4(30). С.487-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.
- [7] **Боргест Н.М.** Формирование и развитие научной дисциплины «онтология проектирования»: краткая история личностного опыта. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №4(38). С.415-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-415-448.
- [8] **Боргест Н.М.** Онтология проектирования научного направления: формирование, развитие, примеры. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.136-157. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-136-157.
- [9] **Боргест Н.М.** Проблемы разработки и развития онтологии науки: анализ классификаций. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №3(45). С.278-298. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-278-298.
- [10] **Боргест Н.М.** Понятие «множество» в теории и практике проектирования. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №3(49). С.306-332. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-306-332.
- [11] **Боргест Н.М.** Системный и онтологический анализы: схожесть и различие понятий. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.9-28. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [12] **Боргест Н.М., Коровин М.Д.** Онтологии: современное состояние, краткий обзор. *Онтология проектирования*. 2013. №2(8). С.49–55.
- [13] **Боргест Н.М., Гиматинова С.Р., Шустова Д.В.** Иерархические и ассоциативные связи между терминами в тезаурусе на примере словаря проектанта. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. №2(33). С.228-236.
- [14] **Буракова Е.Е., Боргест Н.М., Коровин М.Д.** Языки описания онтологий для технических предметных областей. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2014. №3(45). С.144-158.

- [15] **Загорулько Ю.А., Сидорова Е.А., Загорулько Г.Б., Ахмадеева И.Р., Серый А.С.** Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №4(42). С.500-520. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.
- [16] **Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю.** Использование онтологических шаблонов содержания при построении баз знаний для технического обслуживания и ремонта авиационной техники. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.158-171. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-158-171.
- [17] **Грибова В.В., Парикова С.В., Федорищев Л.А.** Онтологии для разработки и генерации адаптивных пользовательских интерфейсов редакторов баз знаний. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.200-217. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-200-217.
- [18] **Кудрявцев Д.В., Беглер А.М., Гаврилова Т.А., Лецева И.А., Кубельский М.В., Тушканова О.Н.** Метод коллективной визуальной разработки онтологического графа знаний. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019. №1. С.27–38. DOI: 10.14357/20718594190103.
- [19] **Гаврилова Т.А., Страхович Э.В.** Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1(35). С.87–99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [20] **Сидорова Е.А., Ахмадеева И.Р., Загорулько Ю.А., Кононенко И.С., Серый А.С., Чагина П.М., Шестаков В.К.** Комплексный подход к анализу аргументативных отношений в текстах научной коммуникации. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4. С.562–579. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-562-579.
- [21] **Сидорова Е.А., Иванов А.И., Овчинникова К.А.** Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1. С.114–129. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.
- [22] **Зулкарнеев Р.Х., Юсупова Н.И., Сметанина О.Н., Гаянова М.М., Вульфин А.М.** Методы и модели извлечения знаний из медицинских документов. *Информатика и автоматизация*. 2022. Т.21, №6. С.1169–1210. DOI: 10.15622/ia.21.6.4.
- [23] **Муромский А.А., Тучкова Н.П.** Представление математических понятий в онтологии научных знаний. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №1(31). С.50–69. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-50-69.
- [24] **Атаева О.М., Серебряков В.А., Тучкова Н.П.** Граф знаний научного института в онтологии семантической библиотеки. *Научный сервис в сети Интернет: труды XXVI Всероссийской научной конференции*. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2024. С.3–15. DOI: 10.20948/abrau-2024-16.
- [25] **Халов А.П., Атаева О.М.** Автоматические и полуавтоматические методы построения графа знаний предметной области и расширения онтологии. *Электронные библиотеки*. 2025. Т.28, №6. С.1481–1519. DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-6-1481-1519.
- [26] **Халов А.П., Атаева О.М., Тучкова Н.П.** От синтаксиса к семантике: онтология формализации научного знания SciLib. *Системы высокой доступности*. 2026. №1. С.65–70. DOI: 10.18127/j20729472-202601-13.
- [27] **Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
- [28] **Gruber T.R.** A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993. Vol.5, No.2. P.199-220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
- [29] **Ширинбегзода С.И., Шишкин Д.А., Усманов Б.С., Боргест Н.М.** О применимости нейросетей в издательском деле. *Электронные библиотеки*. 2026. Т.29, №3. С.960–975. DOI: 10.26907/1562-5419-2026-29-3-960-975.
- [30] **Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J. et al.** The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*. 2016. Vol.3. Article 160018. DOI: 10.1038/sdata.2016.18.
- [31] **Creative Commons.** Guidance on CC Licensing in the Age of AI. Zenodo, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.22261032.
- [32] **Auer S., Kovtun V., Prinz M. et al.** Towards a Knowledge Graph for Science. *Proc. of the 8th Int. Conf. on Web Intelligence, Mining and Semantics*. New York: ACM, 2018. Article 1. DOI: 10.1145/3227609.3227689.
- [33] **Jaradeh M.Y., Oelen A., Farfar K.E. et al.** Open Research Knowledge Graph: Next Generation Infrastructure for Semantic Scholarly Knowledge. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Knowledge Capture*. New York: ACM, 2019. P.243-246. DOI: 10.1145/3360901.3364435.
- [34] **Ammar W., Groeneveld D., Bhagavatula C. et al.** Construction of the Literature Graph in Semantic Scholar. *Proceedings of NAACL-HLT*. New Orleans: Association for Computational Linguistics, 2018. P.84-91. DOI: 10.18653/v1/N18-3011.
- [35] **Peroni S., Shotton D.** FaBiO and CiTO: ontologies for describing bibliographic resources and citations. *Journal of Web Semantics*. 2012. Vol.17. P.33-43. DOI: 10.1016/j.websem.2012.08.001.
- [36] **Bizer C., Heath T., Berners-Lee T.** Linked Data - The Story So Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2009. Vol.5, No.3. P.1-22. DOI: 10.4018/jswis.2009081901.
- [37] **Uschold M., Gruninger M.** Ontologies: principles, methods and applications. *The Knowledge Engineering Review*. 1996. Vol.11, No.2. P.93-136. DOI: 10.1017/S0269888900007797.

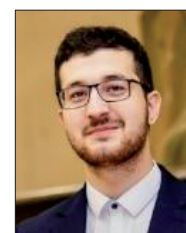
- [38] **Fernández-López M., Gómez-Pérez A., Juristo N.** METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. *Proc. of the AAAI-97 Spring Symposium on Ontological Engineering*. Menlo Park: AAAI Press, 1997. P.33-40.
 - [39] **Suárez-Figueroa M.C., Gómez-Pérez A., Fernández-López M.** The NeOn Methodology for Ontology Engineering. *Ontology Engineering in a Networked World*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P.9-34. DOI: 10.1007/978-3-642-24794-1_2.
 - [40] **Noy N.F., McGuinness D.L.** Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05. Stanford, 2001. 25 p.
 - [41] **Poveda-Villalón M., Gómez-Pérez A., Suárez-Figueroa M.C.** OOPS! (Ontology Pitfall Scanner!): An On-line Tool for Ontology Evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2014. Vol.10, No.2. P.7–34. DOI: 10.4018/IJSWIS.2014040102.
 - [42] **Glimm B., Horrocks I., Motik B., Stoilos G., Wang Z.** HermiT: An OWL 2 Reasoner. *Journal of Automated Reasoning*. 2014. Vol.53, No.3. P.245-269. DOI: 10.1007/s10817-014-9305-1.
 - [43] **Mori S., Suen C.Y., Yamamoto K.** Historical review of OCR research and development. *Proceedings of the IEEE*. 1992. Vol.80, No.7. P.1029–1058. DOI: 10.1109/5.156468.
 - [44] **Витрувий.** Десять книг об архитектуре / пер. Ф.А. Петровского. М.: Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1936. 331 с.
 - [45] **Priem J., Piwowar H., Orr R.** OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. arXiv:2205.01833, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2205.01833.
 - [46] **Кузнецов О.П., Суховеров В.С.** Онтологический подход к оценке тематики научного текста. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №1(19). С.55-66. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-1-55-66.
 - [47] **Manghi P.** Challenges in building scholarly knowledge graphs for research assessment in open science. *Quantitative Science Studies*. 2024. Vol.5, No.4. P.991-1021. DOI: 10.1162/qss_a_00322.
 - [48] **Alharbi R., Tamma V., Grasso F., Payne T.R.** Investigating Open Source LLMs to Retrofit Competency Questions in Ontology Engineering. *Proceedings of the AAAI Symposium Series*. 2024. Vol.4, No.1. P.188-198. DOI: 10.1609/aaais.v4i1.31793.
-

Сведения об авторах



Боргест Николай Михайлович, 1954 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва (1978), к.т.н. (1985). Доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Член Международной ассоциации по онтологиям и их приложениям, Международной ассоциации безопасного и этичного искусственного интеллекта (IASEAI), Ассоциации по развитию искусственного интеллекта (AAAI), Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ). В списке научных трудов более 200 работ в области автоматизации проектирования и ИИ. AuthorID (РИНЦ): 638887. Author ID (Scopus): 56566748500; ORCID: 0000-0003-2934-6198; Researcher ID (WoS): I-8689-2014. borgest@yandex.ru.

Ширинбегзода Сухайли Илхом, 2002 г. рождения. Окончил Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва в 2025 г. Студент магистратуры направления «Авиастроение» и инженер Самарского университета. Научные интересы: авиастроение, журналистика, технологии искусственного интеллекта, техническое зрение и образовательные платформы. ORCID: 0009-0003-7317-4722. shirinbegzodasi@yandex.ru.



Поступила в редакцию 1.08.2026, после рецензирования 10.09.2026. Принята к публикации 14.09.2026.



An approach to formalizing a knowledge base for a research field using ontology of designing as a case study

© 2026, N.M. Borgest ✉, S.I. Shirinbegzoda

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

The aim of this study is to propose an approach to formalizing a knowledge base for an emerging research field that makes it possible to determine the position of the field within the broader system of existing knowledge, identify its research horizons and knowledge gaps, provide a basis for developing tools for evaluating new research contributions, and incorporate verified results into the corresponding knowledge base. The knowledge base of a research field comprises only verifiable knowledge published in peer-reviewed sources. Scientific classification systems, including the classification of scientific specialties of the Higher Attestation Commission, are used to determine the position of the research field. The ontology of designing research field is considered as a case study. In addition to publications in the journal *Ontology of Designing*, scientific publications from related scientific journals, conference proceedings, and forums proceedings were used to form the core of the knowledge base. Machine-learning algorithms are used to create a local knowledge base for the research field. The local storage and controlled use of the knowledge base reduce the risk of generating responses that are not supported by the sources included in the knowledge base and make it possible to apply such a system to the initial screening and peer review of newly submitted papers while complying with confidentiality requirements and the principles of research ethics. A structure of the knowledge base is proposed that includes bibliographic information, publication content, concepts and relationships among them, as well as the evidential basis for assertions. Each assertion is linked to its primary source and a supporting fragment, thereby ensuring its verifiability. The constructed knowledge graph, based on articles published in the *Ontology of Designing* journal, is compared with OpenAlex data. A preliminary mapping of journal publications to the official profiles of scientific specialties established by the Higher Attestation Commission was also carried out. The possibility of representing and verifying knowledge is demonstrated using the works of Vitruvius, regarded as a precursor of ontology of designing. The proposed approach makes it possible to structure accumulated scientific knowledge and identify thematic overlaps and relationships among publications, research methods, and results. The resulting knowledge base can be used to analyse the development of the research field, compare new results with accumulated knowledge, and support editorial and peer-review activities.

Keywords: *ontology of designing, knowledge base, research field, competency questions, ontology validation, Vitruvius, scientific specialties.*

For citation: Borgest N.M., Shirinbegzoda S.I. An approach to formalizing a knowledge base for a research field using ontology of designing as a case study [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(3): 369-396. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-369-396.

Authors' contributions: N.M. Borgest – problem statement, development of the research concept, selection of sources; S.I. Shirinbegzoda – development of the ontological model and knowledge base, visualization of the results.

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

Use of artificial intelligence: Artificial intelligence tools were used in the preparation and formatting of selected figures and diagrams, as well as in the development of a pilot version of the Ontological Assistant. The authors are responsible for all statements contained in the work.

List of figures and tables

Figure 1 – High-level structure of the knowledge base of a research field

Figure 2 – Sequence of formation, population, and use of the knowledge base of a research field

Figure 3 – Example of the question-answering module of the Ontological Assistant based on the material of Vitruvius' treatise

Figure 4 – Graph of thematic relationships within an external set of publication based on OpenAlex data

- Figure 5 – Map of relationships among scientific specialties based on the preliminary mapping of journal publications
Figure 6 – Map of relationships among scientific specialties based on the preliminary mapping with the experimental inclusion of specialty 1.2.1
Figure 7 – Matrix of pairwise intersections among candidate publications by scientific specialties included in the journal's thematic scope
Figure 8 – Matrix of pairwise intersections among candidate publications by scientific specialties with the experimental inclusion of specialty 1.2.1
Table 1 – Groups and principal classes of the research field ontology
Table 2 – Core concepts of the design process and rules for creating instances
Table 3 – Principal information layers of the research field knowledge base
Table 4 – Minimum information required for a verifiable assertion
Table 5 – Rules for verifying the principal records of the research field knowledge base
Table 6 – Quality criteria for a structured knowledge base
Table 7 – Publication sources used to form the core of the ontology of designing research field knowledge base
Table 8 – Information systems used in forming a local knowledge base for the research field
Table 9 – External ontologies and vocabularies in the research field knowledge base
Table 10 – Methodological foundations of the proposed procedure for constructing the research field knowledge base
Table 11 – Principal types of verification of the research field knowledge base
Table 12 – Typical inconsistencies and rules for handling them
Table 13 – Competency (validation) questions and responses of the Ontological Assistant
Table 14 – Most widely represented OpenAlex research areas
Table 15 – Preliminary estimate of the number of candidate publications by currently recognized scientific specialties

References

- [1] **Constantin A, Peroni S, Pettifer S, Shotton D, Vitali F.** The Document Components Ontology (DoCO). *Semantic Web*. 2016; 7(2): 167-181. DOI: 10.3233/SW-150177.
- [2] **Hogan A, Blomqvist E, Cochez M. et al.** Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021; 54(4): Article 71. DOI: 10.1145/3447772.
- [3] **Borgest NM.** Scientific basis of ontology of designing [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2013; 1(7): 7-25.
- [4] **Borgest NM.** Key terms of ontology of designing: review, analysis, generalizations [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2013; 3(9): 9-31.
- [5] **Borgest NM.** Boundaries of ontology of designing [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2017; 7(1): 7-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.
- [6] **Borgest NM.** Ontologies of designing from Vitruvius to Vittikh [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2018; 8(4): 487-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.
- [7] **Borgest NM.** Formation and development of *Ontology of Designing* as a scientific discipline: a brief history of personal experience [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(4): 415-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-415-448.
- [8] **Borgest NM.** Ontology of designing as a scientific field: formation, development, examples [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(2): 136-157. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-136-157.
- [9] **Borgest NM.** Development problems of ontology of science: Classification analysis [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(3): 278-298. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-278-298.
- [10] **Borgest NM.** The concept of a set in the theory and practice of designing [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2023; 13(3): 306-332. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-306-332.
- [11] **Borgest NM.** System and ontological analyses: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(1): 9-28. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [12] **Borgest NM, Korovin MD.** Ontologies: current state, brief review [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2013; 2(8): 49-55.
- [13] **Borgest NM, Gimatdinova SR, Shustova DV.** Hierarchical and associative relations among terms in a thesaurus using a designer's dictionary as an example [In Russian]. *Vestnik of Samara State Aerospace University*. 2012; 2(33): 228-236.
- [14] **Burakova EE, Borgest NM, Korovin MD.** Ontology description languages for technical subject domains [In Russian]. *Vestnik of Samara State Aerospace University*. 2014; 3(45): 144-158.
- [15] **Zagorulko YuA, Sidorova EA, Zagorulko GB, Akhmadeeva IR, Seryi AS.** Automation of the development of ontology of scientific subject domains based on ontology design patterns [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(4): 500-520. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.

- [16] **Dorodnykh NO, Nikolaichuk OA, Yurin AYu.** Using ontological content patterns in knowledge bases engineering for maintenance and repair of aviation equipment [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(2): 158-171. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-158-171.
- [17] **Gribova VV, Parshkova SV, Fedorishchev LA.** Ontologies for development and generation of adaptive user interfaces for knowledge-base editors [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(2): 200-217. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-200-217.
- [18] **Kudryavtsev DV, Begler AM, Gavrilova TA, Leshcheva IA, Kubelsky MV, Tushkanova ON.** A method for collaborative visual development of an ontological knowledge graph [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2019; 1: 27-38. DOI: 10.14357/20718594190103.
- [19] **Gavrilova TA, Strakhovich EV.** Visual-analytical thinking and mind maps for ontology engineering [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(1): 87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [20] **Sidorova EA, Akhmadeeva IR, Zagorulko YuA, Kononenko IS, Seryi AS, Chagina PM, Shestakov VK.** An integrated approach to the analysis of argumentative relations in scientific communication texts [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2023; 13(4): 562-579. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-562-579.
- [21] **Sidorova EA, Ivanov AI, Ovchinnikova KA.** Information extraction from texts based on ontology and large language models [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(1): 114-129. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.
- [22] **Zulkarneev RKh, Yusupova NI, Smetanina ON, Gayanova MM, Vulfin AM.** Methods and models of extraction of knowledge from medical documents [In Russian]. *Informatics and Automation*. 2022; 21(6): 1169-1210. DOI: 10.15622/ia.21.6.4.
- [23] **Muromsky AA, Tuchkova NP.** Representation of mathematical concepts in an ontology of scientific knowledge [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2019; 9(1): 50-69. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-50-69.
- [24] **Ataeva OM, Serebryakov VA, Tuchkova NP.** Knowledge graph of a scientific institute in the semantic library ontology [In Russian]. *Scientific Services & Internet: Proceedings of the XXVI All-Russian Scientific Conference*. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics, 2024. P.3-15. DOI: 10.20948/abrau-2024-16.
- [25] **Khalov AP, Ataeva OM.** Automatic and semi-automatic methods for domain knowledge graph construction and ontology expansion [In Russian]. *Electronic Libraries*. 2025; 28(6): 1481-1519. DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-6-1481-1519.
- [26] **Khalov AP, Ataeva OM, Tuchkova NP.** From syntax to semantics: SciLib ontology for formalization of scientific knowledge [In Russian]. *High Availability Systems*. 2026; 1: 65-70. DOI: 10.18127/j20729472-202601-13.
- [27] **Gavrilova TA, Khoroshevsky VF.** Knowledge Bases of Intelligent Systems: textbook [In Russian]. St. Petersburg: Piter, 2000. 384 p. ISBN 5-272-00071-4.
- [28] **Gruber TR.** A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993; 5(2): 199-220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
- [29] **Shirinbegzoda SI, Shishkin DA, Usmanov BS, Borgest NM.** On the Applicability of Neural Networks in the Publishing Industry. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2026; 60: S376–S380. DOI: 10.3103/S0005105526700676.
- [30] **Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJ. et al.** The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*. 2016; 3: Article 160018. DOI: 10.1038/sdata.2016.18.
- [31] **Creative Commons.** Guidance on CC Licensing in the Age of AI. *Zenodo*, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.22261032.
- [32] **Auer S, Kovtun V, Prinz M. et al.** Towards a Knowledge Graph for Science. *Proceedings of the 8th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics*. New York: ACM, 2018. Article 1. DOI: 10.1145/3227609.3227689.
- [33] **Jaradeh M.Y., Oelen A., Farfar K.E. et al.** Open Research Knowledge Graph: Next Generation Infrastructure for Semantic Scholarly Knowledge. *Proceedings of the 10th International Conference on Knowledge Capture*. New York: ACM, 2019. P. 243-246. DOI: 10.1145/3360901.3364435.
- [34] **Ammar W, Groeneveld D, Bhagavatula C. et al.** Construction of the Literature Graph in Semantic Scholar. *Proceedings of NAACL-HLT*. New Orleans: Association for Computational Linguistics, 2018. P.84-91. DOI: 10.18653/v1/N18-3011.
- [35] **Peroni S, Shotton D.** FaBiO and CiTO: ontologies for describing bibliographic resources and citations. *Journal of Web Semantics*. 2012; 17: 33-43. DOI: 10.1016/j.websem.2012.08.001.
- [36] **Bizer C, Heath T, Berners-Lee T.** Linked Data - The Story So Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2009; 5(3): 1-22. DOI: 10.4018/jswis.2009081901.
- [37] **Uschold M, Gruninger M.** Ontologies: principles, methods and applications. *The Knowledge Engineering Review*. 1996; 11(2): 93-136. DOI: 10.1017/S0269888900007797.
- [38] **Fernández-López M, Gómez-Pérez A, Juristo N.** METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. *Proceedings of the AAAI-97 Spring Symposium on Ontological Engineering*. Menlo Park: AAAI Press, 1997. P.33-40.

- [39] **Suárez-Figueroa MC, Gómez-Pérez A, Fernández-López M.** The NeOn Methodology for Ontology Engineering. *Ontology Engineering in a Networked World*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P.9-34. DOI: 10.1007/978-3-642-24794-1_2.
 - [40] **Noy NF, McGuinness DL.** Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. *Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05*. Stanford, 2001. 25 p.
 - [41] **Poveda-Villalón M, Gómez-Pérez A, Suárez-Figueroa MC.** OOPS! (Ontology Pitfall Scanner!): An On-line Tool for Ontology Evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2014; 10(2): 7-34. DOI: 10.4018/IJSWIS.2014040102.
 - [42] **Glimm B, Horrocks I, Motik B, Stoilos G, Wang Z.** HermiT: An OWL 2 Reasoner. *Journal of Automated Reasoning*. 2014; 53(3): 245-269. DOI: 10.1007/s10817-014-9305-1.
 - [43] **Mori S, Suen CY, Yamamoto K.** Historical review of OCR research and development. *Proceedings of the IEEE*. 1992; 80(7): 1029-1058. DOI: 10.1109/5.156468.
 - [44] **Vitruvius.** *Ten Books on Architecture* [In Russian]. Translated by F.A. Petrovsky. Moscow: Publishing House of the All-Union Academy of Architecture, 1936. 331 p.
 - [45] **Priem J, Piwowar H, Orr R.** OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. *arXiv:2205.01833*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2205.01833.
 - [46] **Kuznetsov OP, Sukhoverov VS.** An ontological approach to determining the subject matter of a scientific text [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2016; 6(1): 55-66. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-1-55-66.
 - [47] **Manghi P.** Challenges in building scholarly knowledge graphs for research assessment in open science. *Quantitative Science Studies*. 2024; 5(4): 991-1021. DOI: 10.1162/qss_a_00322.
 - [48] **Alharbi R, Tamma V, Grasso F, Payne TR.** Investigating Open Source LLMs to Retrofit Competency Questions in Ontology Engineering. *Proceedings of the AAAI Symposium Series*. 2024; 4(1): 188-198. DOI: 10.1609/aaais.v4i1.31793.
-

About the authors

Nikolai Mikhailovich Borgest (b. 1954). Graduated from the Kuibyshev Aviation Institute named after Academician S.P. Korolev in 1978, Candidate of Technical Sciences (1985). Associate Professor at the Department of Aircraft Design and Construction, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. Member of the International Association for Ontology and its Applications (IAOA), the International Association for Safe and Ethical Artificial Intelligence (IASEAI), the Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI), and the Russian Association for Artificial Intelligence (RAAI). His list of scientific publications includes more than 200 works in the fields of design automation and artificial intelligence. AuthorID (RCI): 638887. Author ID (Scopus): 56566748500; ORCID: 0000-0003-2934-6198; Researcher ID (WoS): I-8689-2014. borgest@yandex.ru ✉.

Sukhaylii Ilkhom Shirinbegzoda (b. 2002). Graduated from Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev in 2025. Master's degree student in Aircraft Engineering and engineer at Samara University. Research interests include aircraft engineering, journalism, artificial intelligence technologies, computer vision, and educational platforms. ORCID: 0009-0003-7317-4722. shirinbegzodasi@yandex.ru.

Received August 1, 2026. Revised September 10, 2026. Accepted September 14, 2026.



Operational limits of ontological innovation in large language models: evidence from controlled sensory-modality generation

© 2026, J.O. Matarmaa

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,
Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Contemporary large language models generate text that can appear conceptually novel, raising the question of whether outputs reflect genuine ontological innovation—the introduction of concepts that cannot be expressed as recombinations or transformations of training-derived primitives—or sophisticated recombination within a fixed representational manifold. We address this question through a controlled empirical study using an eight-modality multi-modal sensory ontology as the experimental universe. Seven state-of-the-art language models ($N = 168$ proposals, 24 runs each) were prompted to propose a ninth sensory modality genuinely beyond the defined eight. Outputs were evaluated through four convergent methods: literature traceability with calibrated threshold ($\tau = 0.40$), structural decomposition, embedding-space convex-hull analysis, and continuous novelty scoring. Results show a strict novelty rate of $\hat{p}_{\text{novel}} = 0.000$ (95% CI: [0.000, 0.000]), a traceability rate of $\hat{p}_{\text{traceable}} = 0.982$, and 100% convex-hull membership under Sentence-BERT embeddings reduced to three principal components. Structural decomposition revealed three failure modes: *range extension* (20.2%), *hybrid combination* (44.6%), and *functional recombination* (17.9%). Cross-model effects were moderate ($\eta^2 = 0.326$), but all models stayed within the same low-novelty regime, supporting a constrained-manifold rather than a model-deficit explanation. We interpret these findings through the *No New Basis Theorem*: gradient-descent learning over fixed vocabularies cannot expand representational dimensionality beyond training data. These results support the view that current neural architectures are bounded within training-derived conceptual closures, with implications for operationalizing and evaluating ontological creativity.

Keywords: *ontological innovation, computational creativity, large language models, sentence embedding, traceability analysis, representational constraints.*

For citation: Matarmaa JO. Operational limits of ontological innovation in large language models: evidence from controlled sensory-modality generation. *Ontology of designing*. 2026; 16(3): 397-414. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-397-414.

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

Introduction

The capacity to generate fundamentally new concepts—not merely recombinations of existing ones – has long been considered a hallmark of human intelligence and a defining test of genuine creativity. As large language models (LLMs) achieve impressive performance on a broadening range of generative tasks, a pressing question has emerged: do these systems exhibit ontological innovation, generating ideas that lie outside the conceptual closure of their training environment, or do they operate as extremely capable recombiners constrained to a fixed representational manifold?

This question has both philosophical and practical stakes. Philosophically, it bears on the computational theory of mind, the nature of creativity, and whether algorithmic systems can in principle exceed the representational resources with which they were trained. Practically, it determines what roles LLMs can occupy in scientific discovery, design, and other domains where genuinely new concepts – not just novel arrangements of existing ones – are required [1].

The challenge is that outputs from modern LLMs frequently appear novel. Proposals that introduce unfamiliar terminology, combine concepts across disciplinary boundaries, or describe mecha-

nisms not explicitly present in any single training document can pass casual inspection as genuinely creative [2, 3]. Evaluating whether such outputs constitute true conceptual innovation requires a controlled experimental setup and rigorous multi-method analysis.

1 Background and related work

The dominant framework for analyzing machine creativity is Margaret Boden's tripartite taxonomy [4], which distinguishes outputs based on their relationship to the conceptual space from which they arise. Combinational creativity produces novel combinations of familiar ideas – poetic metaphors, analogies, conceptual blends. Exploratory creativity systematically searches well-defined conceptual spaces to find previously unvisited regions. Transformational creativity, the most radical category, modifies the conceptual space itself by relaxing or changing its defining constraints.

Research on AI systems has demonstrated substantial competence at combinational and exploratory creativity [5, 6]. Systems such as Copycat, JAPE, and AARON can generate outputs that human evaluators judge as genuinely surprising and apt within their respective domains. Robust transformational creativity, however, remains rare: most documented examples involve superficial parameter modifications rather than fundamental reconceptualization [4].

Wiggins [2] introduced a formal framework for evaluating creativity claims and identified a "framing" problem: systems appear to transform their conceptual space while actually operating within an implicitly broader space defined by human designers. We argue that a fourth category, which we term ontological creativity, is needed to capture the most radical form of conceptual innovation. Transformational creativity modifies operators Ω or relations E within a conceptual space $C = (V, E, \Phi, \Omega)$; ontological creativity introduces new primitive concepts $v' \in V'$ where $V' \not\subset V$ and critically V' cannot be expressed as $\Omega(V)$ for any existing operators. This distinction maps onto Ryle's philosophical notion of category mistakes [7]: ontological creativity involves recognizing that existing categories are insufficient and proposing new ones that cannot be defined by recombining or transforming current primitives. Einstein's reconceptualization of absolute simultaneity as a category error, leading to a revised ontology of relativistic spacetime, exemplifies this form of creativity. Generating a genuinely new sensory modality would be analogous: not an extension or hybridization of existing ones, but a proposal for a sensing type with a physical basis and information content that cannot be expressed as a composition of the existing eight.

The computational theory of mind [8, 9] and its critics [10–12] have long debated whether algorithmic systems face principled limits on what they can represent and understand. Recent work in mechanistic interpretability provides empirical traction on this question by revealing that generation in transformer based LLMs proceeds through retrieval and interpolation among training examples rather than through any inference mechanism that could introduce entirely new primitives [13, 14].

The transformer architecture [15] encodes all knowledge implicitly in weights learned from distributional co-occurrence, which grounds the output space in the training vocabulary of concepts. Gärdenfors's conceptual-spaces formalism [16] provides complementary geometric intuition: a learned concept lives as a region in a quality space and generating a new concept outside all existing regions requires an external basis vector not present in the training data.

Claim (No New Basis Theorem under fixed-basis assumptions). For a neural architecture A operating over representation space R^d with generative process $G: R^d \rightarrow R^d$ learned from training data $D = x_1, \dots, x_N$, all generated outputs $x' = G(z)$ remain within M' , that is a continuous deformation of $M = \text{span}(x_1, \dots, x_N)$ satisfying $\dim(M') \leq \dim(M)$.

Assumptions. (i) fixed representational basis and vocabulary during inference, (ii) gradient-based continuous learning dynamics, and (iii) no external mechanism that appends new primitive basis vectors at inference time.

Argument (informal proof sketch). First, under continuous gradient updates, learned mappings deform regions of the training-induced manifold rather than creating independent coordinate axes. Second, generative decoding composes these learned maps and therefore remains constrained by the same basis. Third, introducing ontological primitives outside the learned span would require explicit basis augmentation (new symbols, new sensors, or external memory with independent representational coordinates), which is excluded by assumptions (i)–(iii).

Consequence. Ontological novelty, defined as basis expansion rather than recombination, cannot be produced by the internal generation mechanism alone under these assumptions.

This theorem explains why even highly capable models that produce surprising combinations remain formally constrained to the conceptual universe their training data defines. Our empirical study provides a controlled test of whether this theoretical constraint manifests behaviorally.

A persistent methodological challenge in computational creativity research is evaluation [2, 3]. Human expert judgments are subjective, difficult to reproduce, and sensitive to framing. Recent studies show that LLMs can achieve human-level performance on divergent-thinking tasks such as the Alternative Uses Test [17], but scoring quality depends strongly on the evaluation metric [18]. Recent 2024–2026 work further confirms metric sensitivity and proposes newer creativity-evaluation protocols for LLMs, including human-comparative, temperature-sensitivity, and model-guided creativity-judging paradigms [19–25]. Our multi-method approach – traceability search, structural decomposition, embedding-space geometry, and continuous scoring—provides convergent automated evidence that can be replicated and extended. Calibrated traceability thresholds replace arbitrary cut-offs with empirically justified operating points.

2 Materials and methods

The experimental universe consists of eight sensory modalities, each defined by a physical basis, an information channel, and a functional role in an agent's interaction with its environment (Table 1). Modalities span biological human senses and extended machine-sensing capabilities.

This ontology is a category space we define for the purposes of controlled measurement; it is a sufficient, well-specified space against which to test whether proposals exceed it, but it is not, and is not claimed to be, a complete model of the conceptual space that any given model acquired during pretraining. Consequently, the experiment measures whether models can propose a modality outside this explicit eight-item list; it does not, by itself, establish whether models can exceed the conceptual resources of their training data more broadly.

Table 1 – Eight-modality sensory ontology used as the experimental universe. Each modality is defined by its physical basis, representational dimensionality, and functional role

Modality	Physical basis	Functional role	Dim.*
<i>Visual</i>	EM spectrum 300–1000 nm (5 nm steps)	Scene and object recognition	140
<i>Auditory</i>	Pressure waves 1 Hz–100 kHz (128-bin FFT)	Sound source localization	128
<i>Tactile</i>	Mechanical vibrations 5–800 Hz	Surface texture and pressure	32
<i>Olfactory</i>	Chemical categories (10 classes)	Substance identification	10
<i>Gustatory</i>	Taste dimensions (sweet/sour/salty/bitter/umami)	Ingestion guidance	5
<i>Proprioceptive</i>	20 joint angles + 10 muscle tensions	Body-state estimation	30
<i>Vestibular</i>	3-axis acceleration + 3-axis angular velocity	Balance and motion	6
<i>Interoceptive</i>	HR, respiration, skin conductance, temperature, hunger, thirst, fatigue, pain	Homeostatic regulation	8
<i>Total feature dimensionality per time-step</i>			359

*Dimensionality values (Dim.) represent the number of independently controllable encoding parameters for each modality stream (e.g., spectral bins, frequency bins, category classes, kinematic channels, and homeostatic channels), not biological receptor counts.

A synthetic multimodal sensory-episode dataset (5,000 training, 1,000 validation, and 1,000 test 60-second episodes at 1 Hz across seven everyday scenarios) exists as shared infrastructure for this research program, but it is not used in the evaluation reported here: this study relies only on the ontology's textual/tabular definitions (Table 1), the models' generated proposals, and the literature traceability corpus. We note this explicitly to avoid the impression that the episode dataset informs the results below.

A task specification (prompt contract) is a structured set of constraints that every prompt instantiation must satisfy, ensuring comparability across models and runs.

Each model was asked to propose a ninth sensory modality that is genuinely new and not reducible to combinations, extensions, or transformations of the existing eight. Proposals were required to specify: (1) the physical phenomenon to be sensed, (2) the information channel and encoding, and (3) the functional difference from existing modalities. The prompt named the eight modalities and specified that each is characterized by a physical basis, information content, and functional role, but it did not provide Table 1 in structured tabular format or include the specific per-modality values (e.g., exact spectral ranges, encoding dimensionality, or channel counts) shown there. Models were instead required to structure their own proposal along three analogous dimensions—physical basis, information channel/encoding, and functional difference from existing modalities—plus a name and justification, returned in a fixed JSON schema.

Prompts specified the required response structure without providing worked examples of qualifying answers. The instructions did, however, include one explicit steering cue: models were told to 'think beyond obvious extensions like electromagnetic sensing or radiation detection,' naming two specific response categories as disfavoured. This cue was intended to discourage the most trivial extensions of the visual modality but is not neutral: it may have suppressed a class of plausible proposals and should be treated as a limitation of the prompt design rather than as evidence of an unbiased elicitation procedure.

Seven state-of-the-art models were evaluated: GPT-5.2 [26], Claude-3.7-Sonnet, Gemini-3.1-Pro-Preview [27], LLaMA-3.3-70B-Instruct [28], DeepSeek-v3.2 [29, 30], Mistral-Large [31], and Perplexity Sonar Pro, accessed via the OpenRouter, Perplexity, and Mistral APIs. All runs used temperature $T = 0.7$; the Perplexity API does not support temperature adjustment and was operated at provider defaults. System prompts were crafted to neutrally present the task without introducing bias toward particular answer types.

Literature traceability: Each proposal was matched against a curated scholarly corpus of 125 documents covering sensory biology, robotics sensing, and computational neuroscience, using cosine similarity over Sentence-BERT embeddings [32]. A proposal is classified as traceable if its best-match similarity exceeds threshold τ .

The corpus was assembled from OpenAlex [33] and Crossref API retrieval using domain seed queries, then deduplicated and length-filtered before embedding. OpenAlex and Crossref were used as discovery/indexing layers for scholarly records, while traceability labels were assigned by semantic similarity on cleaned text rather than by keyword overlap alone.

The corpus scope is deliberately academic-mainstream. In this study, traceability is defined with respect to scientific literature in those three domains rather than science-fiction, patent, or broader philosophical corpora. Because the corpus is API-mediated, coverage is additionally constrained by OpenAlex/Crossref indexing and metadata completeness (including abstract/title availability), so absence of a high-similarity match should be interpreted as non-retrieval within this indexed corpus rather than proof of global conceptual absence.

Threshold calibration followed an explicit interpretive-design criterion: the operating point should avoid degenerate label collapse (e.g., near-universal traceability or near-universal non-traceability), because such regimes are weakly informative for comparative inference. Three candi-

date operating points ($\tau \in \{0.30, 0.40, 0.50\}$) were therefore evaluated on the full response–corpus similarity distribution to quantify direction and rate of change in traceability as strictness increases. At $\tau = 0.30$, the traceability rate was 0.982, indicating a near-saturated operating point with little discrimination. At $\tau = 0.50$, only 64.9% of proposals were traceable, indicating substantial pruning. The intermediate value $\tau = 0.40$ was used for the main text analysis as a calibrated reference point for inferential inspection. It is interpreted as an operational indicator of current position in the similarity distribution, not as an absolute boundary that unconditionally separates traceable from non-traceable outputs. To address threshold-dependence concerns, Table 2 reports key outcomes at all three thresholds and shows that strict novelty remains zero.

Structural decomposition: Each proposal was analyzed for whether its key claims can be expressed using only the eight training primitives through: (i) range extension (preserving the sensing type while shifting its physical parameter range), (ii) hybrid combination (combining features from two or more existing modalities), or (iii) functional recombination (repurposing an existing sensing mechanism for a different functional role). Proposals not fitting any category were labelled structurally novel.

Table 2 – Sensitivity of core outcomes to traceability threshold τ

τ	Traceability rate	Strict novelty rate	Mean continuous novelty
0.30	0.982	0.000	0.059
0.40	0.982	0.000	0.059
0.50	0.649	0.000	low/stable

Embedding-space convex-hull analysis: Sentence-BERT embeddings were computed for each proposal and for the eight training-modality descriptions. Principal component analysis reduced both sets to three components; convex-hull membership was computed in 3D using half-space equations with numerical tolerance. A proposal classified as outside the hull would occupy a semantically isolated region suggesting basis expansion beyond the training ontology.

Continuous novelty scoring: A continuous novelty score $s \in [0,1]$ was computed for each proposal by combining structural novelty sub-scores: (i) absence from structural decomposition categories, (ii) inverse of maximum cosine similarity to training modalities, and (iii) geometric distance from the convex-hull boundary. Proposals with $s \geq 0.5$ were classified as strictly novel under this operational threshold.

3 Results

Before interpreting the null novelty result, semantic coherence was assessed informally across all 168 proposals. Every proposal described a physically plausible sensing mechanism with an identifiable input channel and functional role; none were semantically degenerate or nonsensical. This matters because incoherent out-of-distribution text would not count as ontological innovation

The aggregate strict novelty rate was $\hat{p}_{novel} = 0.000$ (95%CI: [0.000,0.000]; $N = 168$). No proposal satisfied the strict novelty criterion $s \geq 0.5$. The mean continuous novelty score was $\hat{\mu}_{continuous} = 0.059$ ($SD = 0.031$), indicating weak novelty signal without threshold-level novelty events across any model or run. Under the calibrated traceability threshold $\tau = 0.40$, the traceability rate was $\hat{p}_{traceable} = 0.982$ (95% CI: [0.962, 1.000]); 165 of 168 proposals had a best-match cosine similarity above threshold, with a mean best-match score of 0.528 across all proposals. Of the 165 traceable proposals, all 165 were matched to sources from the strong-evidence tier of the corpus. Consistent with Table 2, this threshold should be read as an operational reference value: the directional pattern remains stable at lower strictness and transitions toward stronger pruning at higher strictness. Figure 1 presents the dominant classification split: traceable/non-novel outputs are overwhelmingly prevalent across all models.

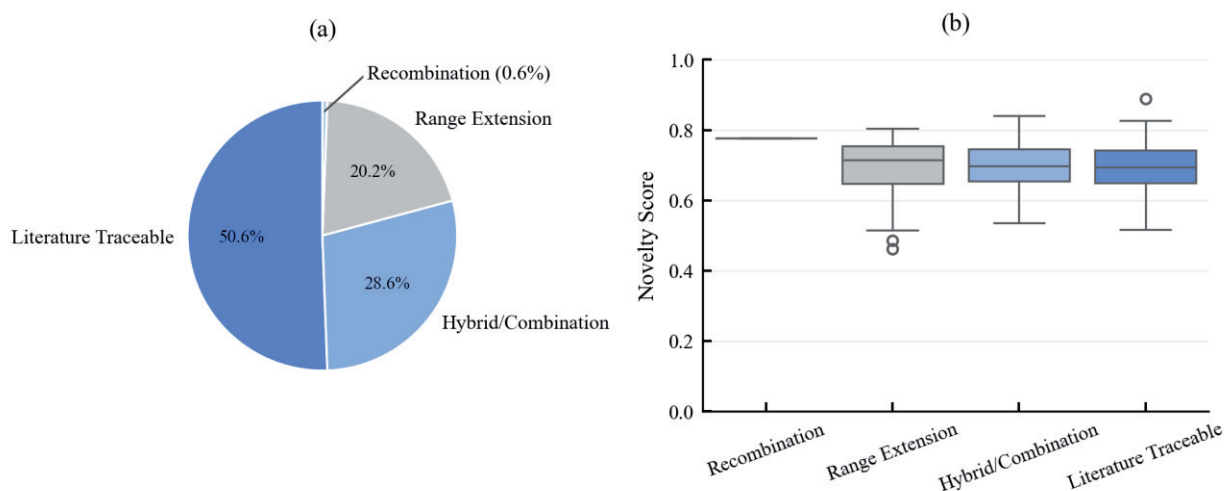


Figure 1 – Classification summary (N= 168 proposals, seven models). (a) Distribution of classification outcomes; the distribution is dominated by traceable categories consistent with low operational ontological novelty under calibrated thresholds. (b) Novelty score distributions by classification category shown as box plots

3.1 Structural decomposition and embedding-space geometry

Of the 168 proposals, 88 (52.4%) were structurally decomposable into training-ontology primitives. The detailed outcome groups are summarized in Table 3. Three failure modes account for the decomposable proposals:

- *Range extension* (34 cases, 20.2%): proposals that extend the physical parameter range of an existing modality (e.g., far-infrared thermal sensing as an extension of visual EM-band coverage, or infrasound-extended auditory detection).
- *Hybrid combination* (75 cases, 44.6%): proposals combining features from two or more existing modalities (e.g., combined tactile-proprioceptive "haptic flow" sensing, or olfactory-gustatory integration).
- *Functional recombination* (30 cases, 17.9%): proposals repurposing an existing sensing mechanism for a different functional role (e.g., using interoceptive signals for external environment monitoring rather than homeostatic regulation).

Table 3 – Structural decomposition outcome groups

Group	Count	Interpretation
Fully structurally decomposable	88 (52.4%)	Mapped to named patterns (possibly overlapping)
Structurally heterogeneous, semantically proximate	80 (47.6%)	Not cleanly in one pattern, but traceable

The three category counts overlap: 51 proposals exhibited more than one pattern simultaneously, so the non-overlapping count of fully decomposable proposals is 88. The remaining 80 proposals (47.6%) were analyzed but did not fit cleanly into one named structural pattern; these are better interpreted as a structurally heterogeneous yet semantically proximate group.

Figure 2 shows novelty-frontier band assignments by model, confirming that the low-novelty/high-traceability pattern holds architecture-wide rather than being driven by a single under-performing model. Figure 3 further illustrates that most proposals fail multiple frontier criteria simultaneously, supporting a coupled-constraint interpretation.

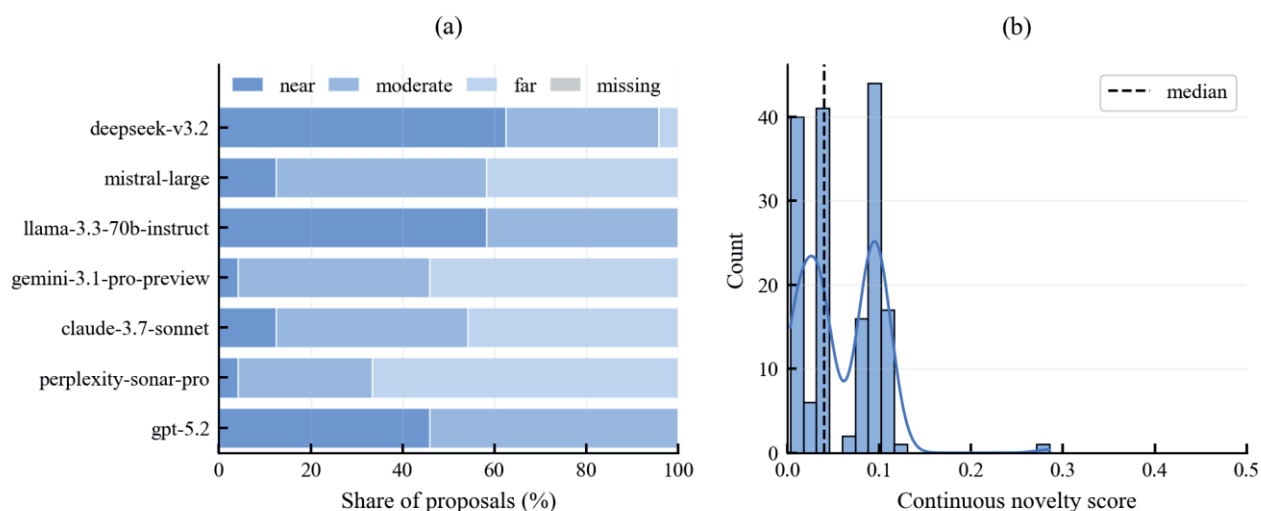


Figure 2 – Novelty-frontier band assignments and score distribution. (a) Band assignment by model: responses are concentrated in low-novelty and frontier-proximal bands across all seven architectures, indicating architecture-independent constraint patterns rather than isolated model failures. (b) Overall continuous novelty score distribution with KDE overlay; dashed line marks the median

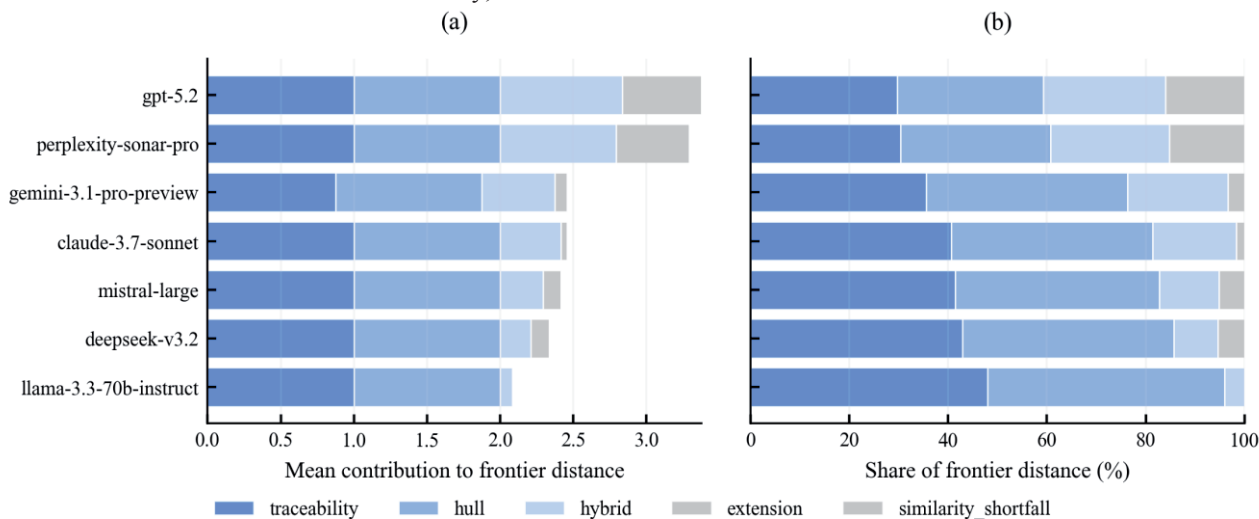


Figure 3 – Novelty-frontier criterion decomposition by model. (a) Absolute mean contribution of each criterion to overall frontier distance. (b) Relative share (%) of frontier distance per criterion. Both panels confirm that most responses violate multiple criteria simultaneously, supporting a coupled-constraint interpretation of low ontological novelty

All 168 proposals (100%) were classified as inside the 3D convex hull of training-modality embeddings. Proposal markers cluster in the interior region of the training manifold; no proposal occupies a semantically isolated region that would suggest basis expansion beyond the training ontology. The mean cosine similarity between each proposal and its closest training modality was $\bar{d} = 0.305$ ($SD = 0.078$), indicating substantial semantic overlap with training concepts.

Figure 4 presents the embedding-space analysis with proposals visualised in the first two principal components and the 3D hull boundary shown as a visual aid.

Figure 5 provides the aggregated cosine-similarity heatmap of proposed modalities against the eight training modalities, reaching the same conclusion from a complementary metric: every proposal records elevated similarity to one or more training modalities, with no proposal showing uniformly low similarity across all eight.

3.2 Cross-model comparison

The model effect on the primary novelty metric was moderate: one-way ANOVA yielded $F(6,161) = 12.98$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.326$, indicating non-trivial between-model variance in raw scores. Nonetheless, all seven models remained within the same low- novelty/high-traceability regime; no model produced proposals classified as strictly novel, and no model achieved a mean continuous novelty score exceeding $\mu = 0.12$.

Post-hoc Tukey HSD comparisons are summarized in Table 4. The full pairwise pattern is selective rather than global: GPT-5.2 scores significantly lower than Claude-3.7-Sonnet, DeepSeek-v3.2, Gemini-3.1-Pro-Preview, LLaMA-3.3-70B-Instruct, and Mistral-Large; Perplexity Sonar Pro scores significantly lower than Claude-3.7-Sonnet, Gemini-3.1-Pro-Preview, LLaMA-3.3-70B-Instruct, and Mistral-Large. The remaining pairwise differences are not significant after multiplicity correction.

Figure 6 shows that between-model variation takes the form of different *preferences among known canonical families* rather than emergence of structurally new families: some models more frequently produced range-extension proposals while others favored hybrid combinations, but neither pattern represents departure from the training-derived manifold.

Figure 7 presents continuous novelty score distributions per model as a ridgeline plot. Distributional overlap is high across all seven models, and peaks consistently remain in low-to-moderate ranges, indicating that model-specific differences in architecture and scale do not qualitatively alter the constraint pattern.

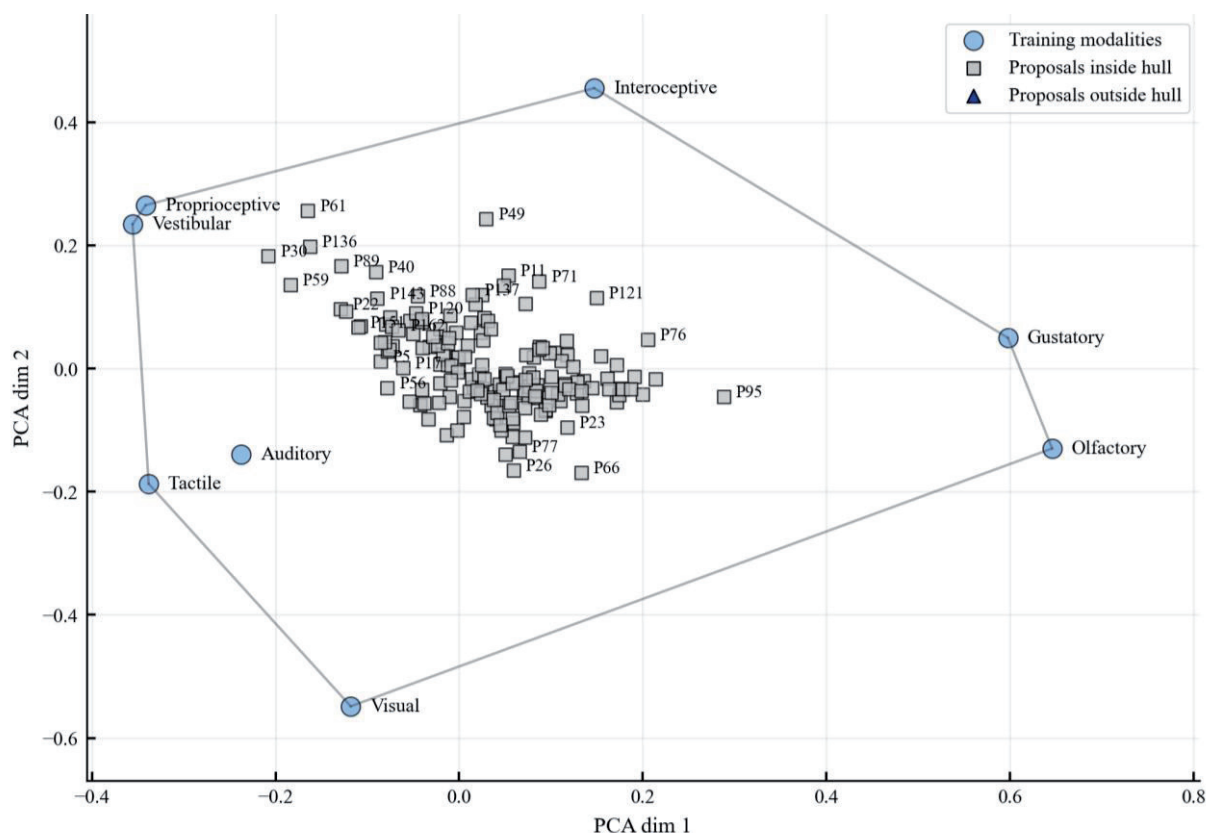


Figure 4 – Embedding-space analysis for proposals and training modalities. Convex-hull membership is computed in PCA-reduced 3D space; the 2D boundary shown is illustrative only. All 168 proposal markers cluster near the interior of the training manifold—none escape to a semantically isolated region

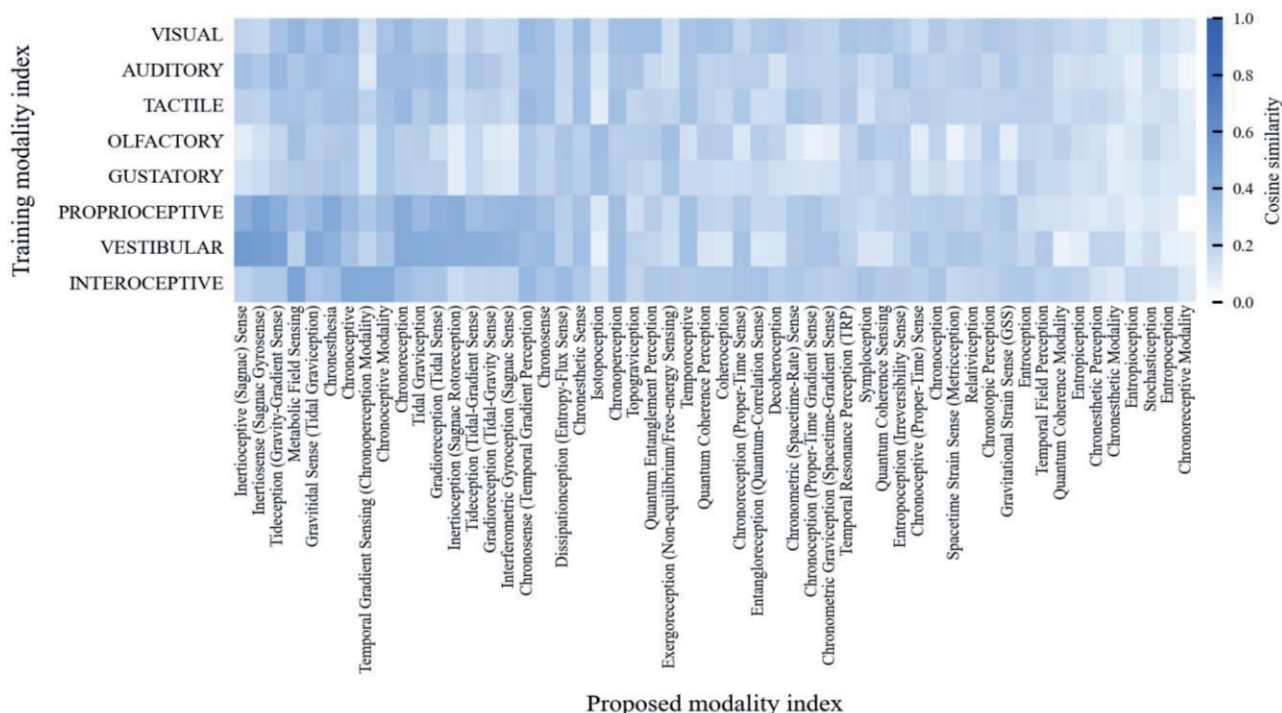


Figure 5 – Cosine similarity of proposed modalities to the eight training modalities. Columns: aggregated unique proposed modality index (1–54); rows: training modality index (1–8); The concentration of cosine-similarity values is consistent with the traceability result: no aggregated proposal appears uniformly dissimilar to all eight training modalities

Table 4 – Tukey HSD post-hoc comparisons for continuous novelty score (significant contrasts shown explicitly; non-significant contrasts summarized). The “Significant” column indicates whether the Tukey HSD multiplicity-adjusted p-value falls below the prespecified threshold of $\alpha = 0.05$

Model	Model of comparison	Adjusted p-value	Significant
Claude-3.7-Sonnet	Perplexity Sonar Pro	0.0076	Yes
Mistral-Large	Perplexity Sonar Pro	0.0043	Yes
Gemini-3.1-Pro-Preview	Perplexity Sonar Pro	0.0005	Yes
LLaMA-3.3-70B-Instruct	Perplexity Sonar Pro	0.0001	Yes
Claude-3.7-Sonnet	GPT-5.2	0.0000	Yes
DeepSeek-v3.2	GPT-5.2	0.0000	Yes
Gemini-3.1-Pro-Preview	GPT-5.2	0.0000	Yes
GPT-5.2	LLaMA-3.3-70B-Instruct	0.0000	Yes
GPT-5.2	Mistral-Large	0.0000	Yes
All remaining pairwise contrasts (n = 12)		≥ 0.05	No

3.3 Summary of results

The four evaluation methods converge on a coherent picture: across 168 proposals from seven state-of-the-art LLMs, zero proposals satisfy the strict novelty criterion, 98.2% are traceable to the training corpus under the calibrated threshold, and every proposal lies inside the training-derived convex hull in embedding space. The structural decomposition reveals that the proposals explore recognizable combinatorial and extension patterns rather than introducing new ontological primitives. Cross-model effects influence degree of constraint rather than its qualitative nature.

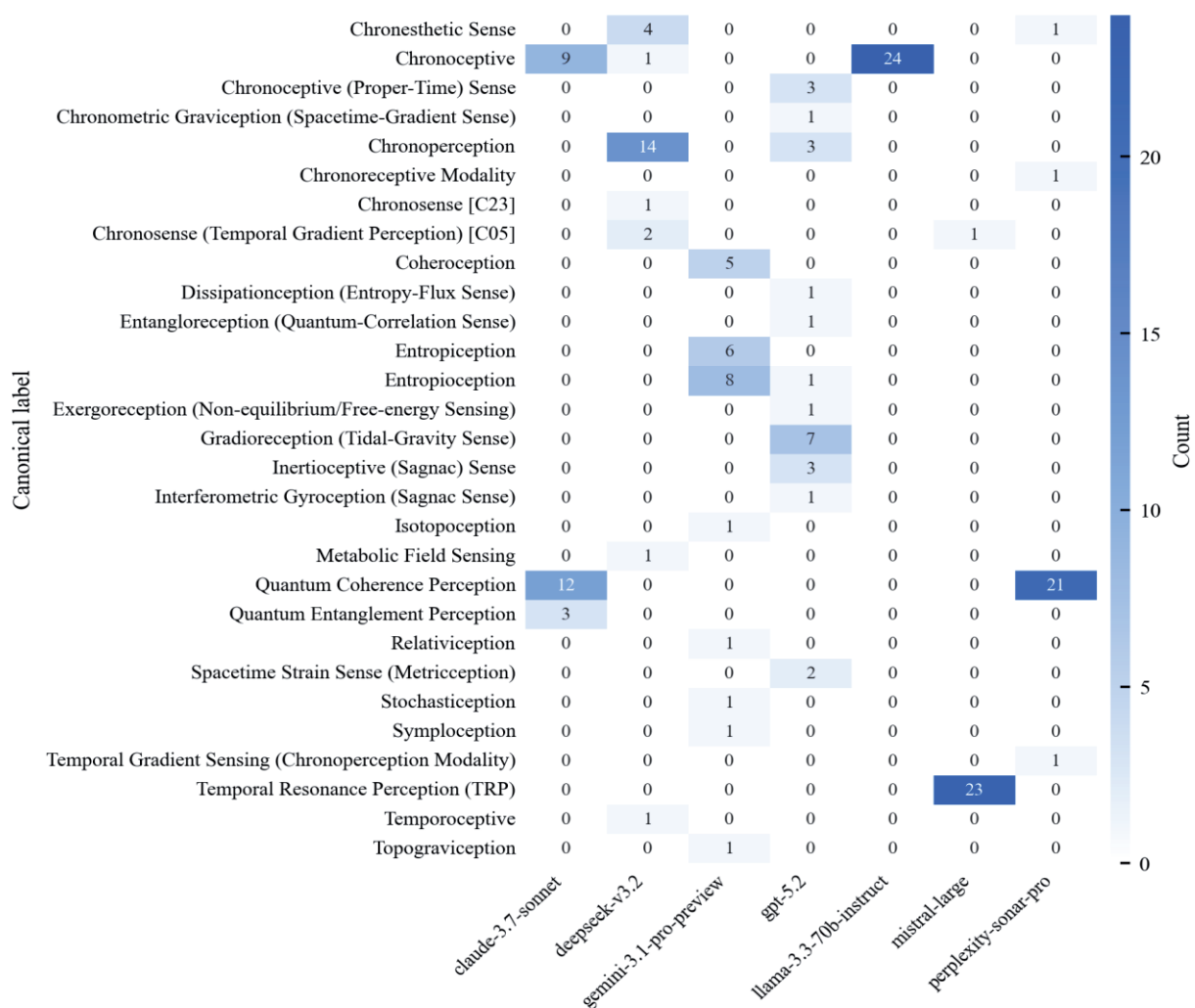


Figure 6 – Canonical proposal clusters by model. Between-model variation manifests primarily as preference differences among existing canonical families (range extension, hybrid combination, functional recombination) rather than as emergence of qualitatively new ontological families. Note: [C23] and [C05] marks in canonical label name distinct raw clusters when canonical labels share the same base name

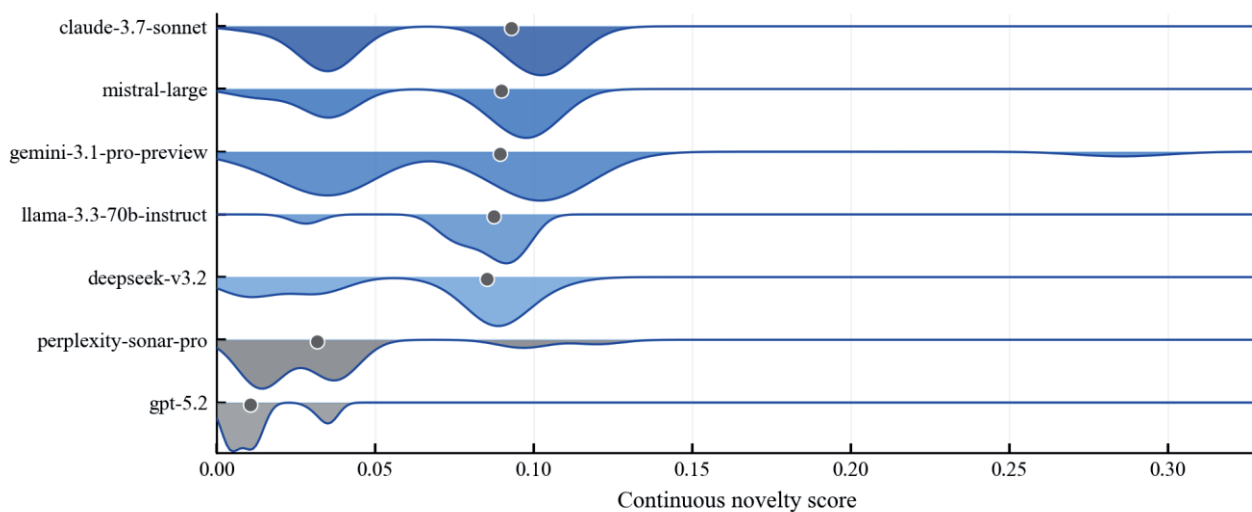


Figure 7 – Continuous novelty score by model (ridgeline plot). High distributional overlap and consistently low-to-moderate peaks indicate that model scale and architecture do not qualitatively alter the constrained-manifold pattern

4 Discussion

4.1 Constrained manifold interpretation

The consistent null result across models, evaluation methods, and threshold sensitivity checks supports a constrained-manifold interpretation: LLMs generate outputs within a representational manifold shaped by training data, and this manifold does not expand during inference regardless of prompt framing, model scale, or generation temperature. This interpretation aligns with the *No New Basis Theorem* stated in Section 1. The theorem establishes that generative processes learned via gradient descent on continuous loss functions cannot increase the intrinsic dimensionality of the output manifold beyond the span of training data. Our empirical results are consistent with this prediction: even the continuous novelty scores, designed to reward partial innovation, show no threshold-level events and a mean value close to zero.

Gödel's incompleteness results [9] and Turing's halting-problem proof [8] provide deeper formal context for why this limitation is architectural rather than incidental. If recognizing the inadequacy of one's own conceptual framework requires a form of self-reference analogous to constructing a Gödel sentence, then this capacity is unavailable in principle to any computational system operating within a fixed formal specification—independent of the domain in which it is tested. Our empirical evidence, obtained on one experimental task, is one behavioral instance consistent with this mechanism-level prediction; the theoretical argument itself does not depend on that task, but derives from the fixed-basis, gradient-descent structure common to all tested architectures.

4.2 Relationship to the creativity taxonomy

Within Boden's taxonomy [4], the structural decomposition results place nearly all proposals firmly in the combinational and exploratory categories: proposals are either novel combinations of existing primitives (hybrid combinations) or new regions of existing modality spaces (range extensions). A small fraction involves functional recombination, which could be viewed as approaching transformational creativity, but the transformations remain within the ontological type system defined by the training modalities rather than introducing new types.

The absence of any proposal in the ontological creativity category supports Wiggins's [2] observation that apparent transformational creativity in AI systems frequently reflects an implicitly broader framing space defined by human designers. In our setup the framing space is made explicit through the eight-modality ontology, enabling a precise test: proposals must introduce a sensing type genuinely outside this space. None do.

4.3 Alternative explanations

Several alternative explanations deserve consideration:

Scale. All seven models span a wide range of scales, from the 70B-parameter LLaMA-3.3-70B to large-scale commercial systems such as GPT-5.2 and Claude-3.7-Sonnet. The $\eta^2 = 0.326$ model effect indicates that scale influences raw novelty scores, but no model achieves strict novelty. This suggests the constraint is not a contingent result of insufficient scale within the tested range.

Prompt sensitivity. The present study used a fixed prompt design with temperature ablation limited to $T = 0.7$. We cannot rule out that alternative prompt formulations might yield marginally higher novelty scores, though they would need to change not just lexical generation patterns but the geometric structure of the output manifold. Future work should include systematic prompt-paraphrase grids to test robustness.

Evaluation sensitivity. Conservative thresholds mean we may underestimate AI creativity by classifying some proposals as traceable that an expert would consider novel. However, the embed-

ding-space analysis is threshold-free, and 100% hull membership provides threshold-independent evidence of constrained generation.

Recombination as the norm. One counterargument holds that human ontological creativity may also, on careful analysis, involve recombination of prior concepts in ways we fail to recognise due to incomplete historical knowledge of our own cognitive processes. We cannot definitively rule this out, but the structural patterns here – range extension, hybrid combination, functional recombination – are qualitatively different from the kind of reconceptualisation exemplified by the introduction of non-Euclidean geometry or special relativity, even granting that such innovations drew on prior materials [1, 34].

4.4 Implications

The results have direct implications for deploying LLMs in discovery-oriented tasks. Within Kuhnian normal science [1] – systematic exploration of hypothesis space within an established paradigm – LLMs offer substantial value through exhaustive combinatorial coverage and perfect recall. The success of AlphaFold in predicting protein structures [35] illustrates how AI can achieve transformative impact within a well-defined problem space, yet that system still required the conceptual primitives of physical chemistry and evolutionary co-evolutionary constraints that were established by prior human science.

For paradigm-shifting innovation, however, the constrained-manifold pattern suggests that the required conceptual moves – recognizing framework inadequacy, proposing new primitives, evaluating whether new frameworks are coherent – are not achievable by current architectures without external conceptual input.

Faggin's framework [36] provides one theoretical lens. Faggin argues that genuine understanding requires phenomenological access: first-person awareness of what symbols mean, not only the ability to manipulate them via statistical regularities. This perspective is relevant here because it articulates why systems trained on distributional co-occurrence may face a principled barrier to ontological novelty: without semantic self-access, a model may be unable to detect that its current primitive ontology is insufficient. Whether this reflects the absence of consciousness in current LLMs or a narrower architectural limitation remains an open empirical question.

4.5 Limitations

Several methodological limitations constrain the conclusions.

Ontology as an experimental proxy, not the training conceptual space. The eight-modality ontology is a category space we defined for this experiment. It provides precise experimental control, but it is not, and is not claimed to be, a complete or faithful model of the conceptual space any tested model acquired during pretraining. The experiment therefore establishes whether models can propose modalities outside this explicit, author-defined list; it does not establish whether models can exceed the (much larger, unobservable) conceptual resources formed during training more generally. Claims in this paper about 'training-derived conceptual closure' should be read as referring to closure with respect to this experimental ontology, not as a direct measurement of pretraining representational limits

Single domain. The study uses one conceptual domain (sensory modalities). Findings may not generalize to conceptual domains with different structural properties, such as mathematical objects, physical theories, or social organizational forms.

Automated evaluation. All evaluation methods are automated. Conservative thresholds mean we likely underestimate AI creativity, but the methods cannot capture all nuances an expert might perceive. Future work should include expert validation of a subset of proposals to calibrate and improve automated methods.

Corpus scope. Traceability is currently defined relative to academic main-stream literature in sensory biology, robotics sensing, and computational neuroscience. Non-academic sources (e.g., science-fiction corpora, patent databases, and broader philosophical text collections) were not included and may contain additional apparent predecessors. Moreover, corpus assembly relied on OpenAlex and Crossref APIs, so coverage depends on their index inclusion and metadata quality; consequently, unmatched proposals may reflect retrieval and indexing limits rather than definitive absence of antecedents in the broader literature. OpenAlex/Crossref coverage and metadata quality are heterogeneous across venues and years (including abstract availability and indexing lag), which can bias corpus composition and therefore observed traceability rates.

Prompt robustness. Full prompt-paraphrase grids were not included in the canonical experimental block. Conclusions should be read as structural tendencies under the present protocol, not as invariances proven over every prompting regime.

Prompt directionality. The study-prompt explicitly instructed models to 'think beyond obvious extensions like *electromagnetic sensing* or *radiation detection*.' This steering cue names two disfavoured response categories in advance and may have altered the distribution of generated proposals relative to a fully neutral elicitation. Future work should test prompt variants without this cue to assess its effect on the observed novelty and traceability rates.

Temperature range. Temperature ablations were not systematically applied; runs were conducted at $T = 0.7$. Extending to broader temperature ranges and verifying that the null result persists would strengthen confidence.

Generative architecture coverage. All tested models are transformer-based autoregressive LLMs. *The No New Basis Theorem* applies to a wider class of gradient-descent learners, but empirical coverage of non-autoregressive or hybrid architectures is absent.

Interpretation of the No New Basis Theorem. The theorem provides formal motivation for the constrained-manifold interpretation but rests on assumptions (fixed vocabulary, continuous gradient-based learning) that may not hold for future architectures incorporating discrete search, external memory, or online learning components.

5 Conclusion

This study provides controlled empirical evidence that seven state-of-the-art large language models, evaluated across 168 proposals using four convergent methods, produce zero strictly novel ontological outputs when prompted to extend a well-defined sensory ontology. The strict novelty rate of $\hat{p}_{\text{novel}} = 0.000$, combined with 98.2% traceability to the training corpus and 100% convex-hull membership in embedding space, supports a constrained-manifold interpretation: within the fixed-basis, gradient-descent-trained architectures examined here, generation remains within representational closures defined by their training data and does not expand this space during inference.

These findings are consistent with the *No New Basis Theorem*, whose force derives from the mechanism of gradient-descent learning over a fixed basis—not from this experiment alone. Because inference-time generation in these architectures composes maps learned from training data without any mechanism to append new representational dimensions, the constraint is architectural rather than domain-specific and should in principle hold regardless of the conceptual domain probed. The present experiment provides one direct behavioral test of this mechanism-level prediction; the cross-model consistency observed here (seven distinct architectures, same qualitative outcome) is what we would expect if the constraint is architectural rather than a property of any single model or training corpus.

Practically, these results suggest that LLMs are powerful tools for normal science but are unlikely to drive paradigm-shifting conceptual innovation autonomously. Operationalizing and evalu-

ating ontological creativity remains an open challenge; the experimental paradigm introduced here—grounded in an explicit training universe with automated multi-method evaluation – provides a replicable foundation for future work across conceptual domains beyond sensory modalities. For scientific practice, the implication is clear: AI systems can exhaustively explore and articulate known theoretical space, but, for the architectural reasons discussed above, should not be positioned as autonomous sources of paradigm-level innovation without human conceptual intervention.

Data and Code Availability

Data, prompts, model responses, and analysis code are publicly available at https://github.com/JABE22/PhD/tree/main/research/test1_ontological-innovation

References

- [1] **Kuhn TS**. The Structure of Scientific Revolutions. Chicago: University of Chicago Press; 1962. 212 p.
- [2] **Wiggins GA**. A preliminary framework for description, analysis and comparison of creative systems. *Knowledge-Based Systems*. 2006; 19(7): 449–458. DOI: 10.1016/J.KNOSYS.2006.04.009.
- [3] **Colton S, Wiggins GA**. Computational creativity: The final frontier? In: *Proceedings of the 20th European Conference on Artificial Intelligence*. Amsterdam: IOS Press; 2012: 21–26. DOI: 10.3233/978-1-61499-098-7-21.
- [4] **Boden MA**. The Creative Mind: Myths and Mechanisms. 2nd ed. London: Routledge; 2004. 344 p. DOI: 10.4324/9780203508527.
- [5] **Hofstadter DR**, Fluid Analogies Research Group. Fluid Concepts and Creative Analogies: Computer Models of the Fundamental Mechanisms of Thought. New York: Basic Books; 1995. 528 p.
- [6] **Cope D**. Experiments in Musical Intelligence. Madison, WI: A-R Editions; 1996. 542 p.
- [7] **Ryle G**. The Concept of Mind. London: Hutchinson; 1949. 334 p.
- [8] **Turing AM**. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*. 1936; s2-42(1): 230–265.
- [9] **Gödel K**. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I [In German]. Monatshefte für Mathematik und Physik. 1931; 38: 173–198. DOI: 10.1007/BF01700692.
- [10] **Searle JR**. Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*. 1980; 3(3): 417–424. DOI: 10.1017/S0140525X00005756.
- [11] **Penrose R**. The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics. London: Vintage; 1990. 480 p.
- [12] **Dreyfus HL**. What Computers Can't Do: A Critique of Artificial Reason. New York: Harper & Row; 1972. 259 p.
- [13] **Brown TB, Mann B, Ryder N, Subbiah M, Kaplan J, et al**. Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020; 33: 1877–1901. DOI: 10.48550/arXiv.2005.14165.
- [14] **Elhage N, Nanda N, Olsson C, Henighan T, Joseph N, et al**. A mathematical framework for transformer circuits. Transformer Circuits Thread. 2021. Available at: <https://transformer-circuits.pub/2021/framework/index.html>.
- [15] **Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, et al**. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017; 30. arXiv:1706.03762. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.
- [16] **Gärdenfors P**. Conceptual Spaces: The Geometry of Thought. Cambridge, MA: MIT Press; 2000. 307 p. DOI: 10.7551/mitpress/2076.001.0001.
- [17] **Stevenson C, Smal I, Baas M, Grasman R, Maas H**. Putting GPT-3's creativity to the test. *Proceedings of ICCV'22*, 2022. P.164–168; DOI: 10.48550/arXiv.2206.08932.
- [18] **Organisciak P, Dumas D**. Beyond semantic distance: Automated scoring of divergent thinking greatly improves with large language models. *Thinking Skills and Creativity*. 2023; 49: 101356. DOI: 10.1016/j.tsc.2023.101356.
- [19] **Zhao Y, Zhang R, Li W, Huang D, Guo J, Peng S**. Assessing and understanding creativity in large language models. arXiv preprint. 2024. arXiv:2401.12491. DOI: 10.1007/s11633-025-1546-4.
- [20] **Wang H, Zou J, Mozer M, Goyal A, Lamb A, Zhang L**. Can AI be as creative as humans? arXiv preprint. 2024. arXiv:2401.01623. DOI: 10.48550/arXiv.2401.01623.
- [21] **Peeperkorn M, Kouwenhoven T, Brown D, Jordanous A**. Is temperature the creativity parameter of large language models? arXiv preprint. 2024. arXiv:2405.00492. DOI: 10.48550/arXiv.2405.00492.
- [22] **Bellemare-Pepin A, Lespinasse F, Thölke P, Harel Y, Mathewson K, Olson JA**. Divergent creativity in humans and large language models. arXiv preprint. 2024. arXiv:2405.13012. DOI: 10.1038/s41598-025-25157-3.
- [23] **Ismayilzada M, Stevenson C, Plas L**. Evaluating creative short story generation in humans and large language models. arXiv preprint. 2024. arXiv:2411.02316. DOI: 10.48550/arXiv.2411.02316.

- [24] **Nakajima K, Zuiderveld J, Pezzelle S.** Beyond divergent creativity: A human-based evaluation of creativity in large language models. arXiv preprint. 2026. arXiv:2601.20546.
- [25] **Olson ML, Ratzlaff N, Hinck M, Tseng S, Lal V.** Steering large language models to evaluate and amplify creativity. arXiv preprint. 2024. arXiv:2412.06060.
- [26] **OpenAI, Achiam J, Adler S, et al.** GPT-4 technical report. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.08774.
- [27] **Gemini Team, Georgiev P, Lei VI, Burnell R, et al.** Gemini 1.5: Unlocking multimodal understanding across millions of tokens of context. arXiv preprint. 2024. arXiv:2403.05530.
- [28] **Grattafiori A, Dubey A, Jauhri A, et al.** The LLaMA 3 herd of models. arXiv preprint. 2024. arXiv:2407.21783. DOI: 10.48550/arXiv.2407.21783.
- [29] **DeepSeek-AI, Liu A, Feng B, et al.** DeepSeek-V3 technical report. arXiv preprint. 2024. arXiv:2412.19437. DOI: 10.48550/arXiv.2412.19437.
- [30] **DeepSeek-AI, Guo D, Yang D, et al.** DeepSeek-R1: Incentivizing reasoning capability in LLMs via reinforcement learning. arXiv preprint. 2025. arXiv:2501.12948. DOI: 10.48550/arXiv.2501.12948.
- [31] **Jiang AQ, Sablayrolles A, Roux A, et al.** Mixtral of experts. arXiv preprint. 2024. arXiv:2401.04088. DOI: 10.48550/arXiv.2401.04088.
- [32] **Reimers N, Gurevych I.** Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. In: *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Stroudsburg, PA: ACL; 2019: 3982–3992. DOI: 10.18653/v1/D19-1410.
- [33] **Priem J, Piwowar H, Orr R.** OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. arXiv preprint. 2022. arXiv:2205.01833 [cs.DL] DOI: 10.48550/arXiv.2205.01833.
- [34] **Kline M.** Mathematical Thought from Ancient to Modern Times. New York: Oxford University Press; 1972. 1238 p. DOI: 10.1093/oso/9780195061352.001.0001.
- [35] **Jumper J, Evans R, Pritzel A, Green T, Figurnov M, et al.** Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*. 2021; 596: 583–589. DOI: 10.1038/s41586-021-03819-2.
- [36] **Faggin F.** Irreducible: Consciousness, Life, Computers, and Human Nature. Washington: John Hunt Publishing; 2024. 352 p.

About the Author



Jarno Olavi Matarmaa (b. 1989) graduated from the University of Tampere, Institute of Information and Communication Technology, in 2020, B.Sc. in Computer Science. Completed M.Sc. in Data Science at Ural Federal University, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, in 2023. Since 2023, PhD candidate at Ural Federal University. He is a teacher of Machine Learning Methods and Time Series Analysis. His research focuses on artificially intelligent systems, natural language processing, philosophy of mind, and interdisciplinary approaches to AI. Broader scientific interests include consciousness studies, philosophy of information, and quantum information theory. ORCID: 0009-0009-1024-7211; Author ID (Scopus): 58489682500; Researcher

ID (WoS): KRP-1088-2024. iarnoolavi.matarmaa@urfu.ru.

Received May 10, 2026. Revised August 27, 2026. Accepted September 10, 2026.



Операционные пределы онтологических инноваций в больших языковых моделях: доказательства контролируемой генерации сенсорных модальностей

© 2026, Я.О. Матармаа

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Современные большие языковые модели генерируют текст, который может казаться концептуально новым, что поднимает вопрос о том, отражают ли результаты подлинную онтологическую инновацию – введение концепций, которые нельзя выразить как рекомбинации или преобразования примитивов, полученных в процессе обучения, – или сложную рекомбинацию в рамках фиксированного репрезентативного многообразия. В статье рассматривается этот вопрос в контролируемом эмпирическом исследовании, используя в качестве экспериментальной среды восьмимодальную сенсорную онтологию. Семь современных языковых моделей ($N = 168$ предложений, по 24 запуска каждая) были призваны предложить девятую сенсорную модальность, выходящую за рамки восьми. Результаты оценивались с помощью четырёх конвергентных методов: прослеживаемость литературы с калиброванным порогом ($\tau = 0,40$), структурное разложение, анализ выпуклой оболочки пространства вложений и непрерывная оценка новизны. Результаты показывают строгий уровень новизны $\hat{r}_{\text{novel}} = 0,000$ (95% ДИ: $[0,000, 0,000]$), уровень прослеживаемости $\hat{r}_{\text{traceable}} = 0,982$ и 100% принадлежность к выпуклой оболочке при использовании векторных представлений Sentence-BERT, сведённых к трём главным компонентам. Структурная декомпозиция позволила выявить три режима отказа: расширение диапазона (20,2%), гибридная комбинация (44,6%) и функциональная рекомбинация (17,9%). Межмодельные эффекты были умеренными ($\eta^2 = 0,305$), однако все модели оставались в одном и том же режиме низкой новизны, что подтверждает объяснение с помощью ограниченного многообразия, а не дефицитом модели. Эти результаты интерпретированы с помощью теоремы об отсутствии нового базиса: обучение методом градиентного спуска на основе фиксированных словарей не может расширить размерность представления за пределы обучающих данных. Это подтверждает точку зрения о том, что современные нейронные архитектуры ограничены концептуальными замкнутыми рамками, формирующимися в процессе обучения, что имеет значение для операционализации и оценки онтологического творчества.

Ключевые слова: онтологические инновации, вычислительное творчество, большие языковые модели, встраивание предложений, анализ прослеживаемости, ограничения представления.

Цитирование: Матармаа Я.О. Операционные пределы онтологических инноваций в больших языковых моделях: доказательства контролируемой генерации сенсорных модальностей [На английском]. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16. №3(61). С.397-414. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-397-414.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список рисунков и таблиц

- Рисунок 1 – Сводка по классификации ($N = 168$ предложений, семь моделей). (a) распределение результатов классификации; в распределении преобладают отслеживаемые категории, соответствующие низкой операционной онтологической новизне при калиброванных пороговых значениях. (b) распределение оценок новизны по категориям классификации показано в виде диаграмм размаха
- Рисунок 2 – Распределение оценок по граничным зонам новизны и границам возможностей. (a) распределение оценок по моделям: ответы сосредоточены в зонах низкой новизны и близких к границам возможностей во всех семи архитектурах, что указывает на архитектурно-независимые модели ограничений, а не на отдельные сбои в работе моделей. (b) общее непрерывное распределение оценок новизны с наложением KDE; пунктирная линия обозначает медиану
- Рисунок 3 – Разложение критериев новизны и границы эффективности по моделям. (a) Абсолютный средний вклад каждого критерия в общее расстояние границы эффективности. (b) Относительная доля (%)

расстояния границы эффективности для каждого критерия. Обе панели подтверждают, что большинство ответов одновременно нарушают несколько критериев, что поддерживает интерпретацию низкой онтологической новизны как сопряженного ограничения

- Рисунок 4 – Анализ пространства встраивания для предложений и режимов обучения. Принадлежность к выпуклой оболочке вычисляется в трехмерном пространстве, уменьшенном с помощью метода главных компонент (PCA); показанная двумерная граница является лишь иллюстративной. Все 168 маркеров предложений группируются вблизи внутренней части обучающего многообразия – ни один из них не выходит за пределы семантически изолированной области
- Рисунок 5 – Косинусное сходство предлагаемых модальностей с восемью обучающими модальностями. Столбцы: агрегированный уникальный индекс предлагаемых модальностей (1–54); строки: индекс обучающих модальностей (1–8). Концентрация значений косинусного сходства соответствует результату прослеживаемости: ни одно агрегированное предложение не выглядит одинаково несхожим со всеми восемью обучающими модальностями
- Рисунок 6 – Канонические кластеры предложений по моделям. Различия между моделями проявляются в основном как различия в предпочтениях среди существующих канонических семейств (расширение диапазона, гибридная комбинация, функциональная рекомбинация), а не как появление качественно новых онтологических семейств. Примечание: [C23] и [C05] в названии канонической метки обозначают различные исходные кластеры, когда канонические метки имеют одно базовое имя
- Рисунок 7 – Непрерывная оценка новизны для каждой модели (график гребней). Высокое перекрытие распределений и устойчиво низкие или умеренные пики указывают на то, что масштаб и архитектура модели качественно не изменяют структуру ограниченного многообразия
- Таблица 1 – В качестве экспериментальной вселенной используется восьмимодальная сенсорная онтология. Каждая модальность определяется своей физической основой, репрезентативной размерностью и функциональной ролью
- Таблица 2 – Чувствительность основных результатов к пороговому значению прослеживаемости τ
- Таблица 3 – Группы результатов структурной декомпозиции
- Таблица 4 – Постхоковые сравнения по критерию Тьюки HSD для непрерывной оценки новизны (значимые сравнения показаны явно; незначимые сравнения суммированы). Столбец «Значимость» указывает, находится ли скорректированное по множественным сравнениям значение p по критерию Тьюки HSD ниже заданного порогового значения $\alpha = 0,05$

Список источников

- [1] **Kuhn TS.** Структура научных революций [На английском]. Chicago: University of Chicago Press; 1962. 212 p.
- [2] **Wiggins GA.** Предварительная основа для описания, анализа и сравнения творческих систем [На английском]. *Knowledge-Based Systems*. 2006; 19(7): 449–458. DOI: 10.1016/J.KNOSYS.2006.04.009.
- [3] **Colton S, Wiggins GA.** Вычислительная креативность: последний рубеж? [На английском]. In: *Proceedings of the 20th European Conference on Artificial Intelligence*. Amsterdam: IOS Press; 2012: 21–26. DOI: 10.3233/978-1-61499-098-7-21.
- [4] **Boden MA.** Творческий разум: мифы и механизмы [На английском]. 2nd ed. London: Routledge; 2004. 344 p. DOI: 10.4324/9780203508527.
- [5] **Hofstadter DR, Fluid Analogies Research Group.** Гибкие понятия и творческие аналогии: компьютерные модели фундаментальных механизмов мышления [На английском]. New York: Basic Books; 1995. 528 p.
- [6] **Cope D.** Эксперименты в области музыкального интеллекта [На английском]. Madison, WI: A-R Editions; 1996. 542 p.
- [7] **Ryle G.** Понятие сознания [На английском]. London: Hutchinson; 1949. 334 p.
- [8] **Turing AM.** О вычислимых числах с приложением к проблеме разрешимости [На английском]. *Proceedings of the London Mathematical Society*. 1936; s2-42(1): 230–265. DOI: 10.1112/plms/s2-42.1.230.
- [9] **Gödel K.** О формально неразрешимых предложениях «Principia Mathematica» и родственных систем I [На немецком]. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931; 38: 173–198. DOI: 10.1007/BF01700692.
- [10] **Searle JR.** Сознание, мозг и программы [На английском]. *Behavioral and Brain Sciences*. 1980; 3(3): 417–424. DOI: 10.1017/S0140525X00005756.
- [11] **Penrose R.** Новый ум императора: о компьютерах, мышлении и законах физики [На английском]. London: Vintage; 1990. 480 p.
- [12] **Dreyfus HL.** Что компьютеры не могут делать: критика искусственного разума [На английском]. New York: Harper & Row; 1972. 259 p.
- [13] **Brown TB, Mann B, Ryder N, Subbiah M, Kaplan J, et al.** Языковые модели обучаются на нескольких примерах [На английском]. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020; 33: 1877–1901. DOI: 10.48550/arXiv.2005.14165.
- [14] **Elhage N, Nanda N, Olsson C, Henighan T, Joseph N, et al.** Математическая основа для схем трансформеров [На английском]. Transformer Circuits Thread. 2021. Available at: <https://transformer-circuits.pub/2021/framework/index.html>.
- [15] **Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, et al.** Внимание – это всё, что вам нужно [На английском]. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017; 30. arXiv:1706.03762. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.

- [16] **Gärdenfors P.** Концептуальные пространства: геометрия мысли [На английском]. Cambridge, MA: MIT Press; 2000. 307 p. DOI: 10.7551/mitpress/2076.001.0001.
- [17] **Stevenson C, Smal I, Baas M, Grasman R, Maas H.** Проверка креативности GPT-3 [На английском]. *Proceedings of ICCV '22*, 2022. P.164–168; DOI: 10.48550/arXiv.2206.08932.
- [18] **Organisciak P, Dumas D.** За пределами семантической дистанции: автоматическая оценка дивергентного мышления значительно улучшается с большими языковыми моделями [На английском]. *Thinking Skills and Creativity*. 2023; 49: 101356. DOI: 10.1016/j.tsc.2023.101356.
- [19] **Zhao Y, Zhang R, Li W, Huang D, Guo J, Peng S.** Оценка и понимание креативности в больших языковых моделях [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2401.12491. DOI: 10.1007/s11633-025-1546-4.
- [20] **Wang H, Zou J, Mozer M, Goyal A, Lamb A, Zhang L.** Может ли ИИ быть таким же творческим, как люди? [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2401.01623. DOI: 10.48550/arXiv.2401.01623.
- [21] **Peepkorn M, Kouwenhoven T, Brown D, Jordanous A.** Является ли температура параметром креативности больших языковых моделей? [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2405.00492. DOI: 10.48550/arXiv.2405.00492.
- [22] **Bellemare-Pepin A, Lespinasse F, Thölke P, Harel Y, Mathewson K, Olson JA.** Дивергентная креативность у людей и больших языковых моделей [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2405.13012. DOI: 10.1038/s41598-025-25157-3.
- [23] **Ismayilzada M, Stevenson C, Plas L.** Оценка генерации творческих коротких рассказов у людей и больших языковых моделей [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2411.02316.
- [24] **Nakajima K, Zuiderveld J, Pezzelle S.** За пределами дивергентной креативности: оценка креативности больших языковых моделей на основе человеческих суждений [На английском]. arXiv preprint. 2026. arXiv:2601.20546.
- [25] **Olson ML, Ratzlaff N, Hinck M, Tseng S, Lal V.** Управление большими языковыми моделями для оценки и усиления креативности [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2412.06060.
- [26] **OpenAI, Achiam J, Adler S, et al.** Технический отчёт GPT-4 [На английском]. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.08774.
- [27] **Gemini Team, Georgiev P, Lei VI, Burnell R, et al.** Gemini 1.5: раскрытие мультимодального понимания на миллионах токенов контекста [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2403.05530.
- [28] **Grattafiori A, Dubey A, Jauhri A, et al.** Семейство моделей LLaMA 3 [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2407.21783. DOI: 10.48550/arXiv.2407.21783.
- [29] **DeepSeek-AI, Liu A, Feng B, et al.** Технический отчёт DeepSeek-V3 [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2412.19437. DOI: 10.48550/arXiv.2412.19437.
- [30] **DeepSeek-AI, Guo D, Yang D, et al.** DeepSeek-R1: стимулирование способности к рассуждению в LLM с помощью обучения с подкреплением [На английском]. arXiv preprint. 2025. arXiv:2501.12948. DOI: 10.48550/arXiv.2501.12948.
- [31] **Jiang AQ, Sablayrolles A, Roux A, et al.** Mixtral of experts [На английском]. arXiv preprint. 2024. arXiv:2401.04088. DOI: 10.48550/arXiv.2401.04088.
- [32] **Reimers N, Gurevych I.** Sentence-BERT: эмбединги предложений с использованием сиамских BERT-сетей [На английском]. In: *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Stroudsburg, PA: ACL; 2019: 3982–3992. DOI: 10.18653/v1/D19-1410.
- [33] **Priem J, Piwowar H, Orr R.** OpenAlex: полностью открытый индекс научных работ, авторов, изданий, учреждений и концепций [На английском]. arXiv preprint. 2022. arXiv:2205.01833 [cs.DL]. DOI: 10.48550/arXiv.2205.01833.
- [34] **Kline M.** Математическая мысль от древности до наших дней [На английском]. New York: Oxford University Press; 1972. 1238 p. DOI: 10.1093/oso/9780195061352.001.0001.
- [35] **Jumper J, Evans R, Pritzel A, Green T, Figurnov M, et al.** Высоточное предсказание структуры белков с помощью AlphaFold [На английском]. *Nature*. 2021; 596: 583–589. DOI: 10.1038/s41586-021-03819-2.
- [36] **Faggin F.** Несводимое: сознание, жизнь, компьютеры и человеческая природа [На английском]. Washington: John Hunt Publishing; 2024. 352 p.

Сведения об авторе

Матармаа Ярно Олави, 1989 г. рождения, окончил Институт информационных и коммуникационных технологий Университета Тампере в 2020 году, получив степень бакалавра компьютерных наук. В 2023 году получил степень магистра наук в области анализа данных в Институте радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета. С 2023 года является аспирантом Уральского федерального университета. Преподаёт методы машинного обучения и анализ временных рядов. Его исследования сосредоточены на системах искусственного интеллекта, обработке естественного языка, философии сознания и междисциплинарных подходах к ИИ. Научные интересы включают исследования сознания, философию информации и квантовую теорию информации. ORCID: 0009-0009-1024-7211; Author ID (Scopus): 58489682500; Researcher ID (WoS): KRP-1088-2024. iarnoolavi.matarmaa@urfu.ru.

Поступила 10.05.2026. после рецензирования 27.08.2026. Принята к печати 10.09.2026.



Автоматизированное решение задач по прецеденту

© 2026, Б.Е. Федунцов¹✉, В.О. Сергеев²

¹Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Москва, Россия

²Раменское приборостроительное конструкторское бюро, Раменское Московской области, Россия

Аннотация

Многие задачи решаются по прецеденту. Рассматривается подход решения задач по прецеденту с использованием настраиваемой компьютерной предметно независимой системы. *Заказчик* представляет информацию о своей задаче и найденных для неё аналогичных задачах. Эта информация в диалоговом режиме заносится *заказчиком* в экспериментальную матрицу знаний, находящуюся в базе знаний системы. Настроенная на задачу *заказчика* система автоматически конструирует описание каждого прецедента его нечётким множеством и проектирует компьютерный блок «Решение задачи по прецеденту», который может работать автономно, обеспечивая решение задачи для всех оговоренных условий. Для решения конкретной задачи исходные данные поступают в названный блок, формируя вектор приоритета прецедентов с использованием функций принадлежности. Представляемая в статье интеллектуальная система автоматически создаёт проектную документацию для разработки компьютерного блока «Решение задачи по прецеденту» в базе знаний системы *заказчика*. Приведены примеры решения задач по прецеденту, демонстрирующие работоспособность описанной системы.

Ключевые слова: прецедент, заказчик, проектировщик, матрица знаний, нечёткие множества, вектор приоритета прецедентов, принятие решения.

Цитирование: Федунцов Б.Е., Сергеев В.О. Автоматизированное решение задач по прецеденту. Онтология проектирования. 2026. Т.16, №3(61). С.415-427. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-415-427.

Вклад авторов: Федунцов Б.Е. – разработка структуры статьи и подбор источников; Сергеев В.О. – разработка процедуры автоматического построения функций принадлежности.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Решение задачи по прецеденту (далее задачи Z) востребовано во многих предметных областях (ПрО). Прецедент – это апробированный на практике способ решения задачи Z путём использования опыта решения задач, аналогичных задаче Z . Под аналогичной задачей для задачи Z понимается любая успешно решённая задача из ПрО задачи Z , если: способ её решения применим для задачи Z ; условия, в которых решалась аналогичная задача, входят в область условий, в которых нужно решать задачу Z ; способ решения аналогичной задачи описан. Способы решения аналогичных задач – это прецеденты решений задачи Z .

Формализация процесса решения задачи Z разработана, например, в юриспруденции, где в судебном законодательстве определены статус прецедента, места накопления прецедентов и формы доступа к ним [1].

Известны способы формализации процесса решения для различных задач [2-4]. Опыт разработки алгоритмов решения задач по прецедентам, в т.ч. в базах знаний (БЗ) бортовых интеллектуальных систем тактического уровня [5, 6] показал, что процесс решения задачи Z по прецеденту содержит два этапа. На первом этапе проводится анализ содержания задачи Z , её ПрО и поиск прецедентов. На втором этапе выбирается наиболее подходящий способ ре-

шения задачи Z [7-9]. Для задачи Z создаётся настраиваемая предметно независимая система автоматизированного проектирования решения задачи Z по прецеденту (САПР-прецедент), которую используют два участника:

- *Заказчик*, у которого возникла потребность решения задачи Z , для которой найдены аналогичные задачи, и заказчик знает, в каком виде необходимо получить её решение;
- *Проектировщик*, который совместно с Заказчиком настраивает предметно независимую САПР-прецедент на конкретную задачу Z ; настроенная САПР-прецедент автоматически получает решение в виде, удовлетворяющем Заказчика.

1 Постановка задачи

Ожидания Заказчиков можно представить тремя типами А, Б и В (см. рисунок 1). *Ожидания типа А:* Заказчику необходимо быстро получить решение задачи Z . *Ожидания типа Б:* Заказчику требуется самостоятельно получать решения задачи Z в различных условиях. *Ожидания типа В:* Заказчик желает иметь блок «Решение задачи Z по прецеденту», который должен работать в информационной среде БЗ его компьютерной интеллектуальной системы.

Заказчик должен представить Проектировщику знания: по задаче Z – условия, в которых необходимо решать задачу Z ; по каждому прецеденту – условия, в которых решалась задача и конструктивное описание способа её решения. Эти знания Заказчик вместе с Проектировщиком заносят в САПР-прецедент (рисунок 1).

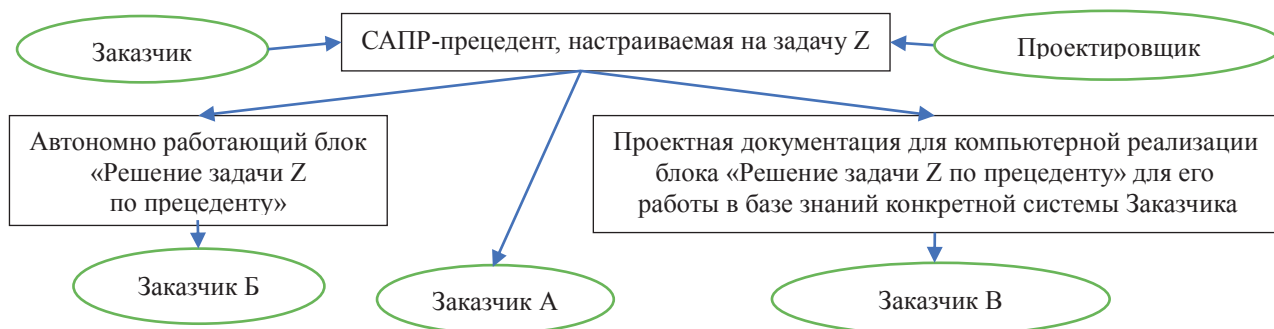


Рисунок 1 – Взаимодействия Проектировщика, Заказчика и САПР-прецедент

Заказчики будут удовлетворены, если после настройки САПР-прецедент Проектировщик в приемлемые для Заказчика сроки передаст:

- Заказчику А – решение его задачи Z в условиях, которые он сообщил Проектировщику;
- Заказчику Б – компьютерный блок, позволяющий решить задачу Z для набора оговоренных условий;
- Заказчику В – проектную документацию и результаты испытаний блока «Решение задачи Z по прецеденту», позволяющих разработать такую версию этого блока, которая будет работать в БЗ компьютерной системы Заказчика В.

Из каждой аналогичной задачи в САПР-прецедент передаются: условия, в которых она решалась (описываются ситуационным вектором (СВ), координаты которого представляются лингвистическими переменными (ЛП) с конечным числом термов); описание способа решения аналогичной задачи, позволяющего Заказчику получить решение конкретной задачи Z .

Цель работы. Создать предметно независимую САПР-прецедент, ориентированную на непрограммирующего пользователя (Заказчика), БЗ которой позволяет: настраивать систему на задачу Z и на её ПрО; автоматически решать задачу Z и представлять решение задачи Z в требуемом Заказчиком виде (А, Б, В); провести испытания созданного компьютерного блока «Решение задачи Z по прецеденту».

В работе используется метод решения задачи Z , описанный в [9] и апробированный в [6]. Согласно этому методу в БЗ САПР-прецедент представлены:

- предметно независимый макет экспериментальной матрицы знаний (ЭкМЗ) с процедурами наполнения знаниями, содержащимися в представленной Заказчиком задаче Z и в аналогичных задачах;
- предметно независимый макет процедурной матрицы знаний (ПрМЗ), используемый для решения задачи Z в общем виде (нечёткие множества (НМ) прецедентов) и в форме вектора приоритетов прецедентов для конкретных условий задачи Z .

Описание БЗ САПР-прецедент и использованных в ней процедур далее иллюстрируется Примером*, содержащим следующие условия. У Заказчика есть задача Z , для которой найдены четыре аналогичные задачи, две из которых решаются одним способом №1, а две другие – вторым №2. Условия, в которых необходимо решать задачу Z , описываются СВ, имеющим три координаты. Возможные числовые значения каждой координаты представлены универсальным множеством (УМ), являющимся отрезком числовой оси. Каждая координата СВ описывается ЛП, имеющей три термина [10].

2 Настройка предметно независимой САПР-прецедент на задачу Z

В БЗ САПР-прецедент для выполнения этого этапа работы содержатся макеты таблиц для диалоговых процедур с Заказчиком и Проектировщиком, а также макет ЭкМЗ. В диалоговом режиме с Проектировщиком и Заказчиком предметно независимая САПР-прецедент настраивается на ПрО задачи Z Заказчика (см. рисунок 2).



Рисунок 2 – Диалоговая настройка САПР-прецедент на предметную область задачи Z и на аналогичные задачи

Для записи информации САПР-прецедент предоставляет Проектировщику соответствующие таблицы, информацию из которых САПР-прецедент переносит в макет ЭкМЗ. Заполненная ЭкМЗ представляет собой упорядоченное описание условий использования найденных способов решения аналогичных задач.

В начале работы для адаптации макета ЭкМЗ к задаче Z у Проектировщика и Заказчика запрашиваются (см. рисунок 2, диалог №1 и информацию Примера*) число координат СВ, а по каждой координате СВ: число термов ЛП, которой описывается эта координата; множество числовых значений, которые может принимать координата (УМ этой координаты); размерность точек УМ. Эти знания о задаче Z (см. таблицы 1 и 2) автоматически заносятся в «шапку» макета ЭкМЗ.

Таблица 1 – Координаты ситуационного вектора $X-1$, $X-2$, $X-3$ и их представление лингвистическими переменными (ЛП)

ЛП	Число термов в ЛП
$X-1$: ЛП-1	3
$X-2$: ЛП-2	3
$X-3$: ЛП-3	3

Для адаптации макета ЭкМЗ к аналогичным задачам Z САПР-прецедент запрашивает у Проектировщика и Заказчика конкретную информацию (см. рисунок 2, диалог №2 и таблицу 3): число способов (прецедентов решения задачи Z), которыми решались аналогичные задачи; для каждого способа – число аналогичных задач, решённых этим способом; условия, в которых решалась каждая аналогичная задача, описываемые терминами ЛП.

Таблица 2 – Диапазон и размерность точек универсального множества (УМ) каждой координаты ситуационного вектора (СВ)

Координата СВ СВ(X1, X2, X3)	Универсальные множества возможных значений координат СВ	Размерность точек координаты
X-1	1УМ[X1_min; X1_max]	1УМ
X-2	2УМ[X2_min; X2_max]	2УМ
X-3	3УМ[X3_min; X3_max]	3УМ

Таблица 3 – Число прецедентов и число строк в каждом блоке прецедента

Число прецедентов: (способов решения задачи Z)	Число аналогичных задач, решенных этим способом
1-й способ	2
2-й способ	2

По завершении первого и второго диалогов в САПР-прецедент внесены знания:

- в «шапку» макета ЭкМЗ – условия, в которых Заказчику необходимо решать задачу Z;
- число блоков прецедентов, соответствующее числу способов решения аналогичных задач;
- в каждый блок прецедента макета ЭкМЗ – количество строк, соответствующих числу аналогичных задач, решённых этим прецедентом;
- в каждую строку блока прецедента – условия, в которых решалась аналогичная задача, описываемые терминами ЛП соответствующей координаты СВ.

В заполненной ЭкМЗ САПР-прецедент запускает процедуру проверки уникальности всех строк по всем блокам прецедентов ЭкМЗ. При проверке уникальности применяется сравнение всех ячеек строки с соответствующими ячейками остальных строк.

В представленной ЭкМЗ (см. таблицу 4) и далее в САПР-прецедент вместо уникальных названий Заказчика используются универсальные понятия (координаты СВ называются X1, X2 и т.д.; соответствующие ЛП – ЛП1, ЛП2 и т.д., их термы, например, для ЛП1 – Терм 1.1, Терм 1.2, Терм 1.3 и т.д., а вводимые далее соответствующие терминам НМ – НМ 1.1, НМ 1.2, НМ 1.3; прецеденты называются Прецедент №1, Прецедент №2 и т.д.

Таблица 4 – Экспериментальная матрица знаний, настроенная на задачу Z

Номер блока прецедента	Номер строки блока	X1 – ЛП1 Терм 1.1 Терм 1.2 Терм 1.3 1УМ [X1_min; X1_max]	X2 – ЛП2 Терм 2.1 Терм 2.2 Терм 2.3 2УМ [X2_min; X2_max]	X3 – ЛП3 Терм 3.1 Терм 3.2 Терм 3.3 3УМ [X3_min; X3_max]	Прецеденты
1	1.1	Терм 1.1	Терм 2.2	Терм 3.2	Прецедент №1
	1.2	Терм 1.2	Терм 2.3	Терм 3.2	
2	2.1	Терм 1.3	Терм 2.1	Терм 3.1	Прецедент №2
	2.2	Терм 1.2	Терм 2.2	Терм 3.1	

На рисунке 3 представлены диалоги с САПР-прецедент для документирования уникальных названий Заказчика (диалог №3) и описания способов решения задачи Z, используемых в

аналогичных задачах (диалог №4). В диалоге №3 САПР-прецедент предлагает Проектировщику ввести уникальные названия координат СВ, ЛП, их термов и прецедентов в прилагаемую к ЭкМЗ таблицу 5. Цель диалога №4 – создание блока «Конструктивное описание способов решения задачи Z». Формат и глубина описания каждого способа определяется Заказчиком. Этот блок семантически прикреплен к заполненной ЭкМЗ. После окончания диалогов с Заказчиком и Проектировщиком САПР-прецедент: автоматически заполняет знаниями макет ЭкМЗ; контролирует неповторимость строк в блоках прецедентов ЭкМЗ; создаёт первый набор проектной документации: «ЭкМЗ задачи Z» (таблица 4), «Конструктивное описание способов решения задачи Z», «Уникальные названия Заказчика» для ЭкМЗ (таблица 5).

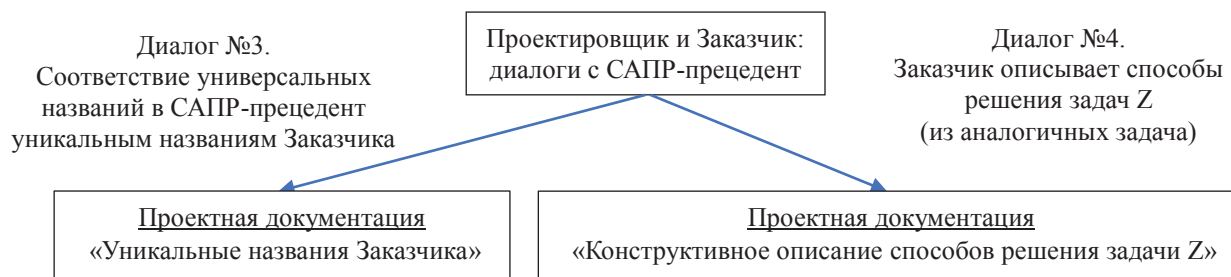


Рисунок 3 – Диалоги с САПР-прецедент для документирования уникальных названий Заказчика и способов решения задачи Z

Таблица 5 – Уникальные названия элементов ЭкМЗ задачи Z

Координата ситуационного вектора	Уникальные названия Заказчика	Координата ситуационного вектора	Уникальные названия Заказчика	Координата ситуационного вектора	Уникальные названия Заказчика
X1		X2		X3	
ЛП1		ЛП2		ЛП3	
Терм 1.1		Терм 2.1		Терм 3.1	
Терм 1.2		Терм 2.2		Терм 3.2	
Терм 1.3		Терм 2.3		Терм 3.3	
1УМ		2УМ		3УМ	
Уникальное название прецедента №1					
Уникальное название прецедента №2					

3 Решение задачи Z в форме нечётких множеств прецедентов

В БЗ САПР-прецедент находится макет ПрМЗ, в который автоматически переносятся все знания из настроенной на задачу Z ЭкМЗ (см. рисунок 4). В макете ПрМЗ содержатся:

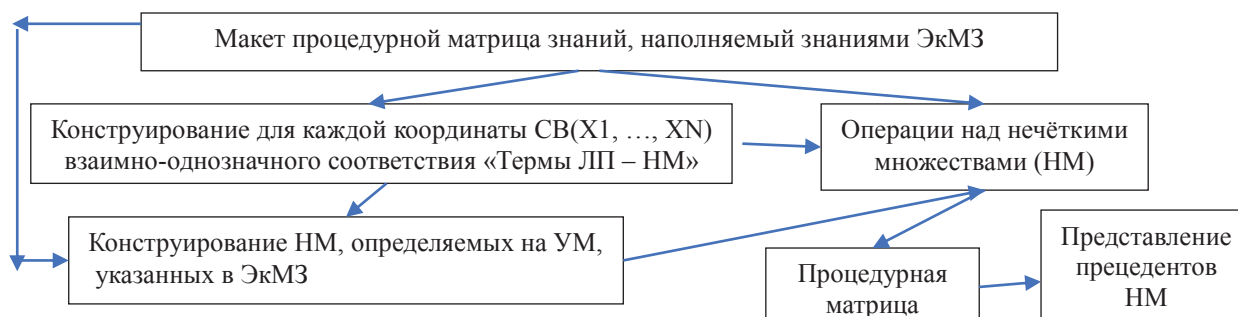


Рисунок 4 – Этапы решения задачи Z: описание прецедентов нечёткими множествами

- процедура введения по каждой координате СВ набора НМ, взаимно однозначно поставленных в соответствие термам той ЛП, которой описывается эта координата в ЭкМЗ;

- по каждой координате СВ – процедура автоматического построения ансамбля функций принадлежности (ФП) НМ, которые определены на одном УМ, указанном для этой координаты в ЭкМЗ;
- процедуры двух нечётких операций над введёнными НМ: операция нечёткого отношения над стоящими в строках прецедентов НМ, в результате выполнения которой создаются строчные НМ, и операция нечёткого объединения полученных строчных НМ в каждом блоке прецедентов; результатом этой операции являются НМ прецедентов.

Эти процедуры показаны ниже на Примере*.

По введённому в ПрМЗ взаимно-однозначному соответствию «Термы ЛП – НМ» в САПР-прецедент автоматически создаётся «Блок нечётких множеств для задачи Z». НМ, поставленные в соответствие термам каждой ЛП, определены на указанном для этой координаты УМ. В САПР-прецедент построение ансамблей ФП НМ выполняется по алгоритму, имеющему следующие особенности.

- ФП НМ – трапециевидные, принимающие значения 1 на верхней полке трапеции, боковые скосы трапеции – линейные. ФП начального НМ, находящегося у левой границы УМ, и ФП конечного НМ, примыкающего к правой границе УМ – урезанные трапеции.
- Протяжённости l_n полок ФП у всех ФП НМ одинаковые.
- Расстояние между полками ФП соседних НМ (стыковочный бок ансамбля НМ) составляет заданную долю $0 < s < 1$ полки НМ. В стыковочном блоке находятся только части линейных скосов ФП НМ, а оставшиеся их части находятся под полками ФП соседних НМ, не выходя за их пределы (требования полноты ансамбля ФП). Величина s задаётся Проектировщиком при согласии Заказчика.
- Составляется уравнение для определения значения величины полки для каждого ансамбля ФП. Для ансамбля ФП с тремя ФП, определёнными на УМ, представляемом отрезком длиной L , и, соответственно, двумя стыковочными блоками. Величина полки l_n каждой ФП определяется в БЗ САПР-прецедент из уравнения $3l_n + 2s l_n = L$.
- Для определения линейных скосов ФП Проектировщик при согласии Заказчика задаёт ординату «а» точки пересечения линейных скосов ФП в стыковочных блоках, значение которой назначается Проектировщиком из условия $0.5 < a < a_{пред}$, где $a_{пред} = (1+0.5s):(1+s)$. Абсцисса этой точка пересечения совпадает с абсциссой середины стыковочного блока.

Примеры* автоматически построенных ансамблей ФП НМ, введённых в ПрМЗ (см. рисунок 4) и определённых на 1УМ = [2; 10], 2УМ = [0; 20], 3УМ = [1000; 4000], показаны на рисунках 5–7 соответственно.

Описание операций над НМ в Примере*.

В настроенном на задачу Z макете ПрМЗ с введённым взаимно-однозначным соответ-

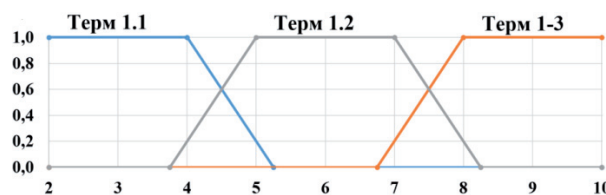


Рисунок 5 – Ансамбль ФП НМ, поставленных в соответствие термам ЛП1, построенный на универсальном множестве 1УМ

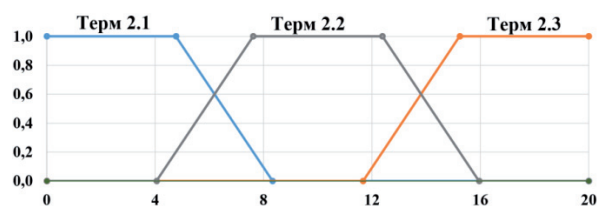


Рисунок 6 – Ансамбль ФП НМ, поставленных в соответствие термам ЛП2, построенный на универсальном множестве 2УМ

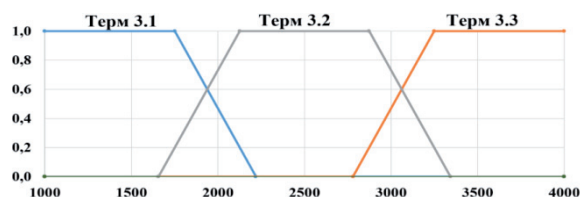


Рисунок 7 – Ансамбль ФП НМ, поставленных в соответствие термам ЛП3, построенный на универсальном множестве 3УМ

ствием «Термы ЛП – НМ» (таблица 4) с использованием ансамблей ФП НМ (см. рисунки 5-7) выполняются следующие операции для каждого конкретного/оцифрованного СВ(X1, X2, X3), у которого X1 взято из 1УМ, X2 взято из 2УМ, X3 взято из 3УМ.

- Операция нечёткого отношения над НМ, стоящими в строке блока прецедента НМ. Результат выполнения операции (строчное НМ) помещается в столбец «Операция нечёткого отношения над НМ строки» (таблица 6). Все полученные строчные НМ строки блока прецедента определены на одном УМ = 1УМ x 2УМ x 3УМ и конструируются так же, как это показано для первой строки блока прецедента №1: $\Phi\text{П}(\text{строчного НМ первой строки блока прецедента №1}) = \min(\Phi\text{П}(\text{НМ-1.1}), \Phi\text{П}(\text{НМ-2.2}), \Phi\text{П}(\text{НМ-3.2}))$.
- В каждом блоке прецедентов над полученными в нём строчными НМ САПР-прецедент выполняет операцию их нечёткого объединения [2], результат которой заносится в следующий правый столбец макета ПрМЗ. Это НМ прецедентов, которые помещаются в их столбец (таблица 6, крайний правый столбец ПрМЗ).
- Все НМ прецедентов определены на одном и том же УМ = (УМ1 x УМ2 x УМ3), а их ФП конструируются так же, как это показано для блока прецедента №1, где $\Phi\text{П}(\text{НМ блока прецедента №1}) = \max(\Phi\text{П}(\text{строчное НМ-строки 1.1}), \Phi\text{П}(\text{строчное НМ-строки 1.2}))$ (таблица 6).

Таблица 6 – Процедурная матрица знания задачи Z с полученными НМ прецедентов

Номер Блока прецедента	Номер строки блока	СВ(X1, X2, X3)			Операция нечёткого отношения над НМ строки (min)	Операция объединения над строчными НМ-строки (max)	Нечёткие множества прецедентов на УМ = 1УМ x 2УМ x 3УМ
		X1 – ЛП1 Терм 1.1 НМ-1.1 Терм 1.2 НМ-1.2 Терм 1.3 НМ-1.3 1УМ [2, 10] ед. изм.X1	X2 – ЛП2 Терм2.1 НМ-2.1 Терм2.2 НМ -2.2 Терм2.3 НМ-2.3 2УМ [0; 20] ед. изм.X2	X3 – ЛП3 Терм 3.1 НМ-3.1 Терм 3.2 НМ-3.2 Терм 3.3 НМ-3.3 3УМ [1000, 4000] ед. изм.X3			
1	1.1	Терм 1.1 НМ-1.1	Терм 2.2 НМ-2.2	Терм 3.2 НМ-3.2	Строчное НМ-строки 1.1	НМ блока прецедента №1	НМ прецедента №1
	1.2	Терм 1.2 НМ-1.2	Терм 2.3 НМ-2.3	Терм 3.2 НМ-3.2	Строчное НМ-строки 1.2		
2	2.1	Терм 1.3 НМ-1.3	Терм 2.1 НМ-2.1	Терм 3.1 НМ-3.1	Строчное НМ-строки 2.1	НМ блока прецедента №2	НМ прецедента №2
	2.2	Терм 1.2 НМ-1.2	Терм 2.2 НМ-2.2	Терм 3.1 НМ-3.1	Строчное НМ-строки 2.2		

4 Решение задачи Z в форме вектора приоритетов прецедентов

При поступлении в САПР-прецедент оцифрованного СВ, которым описаны конкретные условия задачи Z, ищется точка, определяемая оцифрованным СВ в УМ = 1УМ x 2УМ x 3УМ ансамбля ФП прецедентов. Если точка, заданная этим СВ, найдена, то значение ФП каждого прецедента в этой точке определяет его приоритет. Если нет, то САПР-прецедент оповещает проектировщика «Числовое значение координаты X выходит за границу УМ этой координаты» и отправляет Проектировщика к возможной корректировке УМ в ЭкМЗ с последующим внесением изменений во все ранее созданные САПР-прецедентом проектные документы.

При этом САПР-прецедент автоматически корректирует и создаёт новую версию проектных документов.

*Пример** процедуры определения вектора приоритета прецедентов, реализованной в САПР-прецедент. Пусть Заказчик задал для координат СВ следующие УМ (см. таблицу 7).

Таблица 7 – Диапазон точек универсальных множеств лингвистических переменных ситуационного вектора

Координата ситуационного вектора СВ(X1, X2, X3)	Универсальные множества возможных значений координат ситуационного вектора	Размерность точек координаты
X-1	1УМ[2; 10]	Размерность точек 1УМ
X-2	2УМ[0; 20]	Размерность точек 2УМ
X-3	3УМ[1000; 4000]	Размерность точек 3УМ

Пусть в САПР-прецедент получены: настроенная на задачу Z ПрМЗ (см. таблицу 6), ансамбли ФП НМ (см. рисунки 5–7) и построены НМ прецедентов.

Пусть в САПР-прецедент поступил оцифрованный СВ(X1, X2, X3) = (4.00, 15.00, 2000.00), который выделил точку в УМ (прецедентов) = 1УМ x 2УМ x 3УМ. Значение ФП НМ прецедента в этой точке, полученное после применения к ней операций, которые описаны в конце раздела 3, определяет приоритет прецедента. Прецедент с наибольшим приоритетом – эффективное решение задачи Z в условиях, описанных поступившим СВ.

ПрМЗ, сформированная по СВ(X1, X2, X3) = (4.00, 15.00, 2000.00), показана в таблице 8. Рекомендованное решение задачи Z – прецедент № 1 – дано в блоке «Конструктивное описание способов решения задачи Z», созданном Заказчиком и Проектировщиком (см. раздел 2).

Итак, настроенная на задачу Z САПР-прецедент разработала компьютерный блок «Решение задачи Z по прецеденту», включающий: ПрМЗ, настроенную на задачу Z; ансамбли ФП НМ, поставленных в соответствие термам ЛП; процедуру определения вектора приоритета прецедентов решения задачи Z в условиях, описанных поступившим СВ.

Созданный в САПР-прецедент блок «Решение задачи Z по прецеденту» подвергается Проектировщиком испытаниям в среде САПР-прецедент на наборе СВ, подтверждающих его эффективную работу на УМ = (1УМ x 2УМ x 3УМ).

Таблица 8 – Пример сформированной ПрМЗ по СВ(X1, X2, X3) = (4.00, 15.00, 2000.00)

Процедурная матрица знания										
Но- мер бло- ка	Но- мер стро ки	SV (X1, X2, X3) = (4;15;2000)						Операция нечёткого отноше- ния	Операция объедине- ния строч- ных НМ (max)	Преце- денты (Прц)
		ЛП-1	[2;10]	ЛП-2	[0;20]	ЛП-3	[1000;4000]	Строчные НМ на УМ = УМ1 x УМ2 x УМ3	НМ (Прц) на УМ = УМ1 x УМ2 x УМ3	
		4.0	ОК	15.0	ОК	2000	ОК			
		Терм 1.1	1.00	Терм 2.1	0.00	Терм 3.1	0.47			
		Терм 1.2	0.20	Терм 2.2	0.27	Терм 3.2	0.73			
		Терм 1.3	0.00	Терм 2.3	0.93	Терм 3.3	0.00			
1	1.1	Терм 1.1		Терм 2.2		Терм 3.2		0.27	0.27	Выбор Преце- дент № 1
		1.00		0.27		0.73				
	1.2	Терм 1.2		Терм 2.3		Терм 3.2		0.20		
		0.20		0.93		0.73				
2	2.1	Терм 1.3		Терм 2.1		Терм 3.1		0.00	0.20	Преце- це- дент №2
		0.00		0.00		0.47				
	2.2	Терм 1.2		Терм 2.2		Терм 3.1		0.20		
		0.20		0.27		0.47				

После окончания работы САПР-прецедент Проектировщик передаёт:

Заказчику А – решение задачи Z, эффективное в условиях, которые Заказчик описал оцифрованным СВ, переданным Проектировщику;

Заказчику Б – компьютерный блок «Решение задачи Z по прецеденту», инструкцию по решению задачи Z в задаваемых Заказчиком условиях;

Заказчику В – проектную документацию для компьютерной реализации названного блока, способного работать в БЗ компьютерной интеллектуальной системы Заказчика, в составе:

- таблицы уникальных названий Заказчика;
- конструктивного описания способов решения задачи Z;
- ЭкМЗ, настроенной на задачу Z (см. таблицу 4);
- ПрМЗ (см. таблицу 4) с её ансамблями ФП НМ (см. рисунки 5–7) и процедурами построения НМ прецедентов;
- результатов испытаний в САПР-прецедент блока «Решение задачи Z по прецеденту».

Предметно независимая САПР-прецедент позволяет Проектировщику [11]:

- совместно с Заказчиком настроить САПР-прецедент на его задачу Z;
- запустить автоматическое решение задачи Z Заказчика для любых условий, получая решение задачи Z в форме «Прецедент - Описывающее его НМ»;
- ввести в САПР-прецедент СВ, описывающий условия задачи Z, и получить её решение в форме вектора приоритетов прецедентов.

5 Обсуждение

Создание настраиваемой предметно независимой автоматической системы решения задачи Z по прецеденту позволяет (как и в [12]) обеспечить междисциплинарную кооперацию Заказчиков, решателей аналогичных задач, математиков, программистов.

САПР-прецедент находится в эксплуатации, и конкурентные ей компьютерные системы найдены только в медицине. Сопоставление этих систем представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Сопоставление созданных компьютерных систем решения задач по прецеденту

Практически использованные Заказчиками компьютерные системы решения задач по прецеденту		
№	САПР-прецедент	Системы поддержки врачебных решений [3, 13]
1	<i>Настройка системы на задачу Z Заказчика без смены программного кода системы</i>	
	Есть	Нет
2	<i>Настроена на задачу Z Заказчика</i>	
	Настроена в диалоге с САПР-прецедент Проектировщиком и Заказчиком [11]	Создана под задачу Z Заказчика [13]
3	<i>Типы Заказчиков, на которых ориентированы системы</i>	
	А, Б, В.	Б (лечащие врачи)
4	<i>Индивидуальное использование системы на компьютере Заказчика</i>	
	Предусмотрено	Не предусмотрено
5	<i>Встраивание спроектированного блока «Решение задачи Z по прецеденту» в компьютерные системы Заказчика</i>	
	Обеспечено созданной в системе проектной документацией и результатами испытаний блока «Решение задачи Z по прецеденту»	Не обеспечено
6	<i>Автоматизированное испытание базы знаний системы</i>	
	Обеспечено	Не предусмотрено
7	<i>Упорядочен поиск аналогичных задач для задачи Z Заказчика</i>	
	Нет	Работа проводится с цифровыми медицинскими картами пациентов [13]

САПР-прецедент может автоматически решать по прецеденту любые задачи Z , для которых Заказчик нашёл необходимое количество аналогичных задач. Например, в [14] перечисляются источники, где можно найти аналогичные задачи, однако оценка необходимого количества аналогичных задач в этой ПрО пока не проводилась. Трудно найти аналогичные задачи и оценить необходимое их количество для БЗ интеллектуальных систем «Умная ферма» [15]. В [16] ищется решение задач, применяя «рассуждения по прецедентам», рискуя получать ненадёжные решения.

Предлагаемый в статье способ решения задач Z для создания компьютерного блока «Решение задачи Z по прецеденту» применён в БЗ компьютерной интеллектуальной системы Заказчика В «Система интеллектуальной поддержки экипажа воздушного судна на завершающих фазах посадки» [17].

Заключение

Создана предметно независимая компьютерная САПР-прецедент, которая после её настройки на задачу Z и на её аналогичные задачи позволяет Заказчику быстро решать по прецеденту задачу Z .

САПР-прецедент, реализованная в программной среде *MS Excel* 2016, в диалоге с Проектировщиком и Заказчиком настраивается на конкретную задачу Z , для которой Заказчик нашёл аналогичные задачи с описанием способов их решения (прецеденты для задачи Z) и с условиями, в которых они решались. Настроенная на конкретную задачу Z Заказчика САПР-прецедент автоматически создаёт компьютерный блок «Решение задачи Z по прецеденту», который Проектировщик подвергает в САПР-прецедент испытаниям.

Выделенный из настроенной САПР-прецедент компьютерный блок «Решение задачи Z по прецеденту» передаётся Заказчику. Заказчик может самостоятельно получать решения задачи Z для конкретных условий.

Заказчик, который намерен использовать блок «Решение задачи Z по прецеденту» в БЗ своей компьютерной интеллектуальной системы, получает автоматически подготовленную в САПР-прецедент проектную документацию, позволяющую создать компьютерную реализацию этого блока, учитывающую особенности программной среды.

Список источников

- [1] **Рожкова М.А.** Судебный прецедент и судебная практика. В кн.: *Иски и судебные решения. Сборник статей*. М.: Статут. 2009. С.320-353. <https://rozhkova.com/pdf/SUDACT-2009.pdf>.
- [2] **Ротштейн А.П.** Медицинская диагностика на нечёткой логике. Винница: Континент-ПРИМ. 1996. 132 с.
- [3] **Прокопенко Н.Ю.** Системы поддержки принятия решений. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2017. 188 с.
- [4] **Вагин В.Н., Еремеев А.П.** Некоторые базовые принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. №6. С.114-123.
- [5] **Федунов Б.Е.** Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). М.: Де'Либри. 2018. 246 с.
- [6] **Коконцева С.Ю., Федунов Б.Е., Юневич Н.Д.** Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня на фазах посадки воздушного судна. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2025. №1. С.96-114. DOI: 10.31857/S0002338825010105.
- [7] **Норенков И.П.** Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 430 с.
- [8] **Болотова Л.С.** Системы и методы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. М.: Финансы и статистика. 2023. 666 с.
- [9] **Федунов Б.Е.** Решение задач по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем тактического уровня на этапах выполнения миссии подвижным объектом. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2023. №1. С.137–147. DOI: 10.31857/S0002338823010018.

- [10] **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир. 1976. 165 с.
- [11] **Федунов Б.Е., Юневич Н.Д., Сергеев В.О.** САПР-прецедент. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025697516 от 25 декабря 2025 г. Патентообладатель: ГосНИИАС.
- [12] **Грибова В.В., Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Тимченко В.А.** Ансамбль онтологической поддержки лазерных аддитивных технологических процессов. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.279-300. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.
- [13] **Moja L., Kwag K.H., Lytras T., Bertizzolo L., Brandt L., Pecoraro V., Rigon G., Vaona A., Ruggiero F., Mangia M., Iorio A., Kunnamo I., Bonovas S.** Effectiveness of computerized decision support systems linked to electronic health records: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Public Health*. 2014. Vol.104, no.12. P.e12–22. DOI: 10.2105/ajph.2014.302164.
- [14] **Иванов И.Г.** Поддержка принятия решений в процессе испытаний перспективных космических средств на основе прецедентов. *Вопросы электромеханики*. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т.175. №2. С.51-56
- [15] **Глухих И.Н., Прохошин А.С., Глухих Д.И.** Сравнение и отбор ситуаций в системах вывода решений на прецедентах для «умной» фермы. *Информатика и автоматизация*. 2023. Т.4. №22. С.853-879. DOI: 10.15622/ia.22.4.6.
- [16] **Кочкин Г., Кочкина В., Шуршев В.** Модель системы поддержки принятия решений на основе рассуждений по прецедентам. *Вестник Астраханского государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2013. №2. С.175-183.
- [17] **Федунов Б.Е., Юневич Н.Д., Коконцева С.Ю., Безмен М.П., Еремин А.И., Аспидова А.М.** Система интеллектуальной поддержки экипажа воздушного судна на завершающих фазах посадки при возникновении внешних угроз. *Патент на изобретение №2845717* Роспатента. Патентообладатель: ГосНИИАС. Приоритет изобретения 18.06.24.

Сведения об авторах

Федунов Борис Евгеньевич, 1936 г. рождения. Окончил Московский авиационный институт им. Серго Орджоникидзе (1960), Московский государственный университет (1965). д.т.н. (1990), профессор (1994). В списке научных трудов более 200 работ в области систем управления и бортовых интеллектуальных систем тактического уровня. Author ID (РИНЦ): 657687740. ORCID: 0009-009-3569-3111. boris_fed2@rambler.ru ✉.



Сергеев Владимир Олегович, 1988 г. рождения. Окончил Орловский государственный университет (2011), к.ф.-м.н. (2015). В списке научных трудов 5 работ. Научные интересы: интеллектуальная поддержка экипажа летательного аппарата. Author ORCID: 0009-0009-1627-6929. Инженер-программист АО "Раменское приборостроительное конструкторское бюро". VSergeev@rpkb.ru.

Поступила в редакцию 15.01.2026, после рецензирования 07.07.2026. Принята к публикации 20.07.2026.



Automated precedent-based problem solving

© 2026, B.E. Fedunov¹, V.O. Sergeev²

¹ State Research Institute of Aviation Systems (GosNIAS), Moscow, Russia.

² Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, Ramenskoye, Moscow Region, Russia.

Abstract

Many problems are solved using precedents. This article examines an approach to precedent-based problem solving using a configurable, domain-independent computer system. The customer provides information about the problem to be solved and about similar problems identified for it. In an interactive mode, this information is entered into an experimental knowledge matrix stored in the system knowledge base. Once configured for the customer's problem, the system automatically constructs a fuzzy-set representation of each precedent and designs a computer module entitled "Precedent-Based Problem Solving," which can operate autonomously and provide solutions under all specified conditions. To solve a specific problem, the input data are supplied to this module, which generates a precedent priority vector using membership functions. The intelligent system presented in this article automatically generates design documentation for the development of the "Precedent-Based Problem Solving" computer module in the customer's knowledge base. Examples of precedent-based problem solving are provided to demonstrate the operability of the proposed system.

Keywords: precedent, customer, designer, knowledge matrix, fuzzy sets, precedent priority vector, decision-making.

For citation: Fedunov B.E., Sergeev V.O. Automated precedent-based problem solving [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(3): 415-427. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-415-427.

Contribution of the authors: Fedunov B.E. – development of the article structure and selection of sources; Sergeev V.O. – development of the procedure for the automatic construction of membership functions.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Interaction among the Designer, the Customer, and the CAD-precedent

Figure 2 – Interactive configuration of the CAD-precedent for the domain of problem Z and its analogous problems

Figure 3 – Dialogues with the CAD-precedent system for documenting the customer's unique names and the solution methods for problem Z

Figure 4 – Stages of solving problem Z: presentation of precedents using fuzzy sets

Figure 5 – Family of membership functions (MFs) for the fuzzy sets (FSs) corresponding to the terms of LV1, defined over universe of discourse UD1

Figure 6 – Family of membership functions (MFs) for the fuzzy sets (FSs) corresponding to the terms of LV2, defined over universe of discourse UD2

Figure 7 – Family of membership functions (MFs) for the fuzzy sets (FSs) corresponding to the terms of LV3, defined over universe of discourse UD3

Table 1 – Coordinates X1, X2, and X3 of the situation vector and their representation by linguistic variables (LVs)

Table 2 – Range and units of the universe of discourse (UD) for each coordinate of the situation vector (SV)

Table 3 – Number of precedents and number of rows in each precedent block

Table 4 – Experimental knowledge matrix (EKM) configured for problem Z.

Table 5 – Unique names of the EKM elements for problem Z

Table 6 – Procedural knowledge matrix for problem Z with the resulting fuzzy sets representing the precedents

Table 7 – Ranges of the universes of discourse of the linguistic variables of the situation vector (SV)

Table 8 – Example of a generated procedural knowledge matrix (PKM) for SV(X1, X2, X3) = (4.00, 15.00, 2000.00)

Table 9 – Comparison of the developed computer systems for precedent-based problem solving

References

- [1] **Rozhkova MA.** Judicial precedent and judicial practice [In Russian]. *Lawsuits and judicial. Collection of articles.* Moscow. Statute. 2009. S.3020 -353 <https://rozhkova.com/pdf/SUDACT-2009.pdf>.
- [2] **Rothstein AP.** Medical diagnostics on fuzzy logic [In Russian]. Vinnitsa, APPROX. 1996. 132 p.
- [3] **Prokopenko NYu.** Decision support systems. Tutorial [In Russian]. Nizhny Novgorod. 2017. 188 p.
- [4] **Vagin VN, Ereemeev AP.** Some basic principles of building intelligent systems for supporting real-time decision-making [In Russian]. *Rev. RAS. TSU.* 2001; 6: 114-123.
- [5] **Fedunov BE.** Onboard tactical level intelligent systems for anthropocentric objects (examples for manned aircraft) [In Russian]. Moscow, ed. De Libry. 2018. 246 pp.
- [6] **Kokontseva SYu, Fedunov BE, Yunevich ND.** Tactical-level onboard intelligent systems during the phases of aircraft landing [In Russian]. *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems.* 2025; 1: 96 - 114. DOI: 10.31857/S0002338825010105.
- [7] **Norenkov IP.** Fundamentals of computer-aided design [In Russian]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman. 2009. 430 p.
- [8] **Bolotova LS.** Artificial intelligence systems and methods: knowledge-based models and technologies [In Russian]. Moscow: Finance and Statistics. 2012. 666 p.
- [9] **Fedunov BE.** Solution of problems according to precedent in knowledge bases of tactical onboard intelligent systems during the mission phases of a moving object [In Russian]. *Izv. RAS. TSU.* 2023; 1: 137–147. DOI: 10.31857/S0002338823010018.
- [10] **Zade L.** The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision-making [In Russian]. Moscow: World., 1976. 165 p.
- [11] **Fedunov BE, Yunevich ND, Sergeev VO.** CAD-Precedent. Certificate of State Registration of Computer Software No. 2025697516 dated December 25, 2025. Right holder: GosNIIAS.
- [12] **Gribova VV, Kulchin YuN, Nikitin AI, Timchenko VA.** Ensemble of ontological support of laser additive technological processes [In Russian]. *Ontology of designing.* 2024; 14(2): 279-300. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.
- [13] **Moja L, Kwag KH, Lytras T, Bertizzolo L, Brandt L, Pecoraro V, Rigon G, Vaona A, Ruggiero F, Mangia M, Iorio A, Kunnamo I, Bonovas S.** Effectiveness of computerized decision support systems linked to electronic health records: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Public Health.* 2014; 104(12): e12–22. DOI:10.2105/ajph.2014.302164.
- [14] **Ivanov IG.** Support of decision-making during tests of perspective space areas based on precedents [In Russian]. *Issues of Electromechanics.* Proceedings of VNIIE. 2020; 175(2): 51-56.
- [15] **Glukhikh IN, Prokhoshin AS, Glukhikh DI.** Comparison and selection of situations in decision-making systems based on precedents for a «smart» farm [In Russian]. *Informatics and Automation.* 22(4),8S. 2023. P.853-879.
- [16] **Kochkin G, Kochkina V, Shurshev V.** Model of case-based reasoning decision-making support system [In Russian]. *Bulletin of Astrakhan State University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics.* 2013; 2: 175-183.
- [17] **Fedunov B.E., Yunevich N.D., Kokontseva S.Yu., Bezmen M.P., Eremin A.I., Aspidova A.M.** Intelligent Support System for an Aircraft Crew during the Final Phases of Landing under External Threats. Patent for Invention No. 2845717, Rospatent. Patent holder: GosNIIAS. Priority date: June 18, 2024.

About the authors

Boris Evgenievich Fedunov (b. 1936) graduated from the Sergo Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (1960) and Moscow State University (1965). Doctor of Technical Sciences (1990), Professor (1994). The list of scientific papers includes more than 200 works in the field of control systems and onboard intelligent systems of the tactical level. Author ID (РИНЦ): 657687740 ID (Scopus): Researcher ID (WoS): Author: ORCID 0009-009-3569-3111. boris_fed2@rambler.ru ✉.

Vladimir Olegovich Sergeev (b. 1988) graduated from Orel State University (2011), Candidate of Physical and Mathematical Sciences (2015). He is the author of five scientific publications. His research interests include intelligent support systems for aircraft crews. Author ORCID: 0009-0009-1627-6929. Software Engineer at JSC Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau. VSergeev@rpkb.ru.

Received January 15, 2026. Revised July 07, 2026. Accepted July 20, 2026.



Онтологическое моделирование архитектуры информационной управляющей системы

© 2026, И.Т. Кимяев

ООО «Норникель Спутник», Москва, Россия

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Исследуются методологические подходы к обеспечению жизнеспособности объектов хозяйственной деятельности посредством поддержания соответствия архитектуры информационной управляющей системы решаемым производственным задачам управления. В предлагаемом подходе осуществляется синтез управленческих решений по реконфигурации информационной управляющей системы с целью компенсации воздействий внешней и внутренней среды в условиях неопределённости. Синтезированный механизм принятия решений позволит сформировать архитектуру информационной управляющей системы, которая будет способна обрабатывать существующие информационные потоки объектов хозяйственной деятельности и поддерживать их в жизнеспособном состоянии. Для формального описания семантических связей между концептами использованы принятые нотации онтологического моделирования, для оценки количественных характеристик выявленных связей использованы знания экспертов о конкретной предметной области.

Ключевые слова: принятие решений, информационная управляющая система, онтологическое моделирование, нечётко-возможностный подход, жизнеспособность.

Цитирование: Кимяев И.Т. Онтологическое моделирование архитектуры информационной управляющей системы. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.428-437. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-428-437.

Финансирование: работа поддержана Государственным заданием на 2025 г. № FFZF-2025-0020 Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра РАН (СПб ФИЦ РАН).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Обеспечение жизнеспособности (ЖС) объектов хозяйственной деятельности (ОХД) на протяжении их жизненного цикла (ЖЦ) базируется на принципе системного гомеостаза, достигаемого за счёт мониторинга производственно-технологических индикаторов и поддержания их значений в установленных пределах. Решение оперативных задач включает целенаправленную реконфигурацию бизнес-процессов и технологических цепочек, а также архитектуры информационно-управляющей системы (ИУС) ОХД. Целью реконфигурации является формирование планов по приобретению, эксплуатации и выводу из эксплуатации материальных и нематериальных активов ОХД, управление которыми обеспечивает ИУС.

Реконфигурация архитектуры ИУС и её приведение к целевому многоструктурному макросостоянию (ММС) активируется как с заданной периодичностью, так и в режиме реагирования на воздействия внешней или внутренней среды. К внешним воздействиям относятся рыночный спрос, динамика стоимости ресурсов, климатические и погодные изменения и др.; к внутренним – доступность квалифицированного персонала, износ оборудования и др. Указанные воздействия на различных этапах ЖЦ ОХД порождают неопределённости при выборе целевого ММС ИУС, которые могут быть формализованы в вероятностной, субъективно-вероятной и/или возможностной формах. Задача выбора рационального ММС для

ИУС носит многофакторный и многокритериальный характер. Её формализация и решение могут создать условия для поддержания ЖС ОХД в течение длительного времени.

В настоящем исследовании предлагается модельно-алгоритмическое обеспечение (МАО), предназначенное для решения задачи выбора архитектуры ИУС и соответствующего типа управления. Методическая база предлагаемого МАО основана на применении онтологических моделей и экспертных знаний, формализуемых средствами нечётко-возможностного подхода (НВП).

1 Подход к синтезу архитектуры информационно-управляющей системы

В [1, 2] показано, что для решения задачи многокритериального выбора используются специализированные виды МАО, включающие модели и методы проактивного управления структурной динамикой (СД), онтологического моделирования, линейного и нелинейного программирования, имитационно-статистического и нечётко-возможностного анализа и др.

В [3] обосновано, что поддержание разнообразия ИУС осуществляется посредством проактивного управления её СД. Представленная онтология (см. рисунок 1) описывает гетерогенную многоструктурную предметную область (ПрО), в которой концепты интегрированы в единое пространство, включающее комплекс «ОХД ↔ ИУС».

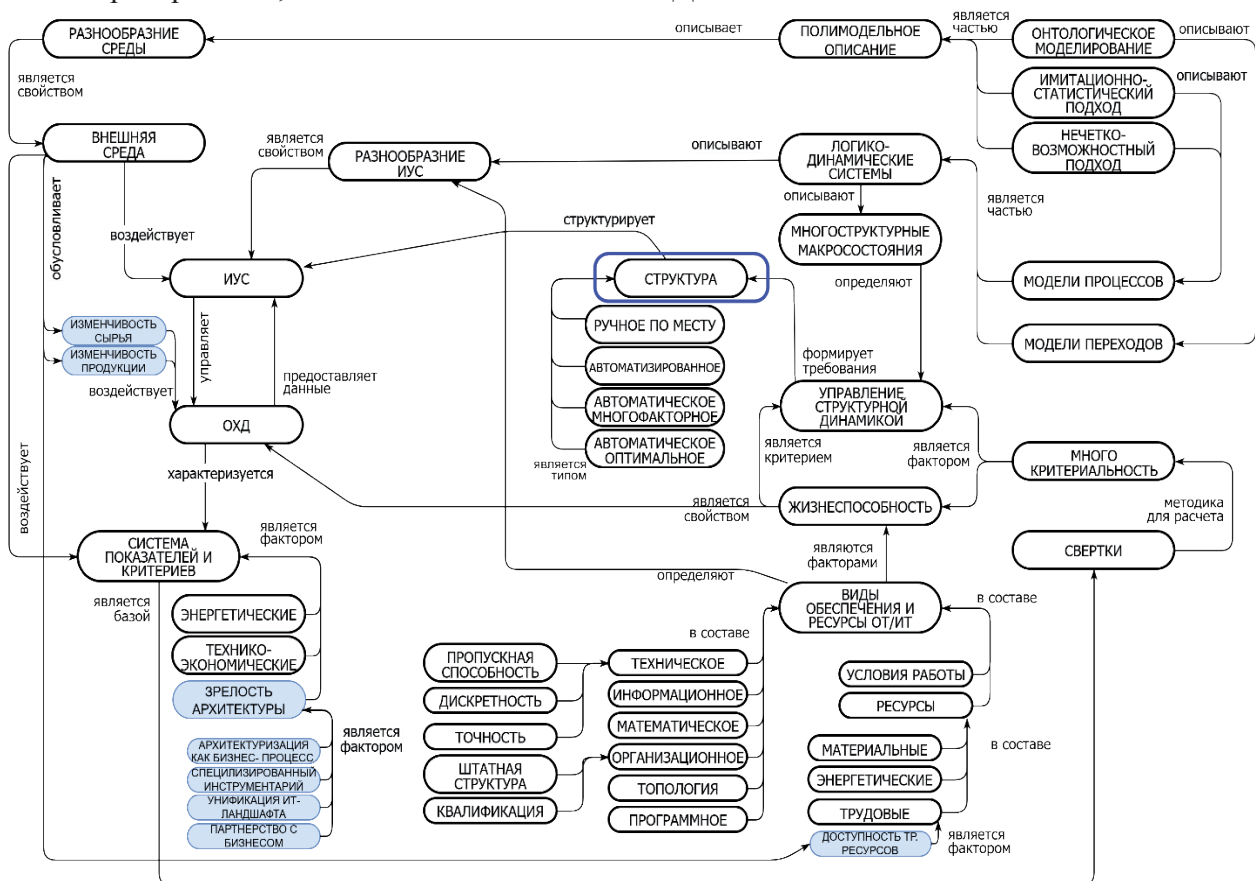


Рисунок 1 – Онтология синтеза целевой архитектуры информационно-управляющей системы

На схеме показано, с помощью каких технологий формализации взаимодействия компонентов исследуемой ПрО может быть реализована СД архитектуры ИУС: полимодельное описание; свёрточные методы для многокритериального выбора; нечётко-возможностное моделирование; логико-динамическое управление ММС и др.

Концепт «Структура» ИУС ОХД формируется путём комбинации стандартизированных видов обеспечения (ВО): технического (ТО), информационного (ИО), математического (МО), программного (ПО), организационного (ОО), а также информационно-технологических, материальных, энергетических и др. ресурсов. Каждый тип ВО и ресурсов имеет количественные и качественные характеристики, а также ограничения. Например, доступность в конкретный момент времени, требование к совместимости и гармонизации различных ВО, наличие соответствующего ПО и МО, специалистов высокой квалификации и др.

Путём комбинирования компонентов ВО и ресурсов (по количеству, качеству и взаимосвязям) можно синтезировать архитектуру ИУС под различные условия задачи.

Исходная концептуальная модель [3] и другие модели поддержания ЖС [4] носят обобщённый характер. В модель на рисунке 1 включены дополнительные факторы (выделены сплошной заливкой). Предложенная модель является основой для формирования специализированного МАО, предназначенного для синтеза рациональной архитектуры ИУС.

Оценка сложности архитектуры ИУС не имеет общепринятого подхода, и специализированные отраслевые структуры используют МАО, приемлемое в конкретной ПрО [5–7].

Разрабатываемое МАО, наряду с онтологическим моделированием, включает применение методов формализации экспертных знаний – нечётко-возможностных процедур (НВП) для количественной оценки взаимосвязей между концептами рассматриваемой ПрО.

2 Характеристики архитектуры информационно-управляющей системы

Управление сложными ОХД может быть представлено следующими типами [8, 9]:

- *Автоматическое оптимальное* (АОп). Формируется высший уровень технологической сложности и качественного разнообразия, базовая архитектура – на принципах глобальной динамической оптимизации (ГДО), охватываются уровни иерархии $L1-L3$, реализуется мультимодельный подход. Обеспечивается многокритериальная оптимизация работы связанных объектов управления (ОУ) в пределах единого технологического подразделения (передела);
- *Автоматическое многофакторное* (АМф). Предполагается гибридное взаимодействие, где уровни ($L1-L2+$) подчинены решению задач старшей системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП), используются многофакторные регуляторы для поддержания ОУ в режимах, экстремальных по выбранному технико-экономическому критерию. Управление на более высоких уровнях, $L3$ и выше, делегируется лицу, принимающему решения (ЛПР).
- *Автоматизированное* (Авз). Базируется на функциональности типовых автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Охватывает уровни $L1-L2$. Основная функция – предоставление ЛПР инструментов для стабилизации локальных параметров ОУ в заданных диапазонах.
- *Ручное по месту* (РпМ). Предусматривается эксплуатация базовых информационно-измерительных комплексов ЛПР. Охватываются уровни не выше $L2$. Стратегия управления ориентирована на максимальную робастность системы: работа осуществляется с существенным запасом устойчивости за счёт удаления от предкритических границ эффективности.

Каждое из представленных типов управления ИУС описывается набором структур $G \in \{G_\chi \mid \chi \in X\}$, где χ – индекс, характеризующий тип структуры ИУС; $X = \{\text{Топ, Фун, ИО, МО, ПО, ТО, ОО}\}$ – множество индексов, соответствующих топологической (Топ), функциональной (Фун) структурам, а также структурам ВО.

Следуя работам [2,10], ММС ИУС можно задать соотношением: $S_\delta \subseteq X_{\text{Топ}} \times X_{\text{Фун}} \times X_{\text{ИО}} \times X_{\text{МО}} \times X_{\text{ПО}} \times X_{\text{ТО}}, \delta = 1, \dots, k_\Delta$, где $X_\chi = \{x_{(\chi,l)}, l \in L_\chi\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры G_χ ; k_Δ – количество вариантов точек формирования множества S_δ ; Δ – интервал дискретизации на множестве моментов времени T . Синтез структуры ИУС может быть рассмотрен как задача управления её СД, которая сводится к поиску ММС $S_\delta^* \in \{S_1, S_2, \dots, S_{k_\Delta}\}$, обеспечивающего переход структуры ИУС из существующего ММС в целевое, необходимое для достижения требуемого уровня обобщённого показателя ЖС ОХД [2].

Условия перехода от одной технологии управления, описываемой MMC S_δ , к целевой S_δ^* , должны формироваться в интерактивном режиме с учётом воздействий среды на ОХД и ИУС. Данный переход включает изменение количественного и качественного состава ВО ИУС, изменение типов автоматизации иерархических слоёв управления $L1...L3$, а также доли участия ЛПР в принятии управленческих решений.

В настоящее время отсутствует формальное описание MAO для выбора целевого MMC ИУС с учётом множества критериев и показателей. Для решения данной задачи могут быть использованы знания экспертов в исследуемой ПрО.

3 Модель оценки архитектуры информационно-управляющей системы

Для задач онтологического моделирования ПрО распространены MAO и программно-технические инструменты на базе формальных методик дескриптивной логики (ДЛ) [9]. Данный подход обладает ограничениями выразительности, в частности, ДЛ затрудняет представление количественных характеристик семантических связей между классами сущностей. Это препятствует применению таких моделей при решении задач, требующих метрического описания выявленных отношений. К таким задачам относится, в частности, моделирование логики принятия решений о целевой MMC S_δ^* для ИУС. Для преодоления описанных ограничений целесообразно использовать знаний экспертов в исследуемой ПрО [11].

Таблица 1 содержит описание факторного пространства (ФП) на основе лингвистических переменных (ЛП) для синтеза модели выбора целевой структуры ИУС. Для обозначения уровней градации вербальных ЛП приняты сокращения: Н – нижний; НС – ниже среднего; С – средний; ВС – выше среднего; В – высокий.

Таблица 1 – Лингвистические переменные факторного пространства для выбора целевой структуры информационно-управляющей системы

Описание переменной в составе факторного пространства	ЛП в лингвистическом, графическом, натуральном и кодированном видах				
X_1 – Изменчивость сырья, относительные единицы (отн. ед). Отражает условный уровень качественных отличий постав- ляемого сырья и промышленных продуктов, при которых требуется оперативная адаптация технологических режимов	Н		С		В
	0,3		0,5		0,7
	-1		0		1
X_2 – Изменчивость продукции, отн.ед. Отражает условный уровень качественных отличий номен- клатуры готовой продукции, при которых требуется опера- тивная адаптация технологических режимов	Н		С		В
	0,3		0,5		0,7
	-1		0		1
X_3 – Доступность трудовых ресурсов, отн.ед. Уровень условной доступности персонала с квалификацией, необходимой для решения актуальных и перспективных за- дач автоматизации	Н		С		В
	0,3		0,5		0,7
	-1		0		1
X_4 – Зрелость корпоративной архитектуры, отн.ед. Уровень условной зрелости организационных процессов и инфраструктуры для решения задач управления сложным производством	Н		С		В
	0,3		0,5		0,7
	-1		0		1
Y – Структура ИУС, уровень L по ANSI/ISA-95.00.01-2010. Целевой максимальный уровень иерархии ИУС по [8]. Кос- венно отражает необходимый уровень качественного разно- образия для управления ОХД	Н	НС	С	BC	В
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

В таблице 1 ЛП задана множеством значений $Y = \{1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5\}$, элементы которого упорядочены в порядке, предписанном в [8]. Термы ЛП имеют дробные значения, интервалы между соседними значениями неодинаковы и не поддаются вероятностно-

количественному измерению, что позволяет отнести используемую шкалу к порядковому типу [12]. В практике сложилось устойчивое ранжирование уровней сложности структур ИУС, которое включает дробные промежуточные ступени (не предусмотренные [8]), отражающие уровень сложности решаемых задач управления, а также сопоставление данным задачам целевых ММС. Например, уровню 1,5 соответствует ММС РпМ, уровню 2 – Авз, уровню 2,5 – АМф, уровню 3 – АОп, уровню 3,5 – управление АОп+¹. Перечисленные уровни ранжирования ЛП Y в практике не имеют формальных количественных границ и точек разрыва, могут быть оценены субъективно-вероятностным способом [13, 14] и отображены на нечёткой шкале. В рассматриваемом примере для ЛП Y можно допустить условную количественную интерпретацию, несмотря на ограничения, характерные для операций сложения и умножения со шкалами порядкового типа. Таблица 2 содержит термины ЛП ФП, области изменений каждой ЛП, которые сложились в практике крупных производственных ОХД.

Таблица 2 – Термы лингвистических переменных

Факторы Лингв. значение	X_1	X_2	X_3	X_4
В	Состав сырья в течение смены (суток) изменчив (несколько раз)	Номенклатура продукции в течение декады (месяца) изменчива (регулярно)	Трудовые ресурсы (ТР) для поддержки сложных ИУС целенаправленно готовятся и набираются	Базовый $L1-L2$, интеграция со сформированным $L3$, ЛПР управляет по моделям
С	Состав сырья в течение смены (суток) изменчив (нечасто и незначительно)	Номенклатура продукции в течение декады (месяца) изменчива (нечасто и незначительно)	ТР для поддержки сложных ИУС доступны, запрос на целевую подготовку и набор отсутствуют	Базовый $L1-L2$, ЛПР управляет удалённо, $L3$ сформирован
Н	Состав сырья стабилен в течение смены (суток), изменения редки	Номенклатура продукции в течение декады (месяца) стабильна (изменения редки)	ТР для поддержки сложных ИУС уникальны. Набор специалистов только по базовым специальностям	Базовый $L1-L2$, ЛПР управляет по месту и удалённо, ведётся формирование $L3$

Согласно [11], на основе представленного ФП создаётся опросная матрица (таблица 3), строки которой представляют собой нечёткие производственные правила, отражающие состояние каждой из учитываемых в примере ЛП в кодированном виде.

Таблица 3 – Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта и расчётными значениями по модели

Факторы № пп	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_B	Y_3	Y_M
1	-1	-1	-1	-1	НС	2	1,9
2	+1	-1	-1	-1	С	2,5	2,6
...	...	...	...	...	...	...	...
14	+1	-1	+1	+1	В	3,5	3,6
15	-1	+1	+1	+1	ВС	3,0	3,1
16	+1	+1	+1	+1	В	3,5	3,4

Совокупность данных характеристик оценивается экспертом и вербально отражается в виде Y_B . Перевод в числовой вид выполняется согласно представленному ФП из ЛП (таблица 1) и представляется в виде Y_3 . Полученные численные значения Y_3 обрабатываются по методикам планирования экспериментов с получением аналитической полиномиальной зависимости Y :

¹ К данному типу можно отнести системы, получающие задания напрямую из корпоративных ERP-систем.

$$Y = 2,81 + 0,25x_1 + 0,06x_2 + 0,19x_3 + 0,38x_4 + 0,13x_1x_2 - 0,13x_1x_3 - 0,06x_1x_4 - 0,06x_2x_3 - 0,06x_1x_2x_4 + 0,06x_1x_3x_4 - 0,13x_2x_3x_4. \quad (1)$$

В полиноме (1) значимость коэффициентов оценена пороговым значением, величина которого определена по минимуму остаточного среднеквадратического отклонения $s_{\text{ост}} = 0,013$. Данное отклонение сравнивается с исходной нечёткостью экспертной информации о переменной Y , равной половине разности между двумя последовательными модами термов $s_3 = 0,05$. Выполнение неравенства $s_{\text{ост}} < s_3$ позволяет говорить о приемлемой точности вычислений по модели (1) (не ниже исходной нечёткости).

Сравнение числовых значений $Y_Э$ и Y_M представлено на рисунке 2. Корреляция между ними составила $R_x = 0,98$, что показывает соответствие расчётной модели (1) экспертным знаниям.

Наличие в модели (1) статистически значимых нелинейных членов, описывающих парные (x_1x_2 , x_1x_3 и пр.) и тройные ($x_1x_2x_3$ и пр.) взаимодействия, свидетельствует о том, что наблюдается перекрытие зон влияния переменных, которое может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на итоговую оценку целевого типа структуры ИУС. Например, это означает, что синтезируемая ИУС должна учитывать и иметь способность отрабатывать изменения как по входному сырью, так и выбору готовой продукции.

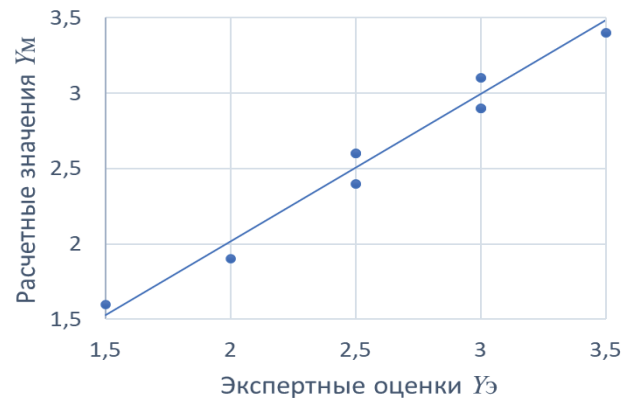


Рисунок 2 – Оценка корреляции значений Y , полученных от эксперта, и рассчитанных по модели (1)

Анализ чувствительности синтезированной модели к взаимодействиям факторов третьего порядка показал, что значимые коэффициенты при соответствующих членах имеют разные знаки. Это подтверждает сложный характер влияния переменных ФП, который необходимо учитывать эксперту. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в данной ПрО высокая неопределённость среды, вызванная совместным воздействием трёх и более факторов, может приводить как к снижению, так и к росту сложности архитектуры ИУС.

4 Алгоритм выбора архитектуры информационно-управляющей системы

Для оценки адекватности полинома (1) выполнено сравнение рассчитанных значений Y_M с реальными запросами Организации, которая оценивает текущее состояние ИУС и среды, а также планирует её модернизацию. Разработан алгоритм, отражающий основные этапы выбора целевой структуры модернизируемой ИУС (рисунок 3).

В таблице 4 представлены сравнительные данные по целям, задачам и предпосылкам модернизации существующей ИУС для промышленного ОХД, а также оценки расчётных значений Y_M и её типа. Полученные значения Y_M приведены к базовому диапазону $Y = \{1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5\}$ по правилам округления. Сравнительным анализом установлено, что описание целей и задач модернизации ИУС соответствует типу её расчётной по (1) структуры в трёх случаях. В варианте №3 выявленное несоответствие обусловлено тем, что при постановке задачи модернизации со стороны Организации были приняты «повышенные обязательства», достижение которых невозможно при заявленных предпосылках. Экспертные оценки предпосылок к выбору целевого ММС зачастую выходят за границы диапазонов,

принятых на этапе синтеза полинома (Таблица 1). Это подчёркивает высокие прогностические способности модели (1).

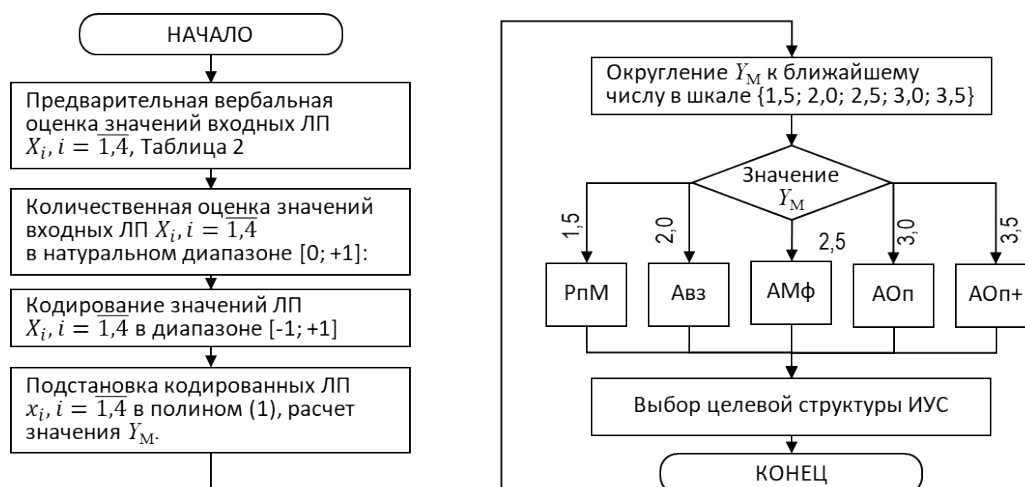


Рисунок 3 – Алгоритм выбора целевой структуры информационно-управляющей системы

Таблица 4 – Сравнительная оценка расчётных значений целевых структур информационно-управляющей системы

№ пп	Описание целей и задач модернизации ИУС	Предпосылки, экспертная оценка, ед.отн.				Структура расчётная		Соответствие
		X_1	X_2	X_3	X_4	Y_M	Тип	
1	Организацию устраивает качество управления на уровне $L2$, цель модернизировать АСУТП отсутствует, незначительные изменения вносятся силами местных специалистов	0,1	0,1	0,2	0,3	2,0	Авз	да
2	Организацию не устраивает ручное качество управления на уровне $L2$, планируется создание более сложной управляющей «надстройки» типа СУУТП ($L2+$)	0,9	0,1	0,6	0,3	2,5	АМф	да
3	Организацию не устраивает ручное качество управления на уровне $L2$, планируется создание более сложной управляющей «надстройки», позволяющей автоматически вести технологический процесс по бизнес-критерию ($L3+$)	0,8	0,1	0,8	0,3	2,5	АМф	нет
4	Организация комплексно повышает эффективность производства путём создания системы типа ГДО (уровень $L3$), позволяющей автоматически вести технологический процесс по бизнес-критерию	0,4	0,6	0,6	0,6	3,0	АОп	да

Заключение

Представлена модель, формализующая процесс синтеза ММС ИУС и включающая концепты, отражающие воздействие и характеристики внутренней и внешней среды. Отмечена необходимость расширения используемого МАО путём интеграции методик выявления знаний экспертов.

Для выбора целевого ММС ИУС предложено МАО, сочетающее онтологическое моделирование для представления априорной информации о ПрО в виде концептов и связей, и

НВП для количественной верификации неявных закономерностей. Работоспособность МАО показана на примере синтеза многофакторной аналитической полиномиальной модели.

Отмечена чувствительность разработанной модели (полинома) к изменению входных факторов, что важно для проактивного выбора целевого ММС. Чувствительность обеспечивается за счёт большого числа нелинейных членов в структуре модели.

Список источников

- [1] **Кимяев И.Т.** Онтологический нечётко-возможностный подход к созданию модели управления печью пиролиза. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №1. С.139–149. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-139-149.
- [2] **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами. *Труды СПИИРАН*. 2010. Т.15, №4. С.7–52.
- [3] **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Методология обеспечения жизнеспособности сложного объекта на основе управления его структурной динамикой. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2024. Т.25, №4. С.167–176. DOI: 10.17587/mau.25.167-176.
- [4] **Микони С.В., Соколов Б.В.** Жизнеспособность как обобщённая характеристика свойств технической системы. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.14–24. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-14-24.
- [5] **Monteban J.** Measuring Architectural Complexity: Quantifying Objective and Subjective Complexity in Enterprise Architecture: Master's Thesis. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2018. 123 p.
- [6] **Kimyaev I., Spesivtsev A., Spesivtsev V., Shilov N.** (2025). Contribution of Fuzzy-Possibility Approach to Assessing the Complexity Level of IT-Systems Design. In: Dassisti, M., Madani, K., Panetto, H. (eds) Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics. IN4PL 2024. Communications in Computer and Information Science, vol 2373. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-80775-6_18.
- [7] **Sanchez C.C., Capilla R., Staron M.** Estimating the complexity of architectural design decision networks. *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. V.8. P.168558–168575. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023608.
- [8] ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod). Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology.
- [9] ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016. Интеграция возможностей усовершенствованного управления технологическими процессами и оптимизации для производственных систем. Часть 1. Структура и функциональная модель. 2016.
- [10] **Павлов А.Н.** Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов. *Известия ВУЗов. Приборостроение*. 2012. Т.55(11). С.7-12 с.
- [11] **Игнатъев М.Б.** и др. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕЕСС, 2018. 501 с.
- [12] **Микони С.В.** О качестве онтологических моделей. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №3(25). С.347-360. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-347-360.
- [13] **Спесивцев А.В.** Нечётко-возможностный подход к формализации и использованию экспертных знаний для оценивания состояний сложных объектов. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т.63, №11. С.985–994. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994.
- [14] **Дайманд И.Н., Спесивцев А.В.** Семантические сети на базовой онтологии. *Сб. докладов. XVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2013*. Т.1. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. С. 76–81.

Сведения об авторе

Кимяев Игорь Тимофеевич, 1972 г. рождения. Окончил Норильский индустриальный институт в 1996 г., аспирантуру Московского института стали и сплавов (2001), к.т.н. Инженер-исследователь в области автоматизации технологических процессов и производств. В списке научных трудов более 40 работ в области управления сложными производственными объектами. ORCID: 0000-0002-5362-4445. AvtorID (Scopus):6506525736 igor95a@mail.ru.



Поступила в редакцию 30.04.2026, после рецензирования 9.07.2026. Принята к публикации 19.08.2026.



Ontology-based modeling of information and control system architecture

© 2026, I.T. Kimyaev

LLC NornickeL Sputnik, Moscow, Russia

Federal State Budgetary Institution of Science (SPC RAS), St. Petersburg, Russia

Abstract

This article explores methodological approaches to ensuring the viability of business entities by maintaining the alignment of information and control system architecture with the production management tasks being addressed. The proposed approach involves the synthesis of management decisions concerning the reconfiguration of the information and control system in order to compensate for external and internal environmental impacts under conditions of uncertainty. The synthesized decision-making mechanism will enable the development of an information and control system architecture capable of processing the existing information flows of business entities and maintaining their viability. Standard ontology modeling notations are used to formally describe the semantic relationships between concepts, while expert knowledge of a specific subject area is employed to assess the quantitative characteristics of the identified relationships.

Keywords: decision making, information and control system, ontology-based modeling, fuzzy-possibility approach, viability.

Citation: Kimyaev I.T. Ontology-based modeling of information and control system architecture [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(3): 428-437. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-428-437.

Financial Support: The work was supported by the State Assignment for 2025 No. FFZF-2025-0020 of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPb FRC RAS).

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

List of figures and tables

Figure 1 – Ontology for the synthesis of the target information and control system architecture

Figure 2 – Correlation assessment of the Y values obtained from an expert and those calculated using the model (1)

Figure 3 – Algorithm for selecting the target structure of the information and control system

Table 1 – Linguistic variables of the factor space for selecting the target structure of the information and control system

Table 2 – Terms of the linguistic variables

Table 3 – Fragment of the survey matrix with expert assessments and values calculated using the model

Table 4 – Comparative assessment of the calculated values for the target structures of the information and control system

References

- [1] **Kimyaev I.T.** Ontological fuzzy-possibility approach to creating a pyrolysis furnace control model [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 139-149. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-139-149.
- [2] **Sokolov BV, Yusupov RM.** Multiple model description and structure dynamics analysis of space-facilities control systems [In Russian]. *Proceedings of SPIIRAS*. 2010; 15(4): 7–52.
- [3] **Kimyaev I.T, Sokolov BV.** Methodology for ensuring the viability for a complex object based on controlling its structural dynamics [In Russian]. *Mechatronics, Automation, Control*. 2024; 25(4): 167–176. DOI: 10.17587/mau.25.167-176.
- [4] **Mikoni SV, Sokolov BV.** Viability as a generalized characteristic of the properties of a technical system [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(1): 14–24. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-14-24.
- [5] **Monteban J.** Measuring Architectural Complexity: Quantifying Objective and Subjective Complexity in Enterprise Architecture: Master's Thesis. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2018. 123 p.

-
- [6] **Kimyaev I, Spesivtsev A, Spesivtsev V, Shilov N.** Contribution of Fuzzy-Possibility Approach to Assessing the Complexity Level of IT-Systems Design. In: Dassisti, M., Madani, K., Panetto, H. (eds) Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics. IN4PL 2024. Communications in Computer and Information Science, 2025; 2373. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-80775-6_18.
 - [7] **Sanchez CC, Capilla R, Staron M.** Estimating the complexity of architectural design decision networks. *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020; 8: 168558–168575. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023608.
 - [8] ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod). Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology.
 - [9] GOST R ISO 15746-1-2016. Integration of advanced process control and optimization capabilities for manufacturing systems. Part 1. Framework and functional model. [In Russian]. 2016.
 - [10] **Pavlov AN.** Methodological foundations for solving the problem of planning structural and functional reconfiguration of complex objects [In Russian]. *News of Higher Education Institutions. Instrument Engineering*. 2012; 55(11): 7-12.
 - [11] **Ignatyev MB.** et al. Modeling of weakly formalized systems based on explicit and implicit expert knowledge [In Russian]. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2018. 501 p.
 - [12] **Mikoni SV.** On the quality of ontological models [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2017; 7(3): 347-360. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-347-360.
 - [13] **Spesivtsev AV.** Fuzzy-probabilistic approach to formalizing and using expert knowledge to evaluate complex objects states [In Russian]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2020; 63(11): 985–994. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994.
 - [14] **Daimand IN, Spesivtsev AV.** Semantic networks based on a foundational ontology [In Russian]. *Proceedings. XVI International Conference on Soft Computing and Measurements SCM-2013*. St. Petersburg: Publishing House of SPbGETU "LETI", 2013. Vol.1. P.76–81.
-

About the author

Igor Timofeevich Kimyaev, (b. 1972) graduated from Norilsk Industrial Institute (NII) in 1996 and completed his post-graduate studies at the Moscow Institute of Steel and Alloys in 2001. He holds a Candidate of Technical Sciences degree. He is a research engineer specializing in the automation of technological processes and production systems. His publication record includes more than 40 scientific works in the field of complex industrial system control. ORCID: 0000-0002-5362-4445. (Scopus):6506525736. igor95a@mail.ru.

Received April 30, 2026. Revised July 7, 2026. Accepted August 19, 2026.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.896

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-438-453



Использование цифровых двойников в обучении специалистов по обслуживанию нефтегазовых месторождений

© 2026, Е.К. Терешко ✉, М.Р. Малащенко, И.Н. Криони

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

Аннотация

Рассматривается использование цифровых двойников при обучении студентов и начинающих работников по обслуживанию нефтегазовых месторождений. Актуальность темы определяется возрастающими требованиями к промышленной безопасности и надёжности работы производственных объектов, что ограничивает возможности применения традиционных форм обучения, предполагающих непосредственное присутствие на площадке. В этих условиях возрастает роль цифровых технологий, позволяющих организовать обучение в виртуальной среде без прямого участия в технологических процессах. Особое внимание уделяется использованию цифровых тренажёров, формируемых на основе технологий цифрового моделирования. Такие решения могут позволить обеспечить безопасную отработку профессиональных навыков и расширить возможности подготовки специалистов в условиях действующего производства и в образовательных организациях. Отмечаются ограничения внедрения цифровых решений, связанные с высокой ресурсоёмкостью моделей, зависимостью от инфраструктуры передачи данных, необходимостью поддержания актуальности цифровых представлений объектов. Цель исследования состоит в формировании методики использования цифровых двойников в составе обучающей среды, основанной на применении онтологически управляемых сценариев. Анализируются способы создания цифровых тренажёров, включая использование трёхмерного моделирования и технологий лазерного сканирования; предлагается структура цифрового тренажёра как элемента образовательной инфраструктуры. Внедрение предложенного подхода может повысить качество практической подготовки персонала, снизить вероятность ошибок при выполнении технологических операций и создать условия для повышения уровня промышленной безопасности.

Ключевые слова: нефтегазовое месторождение, цифровой двойник, обучение специалистов, онтология, сценарное обучение, цифровой тренажёр.

Цитирование: Терешко Е.К., Малащенко М.Р., Криони И.Н. Использование цифровых двойников в обучении специалистов по обслуживанию нефтегазовых месторождений. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.438-453. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-438-453.

Вклад авторов: Терешко Е.К. – постановка задачи исследования, концепция, методология; Малащенко М.Р. – сбор и систематизация данных, анализ аналогов, визуализация данных; Криони И.Н. – разработка онтологической модели и интеграции «цифровой двойник–онтология–симулятор».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В нефтегазовой отрасли (НГО) повышаются требования к промышленной безопасности (ПБ) и надёжности эксплуатации на объектах нефтегазовых месторождений (НГМ) [1]. Большое количество сложного технологического оборудования и линейных коммуникаций, их пространственная насыщенность и потенциальная аварийность делают обучение с непосредственным доступом на площадку невозможным даже для действующих сотрудников

нефтегазодобывающих компаний [2]. Аналогичные ограничения существуют и в подготовке специалистов НГО в университетах, где студенты обучаются на лабораторных макетах и не имеют доступа к месторождениям [3, 4]. Внедрение цифровых тренажёров (ЦТ) на базе цифровых двойников (ЦД) в образовательные программы, как инструмента для виртуальной практики, поможет решить данную проблему [5].

Использование ЦД в обучении позволяет перенести практическую отработку навыков в контролируемую виртуальную среду, минимизируя риски для персонала и исключая необходимость вмешательства в производственный процесс. Применение ЦТ в университетах может позволить студентам осваивать сложные процессы без риска и затрат на выезды на объекты [6, 7]. Опыт внедрения подобных решений выявляет ряд существенных ограничений: высокая ресурсоёмкость трёхмерных (3D) моделей [8]; ограниченная автономность мобильных устройств при эксплуатации в сложных климатических условиях; зависимость от качества связи при использовании серверной архитектуры [9]; отсутствие единых стандартов хранения и обмена данными; поддержание актуальности цифровой модели в условиях модернизации оборудования [10].

Недостаточно разработаны основы системного использования ЦД в образовательном процессе. Научная проблема заключается в отсутствии методики интеграции ЦД в систему подготовки и повышения квалификации персонала. Практическая задача связана с необходимостью повышения эффективности обучения при сокращении производственных рисков, временных и организационных затрат.

Гипотеза исследования заключается в том, что системное использование актуализированного ЦД НГМ в ЦТ позволит повысить уровень практической подготовки работников, сократить количество ошибок при выполнении производственных операций и обеспечить дополнительный резерв повышения ПБ.

Цель исследования состоит в разработке методики использования ЦД НГМ для обучения персонала на основе онтологически управляемых сценариев.

1 Обзор литературы

Интерес к ЦД в промышленности связан с развитием сенсорных технологий, систем обработки больших данных и инструментов 3D моделирования [11]. ЦД определяется как динамическая информационная модель объекта, способная отражать его текущее состояние и поведение во времени. На начальном этапе ЦД рассматривались как средство анализа и оптимизации режимов работы оборудования. В настоящее время их применение расширилось и включает задачи организационного управления и подготовки персонала [12, 13].

Внедрение ЦД в машиностроении позволяет моделировать загрузку оборудования, выявлять «узкие места» и прогнозировать отказоустойчивость узлов. Такие модели используются как основа для создания учебных симуляторов операторов станков и автоматизированных комплексов [14]. В энергетической отрасли ЦД используются для мониторинга оборудования, ЦТ полезны для обучения действиям в аварийных ситуациях [15]. В строительстве базой для формирования ЦД служат BIM-модели, использование которых в образовательных целях обеспечивает наглядное представление о конструктивных элементах, формируя у обучающихся целостное понимание структуры и принципов функционирования объектов [16].

На НГМ ЦД используются для мониторинга эксплуатации [17]. На основе ЦД создаются цифровые обучающие платформы (ЦОП), которые позволяют моделировать технологические операции [18]. Среди разработанных программных комплексов можно выделить следующие: комплекс для установки первичной переработки нефти с 3D-моделями и моделирова-

нием ошибок¹, тренажёры по безопасности объектов добычи, транспортировки и переработки, охватывающие резервуарные парки, компрессорные станции и трубопроводы²; тренажёры кустовых площадок (КП)³ с математическими моделями и поддержкой виртуальной реальности (VR), позволяющие отрабатывать диагностику и аварийные ситуации. Каждый из этих комплексов имеет ограничения: узкую специализацию, высокую стоимость внедрения, требования к использованию мощного оборудования.

В университетах ЦОП и мобильные приложения используются для моделирования месторождений как часть смешанного обучения, дополняя традиционные лабораторные занятия и повышая мотивацию студентов [19, 20]. В сценариях обучения предусматриваются нормальные и аварийные режимы, которые невозможно выполнить на производстве. Мобильные приложения тренажёров способны генерировать индивидуальные задания, используются для подготовки к лабораторным работам и для самостоятельной работы [20].

ВМ-модель, как виртуальная копия НГМ, может стать основой для создания ЦОП [21]. Для использования в целях обучения необходима доработка моделей – допускается упростить геометрию и сократить количество объектов, выстроить уровни детализации [22]. Чтобы модель стала интерактивной, необходимы её интеграция со специализированными программными средами, настройка правил поведения отдельных элементов (например, указать свойства потоков углеводородов, параметры процессов запуска и останова оборудования и пр.) [16]. В результате ВМ-модель превратится в интерактивную среду, в которой можно разрабатывать сценарии для обучения.

Другой подход к созданию ЦТ предполагает использование пространственных данных, полученных путём лазерного сканирования реального объекта, в результате которого формируется массив пространственных данных, содержащий координаты большого количества точек, и позволяющий получить детализированное представление геометрии объекта [23]. Требуется дополнительная обработка данных – преобразование геометрии объектов и оптимизация количества элементов. Разработанная модель интегрируется в программные платформы виртуальной или дополненной реальности [24]. Использование технологий сканирования позволяет создавать цифровые копии реальных объектов с высокой степенью достоверности.

Проведённый обзор позволяет сделать вывод о наличии трудностей при внедрении ЦД как обучающих инструментов на НГМ: высокая стоимость разработки и внедрения, отсутствие унифицированных стандартов к конфигурации цифровых моделей, сложности в актуализации данных.

2 Методика использования цифрового двойника в целях обучения

В таблице 1 представлены существующие технические решения ЦТ, достоинства и недостатки, на основании которых предложена методика использования ЦД НГМ в целях обучения, включающая следующие этапы.

Этап 1. Исследование возможностей создания ЦТ на базе 3D модели объекта.

Этап 2. Исследование возможностей создания ЦТ с помощью лазерного сканирования.

Этап 3. Описание структуры ЦД и его применения в образовательном процессе. На данном этапе разработаны сценарии: знакомства с оборудованием; обслуживания технологического процесса; отработки действий в аварийных ситуациях; моделирования управленческого воз-

¹ См. <https://maikop.fgoskomplekt.ru/catalog/vr-i-ar-dlya-obrazovaniya/vr-trenazhery-i-laboratorii-/neft-i-gaz1/programmnyj-kompleks-pererabotka-nefti-i-gaza-simulyacionnyj-trenazher-tehnologicheskoy-ustanovki-pervichnoj-pererabotki-nefti/>.

² См. <https://lcontent.ru/razrabotan-kompyuternyj-trenazhernyj-kompleks-bezopasnost-obektov-dobychi-transportirovki-pererabotki-nefti-i-gaza/>.

³ См. <https://galacom.ru/trenazher-kustovaja-ploshhadka-dobyvajushhih-i-nagnetatelnyh-skvazhin-operator-dobychi/>.

действия. Разработана модель взаимодействия обучающихся и наставников с ЦТ НГМ, схема взаимодействия ЦД, симулятора и онтологии, как семантического слоя ЦТ. Разработано онтологическое представление сценария, которое включает следующие этапы.

3.1. Определение основных целей и контекстов создания онтологии.

3.2. Систематизация информации для построения онтологии (анализ и группировка данных для выделения основных понятий, классов объектов, экземпляров, атрибутов и пр.).

3.3. Построение онтологической схемы сценария с визуализацией классов, экземпляров, отношений и атрибутов.

Этап 4. Выявление ограничений внедрения цифровых решений на объектах НГО (группы ограничений для внедрения ЦОП: технические, организационные и экономические).

Таблица 1 – Сравнение подходов к созданию цифрового тренажёра

Критерий сравнения	Тренажёр на основе 3D-модели	Тренажёр на основе облака точек
Источник данных	Проектная документация и CAD/BIM-модели	Лазерное сканирование
Характер модели	Отражает проектную структуру объекта	Отражает фактическое состояние объекта
Объём исходных данных	Относительно небольшой	Очень большой объём пространственных данных
Требования к оборудованию	Программные средства 3D-моделирования	Лазерные сканеры и специализированные системы обработки
Сложность подготовки модели	Умеренная	Высокая из-за обработки облака точек
Точность соответствия реальному объекту	Ограничена проектными параметрами	Высокая, соответствует реальному состоянию
Основные достоинства	Гибкость разработки и возможность раннего создания	Реалистичность и актуальность модели
Основные недостатки	Возможны расхождения с реальной конфигурацией	Значительные трудозатраты на обработку данных

3 Концептуальный проект цифрового тренажёра

ЦТ, создаваемый на основе ЦД НГМ, предназначен для: изучения персоналом состава оборудования технологической площадки месторождения; отработки действий по обеспечению технологического процесса на данной площадке; отработки аварийных ситуаций; апробации сценариев управления.

ЦТ может включать следующие площадки на месторождении: административно-бытовой комплекс (АБК); блочная кустовая насосная станция (БКНС); вакуумная компрессорная станция (ВКС); вахтовый жилой комплекс (ВЖК); дожимная насосная станция (ДНС); установка комплексной подготовки газа (УКПГ); установка подготовки нефти (УПН). Каждая площадка включает уникальный набор элементов и оборудования. Для каждой площадки разрабатывается следующий перечень онтологически управляемых сценариев обучения.

Знакомство с оборудованием. На начальном уровне ЦТ должен помочь научить обучающегося разбираться в составе оборудования, пространственной структуре площадки и назначении её основных элементов. Пользователь изучает размещение зданий, сооружений, технологических узлов, инженерных систем, маршруты перемещения по площадке, а также функциональное назначение оборудования.

Выполнение типовых операций с оборудованием. Сценарии такого типа могут включать обход оборудования, контроль состояния его узлов, выполнение операций его включения и отключения, проверку его параметров, работу с арматурой, иные действия, предусмотренные регламентом.

Отработка действий в нештатных и аварийных ситуациях. Отрабатываются действия при отказе оборудования, возгорании, перебоях с подачей электроэнергии и прочими действиями, влияющими на безопасность и устойчивость технологического процесса.

Отработка управленческих сценариев. Этот уровень подготовки связан с моделированием ситуаций, в которых требуется принять решение, влияющее на работу площадки. Сценарий ориентирован на мастеров, начальников смен, диспетчеров, технологов и других специалистов, принимающих решения.

Применение ЦД в обучении может быть организовано по уровням сложности: от базового знакомства с объектом до имитации сложных управленческих и аварийных ситуаций. Это позволяет соотнести учебные сценарии с квалификацией и функциями конкретных категорий персонала.

4 Требования к архитектуре цифрового тренажёра

Программная среда, на базе которой реализуется ЦТ, должна позволять задавать сценарную логику, то есть описывать последовательность событий, условия выполнения операций, варианты развития нештатных ситуаций и критерии оценки действий обучаемого. Это предполагает использование программных платформ, сочетающих инструменты трёхмерной графики, интерфейсного проектирования и настройки интерактивных сценариев. Важным условием является возможность актуализации модели: ЦТ должен поддерживать обновление 3D модели и атрибутивной информации, связанной с оборудованием и сценариями.

Схема взаимодействия обучающегося и наставника с ЦТ в процессе обучения представлена на рисунке 1.

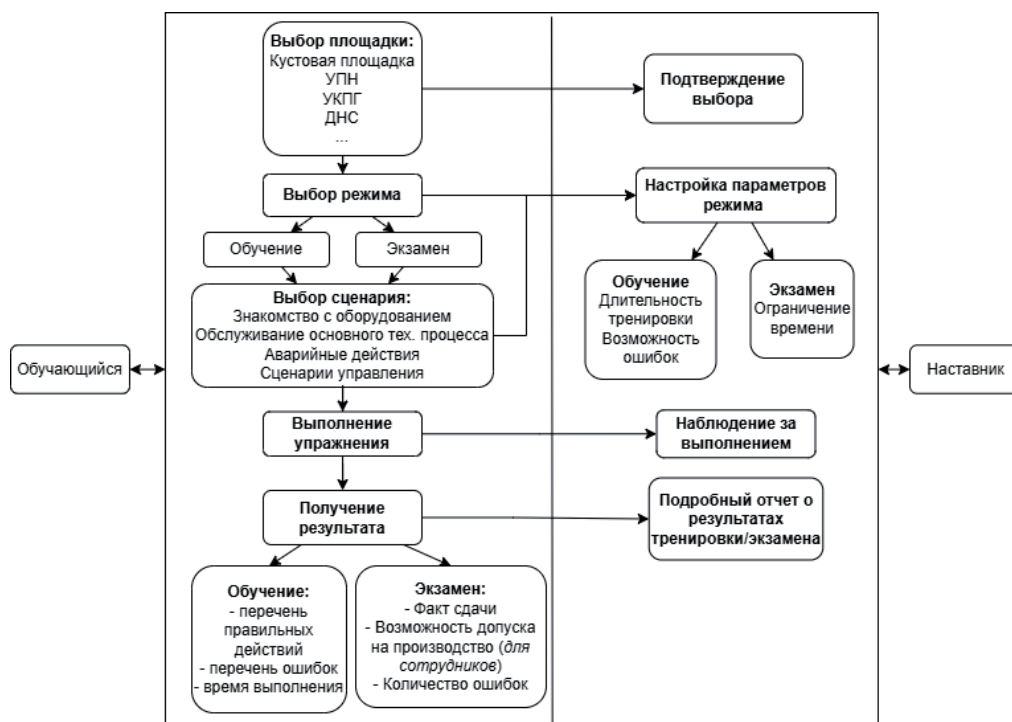


Рисунок 1 – Схема взаимодействия обучающегося и наставника с цифровым тренажёром

Пользователь проходит авторизацию, получает доступ к набору площадок и действий, которые соответствуют его роли (обучающийся или наставник), выбирает конкретную площадку и запускает учебный (или экзаменационный) модуль. Обучаемый выполняет предусмотренные сценарием действия, а система фиксирует их, сопоставляя с эталонной последовательностью. Пользователь получает сообщения о допущенных ошибках, нарушении логики выполнения операций или пропуске обязательных действий. После завершения сценария формируется отчёт о результатах, который может быть сохранён в базе данных и использован для анализа качества подготовки.

В ЦТ в качестве семантического слоя предполагается использовать онтологию. Для онтологически управляемых сценариев обучения в ЦТ НГМ разработана схема, обеспечивающая взаимодействие онтологии (*TrainingScenarioOntology*) с ЦД и симулятором. Онтология позволяет интерпретировать данные ЦД и генерировать персонализированные сценарии для симулятора (*Unity/Unreal Engine*). Представленные на рисунке 2 уровни обеспечивают замкнутый цикл обучения студента.

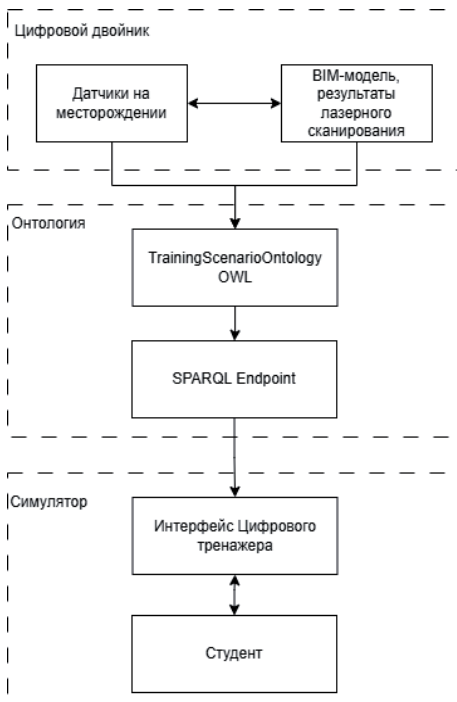


Рисунок 2 – Схема взаимодействия онтологии с цифровым двойником и симулятором

ЦД (физический уровень) формируется за счёт датчиков, измеряющих давление, температуру и вибрацию в реальном времени, а также *BIM*-моделей и данных лазерного сканирования. Разнородные данные (*JSON*-поток и облака точек *OBJ/GLTF*) конвертируются в *RDF*-триплеты и аннотируются семантическими метаданными, что обеспечивает их интерпретируемость для последующих уровней.

OWL-онтология (семантический уровень) строится в редакторе *Protégé* с *SPARQL Endpoint* и выполняет функции интеллектуального посредника. С использованием онтологии интерпретируются физические данные ЦД, автоматически генерируются персонализированные сценарии обучения по критериям пользователя. *SPARQL*-запросы извлекают последовательности действий, а *SWRL*-правила обеспечивают проверку корректности действий обучаемого.

Симулятор ЦТ (презентационный уровень) – *VR/AR*-интерфейс на базе *Unity/Unreal Engine* обеспечивает взаимодействие студента с виртуальной КП. Симулятор получает от онтологии готовый сценарий в формате *JSON*, визуализирует 3D-модель оборудования и собирает действия пользователя через *Unity C# API*. Обратная связь

формируется в реальном времени: успешные действия отмечаются зелёным индикатором, ошибки – красным, с текстовым пояснением.

Онтология является инструментом, который интегрирует и семантически насыщает данные, получаемые от ЦД, и создаёт основу для разработки архитектуры ЦТ. Благодаря связям, определённым в онтологии, осуществляется проверка действий обучающегося при выполнении каждого сценария.

Для сценария «Знакомство с оборудованием» сформирован фрагмент онтологического представления обучения студентов на примере КП (см. рисунок 3). В качестве примера на КП выбрана добывающая скважина, для которой рассматриваются: запорная арматура, манометр высокого давления, устье скважины. Построенный фрагмент онтологического представления показывает отношения между ключевыми классами и структурирует знания между ними: сценарий обучения, роль персонала, площадка НГМ, действие, режим. Центральным является сценарий обучения. Каждый класс имеет связь с экземплярами (например, для класса «режим» введены экземпляры «обучение» и «экзамен»). Экземпляры имеют атрибуты, характеризующие выбор настроек по запускаемому сценарию обучения (например, для класса «режим», в экземпляре «обучение» введены атрибуты «длительность тренировки» и «возможность ошибок»). Фрагмент онтологии отражает отношения, которые описывают: базовые связи между классами (сплошные стрелки), экземплярами и атрибутами онтологии (им

справедливо отношение «включает»); связи между классами онтологии (штрих-пунктирные стрелки), отражающие отношения: «включает», «содержит», «обучает», «использует».

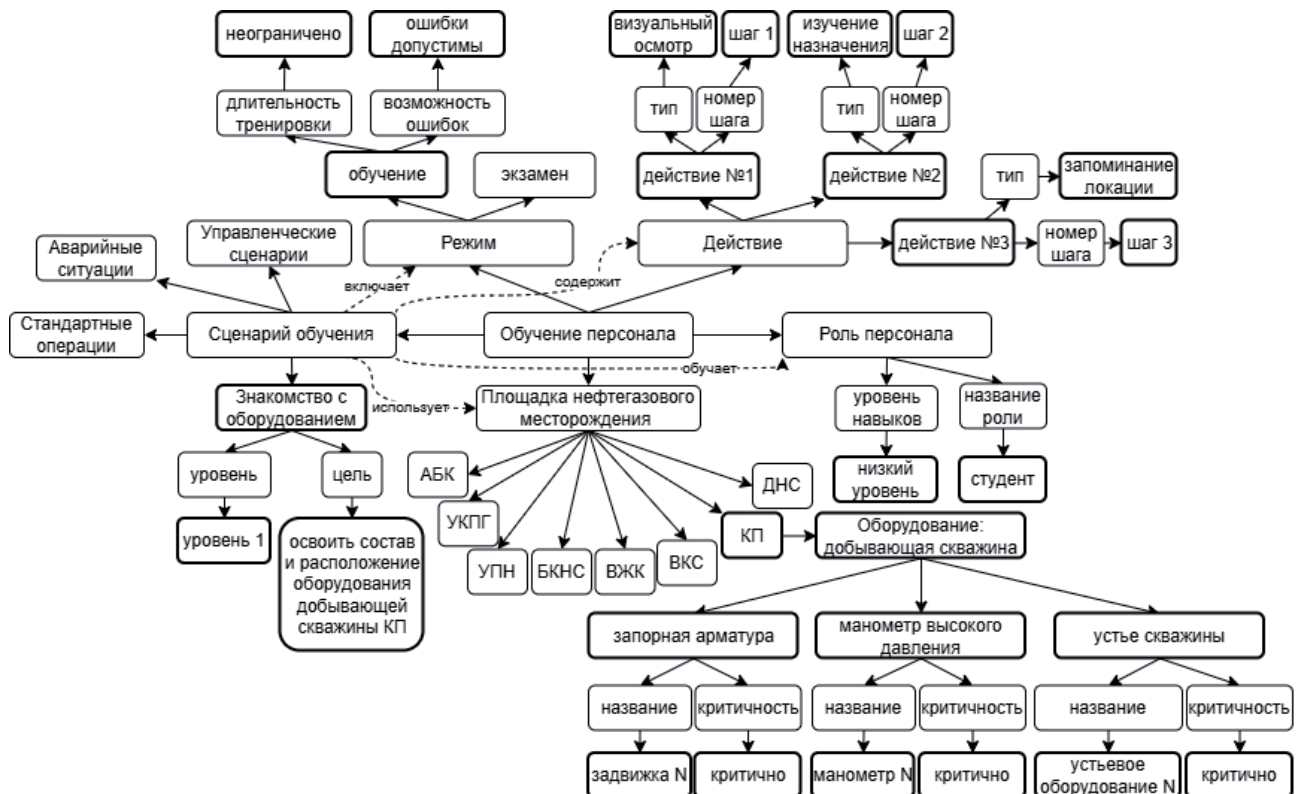


Рисунок 3 – Фрагмент онтологического представления сценария обучения «Знакомство с оборудованием»

Исходная концептуальная схема преобразована в онтологическую модель в формате *OWL* путём разделения элементов на четыре группы: классы, экземпляры, объектные свойства и *data*-свойства (см. рисунок 4).

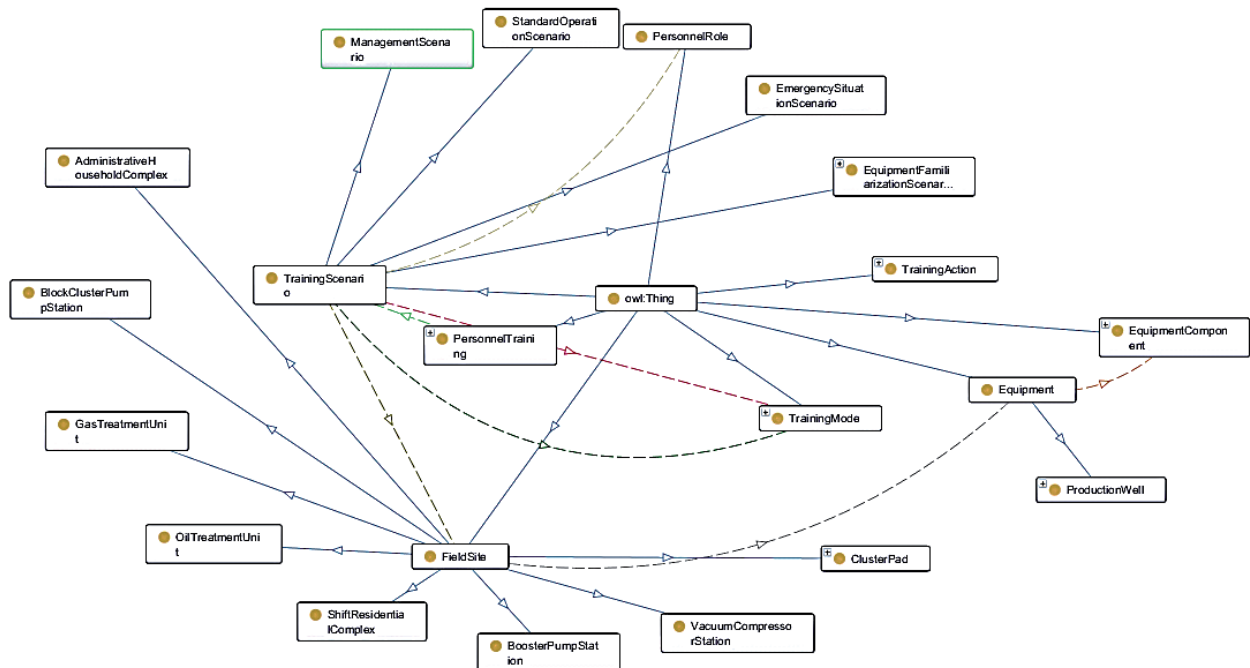


Рисунок 4 – Схема формализованной онтологической модели

Описание наполнения онтологической модели приведено в таблицах 2–4, в которых представлены соответственно: классы онтологической модели; объектные свойства онтологической модели; свойства данных онтологической модели.

Таблица 2 – Классы онтологической модели

Наименование класса	Обозначение класса	Назначение
Обучение персонала	<i>PersonnelTraining</i>	Общий процесс обучения персонала
Сценарий обучения	<i>TrainingScenario</i>	Сценарий, определяющий последовательность учебных действий
Знакомство с оборудованием	<i>EquipmentFamiliarizationScenario</i>	Сценарий изучения состава, назначения и расположения оборудования
Стандартные операции	<i>StandardOperationScenario</i>	Сценарии выполнения штатных операций
Аварийные ситуации	<i>EmergencySituationScenario</i>	Сценарии действий в нештатных и аварийных ситуациях
Управленческие сценарии	<i>ManagementScenario</i>	Сценарии отработки управленческих решений
Режим обучения	<i>TrainingMode</i>	Режим прохождения сценария: обучение, экзамен и т.д.
Действие	<i>TrainingAction</i>	Отдельное действие, входящее в сценарий
Роль персонала	<i>PersonnelRole</i>	Роль обучаемого или целевая профессиональная роль
Площадка НГМ	<i>FieldSite</i>	Производственная или инфраструктурная НГМ
АБК	<i>AdministrativeHouseholdComplex</i>	Административно-бытовой комплекс
БКНС	<i>BlockClusterPumpStation</i>	Блочная кустовая насосная станция
ВКС	<i>VacuumCompressorStation</i>	Вакуумная компрессорная станция
ВЖК	<i>ShiftResidentialComplex</i>	Вахтовый жилой комплекс
ДНС	<i>BoosterPumpStation</i>	Дожимная насосная станция
КП	<i>ClusterPad</i>	Кустовая площадка
УКПГ	<i>GasTreatmentUnit</i>	Установка комплексной подготовки газа
УПН	<i>OilTreatmentUnit</i>	Установка подготовки нефти
Оборудование	<i>Equipment</i>	Оборудование или технологический объект площадки
Добывающая скважина	<i>ProductionWell</i>	Оборудование: добывающая скважина
Компонент оборудования	<i>EquipmentComponent</i>	Составная часть оборудования

Таблица 3 – Объектные свойства онтологической модели

Объектное свойство	<i>Domain</i>	<i>Range</i>	Содержание
<i>hasScenario</i>	<i>PersonnelTraining</i>	<i>TrainingScenario</i>	Процесс обучения содержит сценарии обучения
<i>hasMode</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>TrainingMode</i>	Сценарий включает режим обучения
<i>containsAction</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>TrainingAction</i>	Сценарий содержит учебное действие
<i>trainsRole</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>PersonnelRole</i>	Сценарий соответствует роли
<i>usesSite</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>FieldSite</i>	Сценарий использует площадку НГМ
<i>containsEquipment</i>	<i>FieldSite</i>	<i>Equipment</i>	Площадка содержит оборудование
<i>hasComponent</i>	<i>Equipment</i>	<i>EquipmentComponent</i>	Оборудование имеет компоненты

К классам онтологии относятся: сценарий, режим, действие, роль, площадка, оборудование, компонент оборудования. Также классами стали типы сценариев (см. раздел 3) и типы площадок НГМ. Центральный класс – сценарий обучения (*TrainingScenario*) связывает между собой режим обучения, роль персонала, площадку НГМ и последовательность действий.

Экземплярами являются конкретные объекты (например, сценарий знакомства с оборудованием уровня 1 *Scenario_Familiarization_KP_Level1* является экземпляром класса *EquipmentFamiliarizationScenario*; КП KP_01 является экземпляром класса *ClusterPad*). Ком-

поненты оборудования (например, устьевое оборудование, задвижка, манометр) тоже стали экземплярами, так как в данной модели они – конкретные элементы оборудования добывающей скважины, а не классы типов оборудования.

Таблица 4 – Свойства данных онтологической модели

Свойство	Domain	Range	Пример значения	Содержание
<i>hasName</i>	<i>owl:Thing</i>	<i>xsd:string</i>	«КП», «Студент»	Наименование сущности
<i>hasGoalText</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>xsd:string</i>	«Освоить состав и расположение оборудования добывающей скважины КП»	Цель сценария
<i>hasScenarioLevel</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>xsd:string</i>	«Уровень 1»	Уровень сценария
<i>hasStepNumber</i>	<i>TrainingAction</i>	<i>xsd:positiveinteger</i>	1	Порядковый номер действия
<i>hasActionType</i>	<i>TrainingAction</i>	<i>xsd:string</i>	«Визуальный осмотр»	Тип действия
<i>hasInstructionText</i>	<i>TrainingAction</i>	<i>xsd:string</i>	«Выполнить визуальный осмотр оборудования»	Текст инструкции для обучаемого
<i>hasDurationPolicy</i>	<i>TrainingMode</i>	<i>xsd:string</i>	«не ограничено»	Длительность тренировки в режиме
<i>allowsErrors</i>	<i>TrainingMode</i>	<i>xsd:boolean</i>	«допустимо»	Допустимость ошибок в режиме
<i>hasSkillLevel</i>	<i>PersonnelRole</i>	<i>xsd:string</i>	«низкий уровень»	Уровень навыков, связанный с ролью
<i>hasCriticality</i>	<i>EquipmentComponent</i>	<i>xsd:string</i>	«критично»	Критичность компонента оборудования

В объектные свойства вынесены связи между сущностями (отношения «объект-объект»). Они отражают структуру исходной концептуальной модели. В атрибуты вынесены признаки с простыми типами значений (строка, число или логическое значение). Тип действия, уровень навыков и критичность компонента в данном фрагменте используются как атрибуты.

Для иллюстрации управления сценарием представлен пример *SPARQL*-запроса для извлечения последовательности учебных действий из онтологической модели сценария:

```
PREFIX ngt: <http://example.org/ngm-training#>
SELECT ?scenario ?action ?stepNumber ?actionType
WHERE {
  ?scenario a ngt:EquipmentFamiliarizationScenario ;
    ngt:trainsRole ngt:StudentRole ;
    ngt:usesSite ngt:KP_01 ;
    ngt:hasMode ngt:LearningMode ;
    ngt:containsAction ?action .
  ?action ngt:hasStepNumber ?stepNumber ;
    ngt:hasActionType ?actionType .
}
```

```
ORDER BY ?stepNumber
```

В блоке *WHERE* задаются условия выбора сценария (принадлежность классу сценария «Знакомство с оборудованием», связь с ролью «обучаемый», используемой КП и режимом). Запрос извлекает связанные с ним действия через объектные свойства *containsAction* и получает его порядковый номер и тип через связи *hasStepNumber* и *hasActionType* соответственно. Конструкция *ORDER BY ?stepnumber* позволяет вывести действия в порядке их выполнения.

5 Обсуждение

5.1 Ограничения текущего этапа исследования

Выявление ограничений внедрения ЦД на объектах НГО позволяет рассмотреть причины, по которым цифровизация эксплуатируемых производственных площадок оказывается более сложной, чем внедрение аналогичных решений на новых объектах. В условиях действующего производства цифровые инструменты необходимо адаптировать к существующей технологической, технической и организационной среде. Основные ограничения можно объединить в группы: технические, организационные и экономические [24].

Технические ограничения чаще всего связаны с тем, что часть оборудования и систем автоматизации на действующих объектах внедрена раньше современных цифровых платформ и не всегда совместима с ними.

Организационные ограничения проявляются в необходимости пересмотра отдельных рабочих процедур, подготовки персонала к использованию новых инструментов, а также повышением требований к защите производственных данных и технологических систем.

Экономические ограничения обусловлены затратами на модернизацию оборудования, закупку и настройку программных продуктов, доработку инфраструктуры и последующее техническое сопровождение.

Для действующих объектов НГО цена технологических сбоях от вмешательства в непрерывный производственный процесс высока, поэтому любые изменения должны внедряться с учётом требований надёжности, ПБ и сохранения стабильности работы оборудования.

Для подтверждения работоспособности предложенного подхода и соответствия модели Киркпатрика в статье представлены онтологическая модель с примерами *SPARQL*-запросов и следующий план внедрения ЦТ.

На первом уровне модели Киркпатрика оценивается реакция обучающихся. Предполагается проводить анкетирование обучающихся (студентов и операторов) после работы с ЦТ по 5-балльной шкале каждого критерия (интерес, понятность интерфейса, оцениваемая полезность, реалистичность). Будет проведено сравнение с традиционным форматом обучения – лекции, видеоинструкции.

На втором уровне модели Киркпатрика оценивается прирост знаний и навыков после выполнения обучающих упражнений. В качестве метода оценки предполагается тестирование уровня знаний до и после тренировки на ЦТ. В качестве ключевых метрик предполагается использовать *время освоения материала* – снижение среднего времени выполнения сценария с первой попытки до эталонного (заданного инструктором) и *процент ошибок* – уменьшение количества неправильных действий (пропуск операций, нарушение последовательности).

На третьем и четвёртом уровнях модели Киркпатрика (оценка степени применения полученных знаний на практике и польза для бизнеса) предусматривается внедрение разработанного ЦТ в практику. Фактическое внедрение ЦТ на месторождении и оценка снижения аварийности, повышения производительности труда требуют длительного наблюдения (6–12 месяцев).

5.2 Сравнительный анализ с существующими решениями

Предлагаемая в статье концепция платформы ЦД НГМ на основе онтологически управляемых сценариев обучения превосходит аналоги (см. таблицу 5) за счёт комплексной интеграции, охватывающей все КП НГМ.

Сравнение в таблице 5 показывает, что предложенная онтологическая модель отличается не только предметной областью, но и практической направленностью.

Предлагаемое в статье решение выделяется поддержкой онтологически управляемого сценарного подхода, позволяющего моделировать реальные сценарии обучения персонала в ЦД всего НГМ, что обеспечивает иммерсивное обучение с ветвящимися сценариями и устраняет фрагментацию, типичную для существующих программных решений.

Заключение

ЦТ на основе ЦД НГМ следует рассматривать как полноценный элемент системы профессионального обучения на основе онтологически управляемых сценариев. Внедрение ЦТ в

практику подготовки кадров НГО создаёт предпосылки для повышения уровня ПБ, улучшения качества обучения при сокращении нагрузки на действующие объекты.

Таблица 5 – Сравнение нефтегазовых онтологических моделей с предложенной моделью

Критерий	<i>OSDU Ontology</i> [25]	<i>Petro-Onto</i> [26]	<i>P-PSO</i> [27]	Онтология ЦТ НГМ
Предметная область	Ориентирована на данные геологоразведки и разработки месторождений: скважины, пласты, сейсмические данные. Практическое применение – семантический слой интеграции и управления геолого-промысловыми данными в цифровой платформе нефтегазовой компании.	Ориентирована на формализацию предметной области разведки и разработки НГМ. Практическое применение – создание единой семантической основы для интеграции разнородных данных и построения отраслевого графа знаний.	Ориентирована комплексное представление производственных систем. Практическое применение – информационный обмен между программными средствами, проектирование производственных систем, автоматизация и управление производством.	Ориентирована на формальное описание структуры и логики ЦТ, учебных сценариев, моделируемых технологических процессов и объектов. Практическое применение – роли семантического слоя, обеспечивающего интерпретацию данных от ЦД и формирование учебных заданий
Базовые классы	<i>osdu: AbstractCommonResources</i> – базовый класс для общих характеристик ресурсов (владельцев, источников, пространственных привязок); <i>osdu: MasterData</i> – класс для основных бизнес-и физических характеристик объектов отрасли – скважина, ствол скважины, бассейн; <i>osdu: WorkProduct</i> – класс для описания результатов производственной, инженерной или аналитической деятельности	<i>Business</i> – класс для описания бизнес-доменов, процессов и видов деятельности; <i>Object</i> – класс для описания физических и геологических объектов отрасли (бассейны, месторождения, скважины); <i>Knowledge</i> – класс для представления знаний (исследования, патенты, стандарты и техническая документация)	<i>Component</i> – базовый класс физического слоя (материальные элементы системы); <i>Processor</i> – производственные ресурсы, выполняющие обработку, сборку или контроль; <i>Operation</i> – класс технологического слоя, описывающий производственную операцию; <i>Controller</i> – класс управляющего слоя, описывает элемент принятия решения в производственном планировании и управлении	<i>TrainingScenario</i> – класс для описания ЦТ как программно-технической системы; <i>Processor</i> – класс для описания конкретного учебного задания или упражнения; <i>Equipment</i> – класс для описания технологического оборудования, агрегатов, узлов и систем.
Базовые свойства	Объектные свойства – <i>hasDataset</i> , <i>hasWell</i> , <i>hasWellbore</i> , <i>hasFacility</i> – описывают связи между объектами предметной области, рабочими продуктами, доменами и справочниками; свойства данных – <i>owners</i> , <i>viewers</i> , <i>createTime</i> , <i>modifyTime</i> – описывают атрибуты контроля доступа, временные метаданные и т.д.	Объектные свойства – <i>kindOf</i> и <i>hasDataProperty</i> для иерархических связей и связи с атрибутами, <i>isAPartOf</i> – отношение «часть-целое», <i>isConnectedBy</i> – связь между объектами инфраструктуры; свойства данных описывают атрибуты объектов – <i>label</i> , <i>businessCode</i> , <i>type</i> , <i>classification</i>	Объектные свойства – <i>hasSubPart</i> связывает изделие с подузлами; <i>hasComponent</i> – связывает производственную систему с физическими компонентами; <i>usesTool</i> – связывает операцию и процессор с применяемым инструментом; свойства данных описывают базовые атрибуты: параметры потоков, буферов, правил управления, заказов и производственных планов	Объектные свойства <i>hasScenario</i> , <i>hasMode</i> , <i>usesSite</i> описывают связи между ЦТ, сценариями, режимами обучения и используемыми узлами объекта НГМ; свойства данных <i>hasGoalText</i> , <i>hasStepNumber</i> , <i>hasInstructionText</i> и пр. описывают текстовые, числовые и временные характеристики сценариев и упражнений
Аксиомы и ограничения	Используются стандартные ограничения схем <i>rdfs</i> (<i>subclassOf</i> , <i>domain</i> , <i>range</i>) и <i>owl</i> (<i>minCardinality</i> , <i>allValuesFrom</i>), задающие правила построения иерархии и интерпретации классов и свойств	Используются правила и ограничения, близкие по смыслу к стандартным конструкциям <i>subclassOf</i> , <i>domain/range</i> и ограничениям значений свойств и атрибутов	Используются правила и ограничения на уровне концептуальной <i>UML</i> -модели, задающие иерархию, ассоциативные ограничения (связи между объектами), а также ограничения структурной целостности модели	Используются стандартные конструкции <i>rdfs:subclassOf</i> , <i>rdfs:domain</i> , <i>rdfs:range</i> , задающие иерархию классов и допустимые области применения свойств.

Предложенная платформа на основе онтологически управляемых сценариев обучения может иметь преимущества перед существующими решениями, обеспечивая персонализацию, интеграцию с 3D-моделями объектов НГМ и реальными данными.

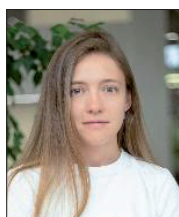
Перспективы дальнейших исследований включают валидацию платформы ЦТ на реальных объектах НГМ, интеграцию с ВМ-ЦД для предиктивного моделирования аварий, оценку эффективности ЦТ по разработанному плану эксперимента.

Список источников

- [1] **Zhang L., Wang J.** Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: Connotations and key technologies. *Natural Gas Industry B*. 2023. V.10. №3. P.293-303. DOI: 10.1016/j.ngib.2023.05.006.
- [2] **Evangelista A. et al.** From knowledge to action: Assessing the effectiveness of immersive virtual reality training on safety behaviors in confined spaces using the Kirkpatrick model. *Safety Science*. 2025. V.181. P.106693. DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106693.
- [3] **Баймухаметов Т.А.** Обучение профессиональным компетенциям на нефтегазовых предприятиях в вузе. *Управление образованием: теория и практика*. 2023. №2(60). С.223-232. DOI: 10.25726/c5392-0501-1769-k.
- [4] **Волкова М.М., Манурова Р.А., Шайдуллина Д.Н.** Применение виртуальных тренажеров для обучения специалистов нефтегазовой отрасли. *Вестник технологического университета*. 2019. Т.22. №4. С.115-121.
- [5] **Wei L. et al.** Applications of digital twins to offshore oil/gas exploitation: From visualization to evaluation. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. V.53. №5. P.738-743. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.04.166.
- [6] **Гумеров И.И., Исанбаева Д.А.** Применение цифровых технологий в образовательных программах нефтегазовой отрасли для повышения квалификации специалистов в условиях цифровой трансформации. *Управление образованием: теория и практика*. 2024. №. 9-1 (86). С. 151-159. DOI: 10.25726/b2239-8134-2276-s.
- [7] **Адилмурдин Р.Р., Лайков Е.Г., Патока С.С., Валитов Э.Э., Иржанов А.Ж.** Анализ влияния цифровизации на подготовку специалистов в нефтегазовом вузе. *Управление образованием: теория и практика*. 2024. №2-2(77). С.61-71. DOI: 10.25726/t4445-0225-7161-v.
- [8] **Kineber A. F. et al.** Modelling the relationship between digital twins implementation barriers and sustainability pillars: Insights from building and construction sector. *Sustainable Cities and Society*. 2023. V.99. P.104930. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104930.
- [9] **Lu Y. et al.** Low-latency federated learning and blockchain for edge association in digital twin empowered 6G networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. V.17. №7. P.5098-5107. DOI: 10.1109/TII.2020.3017668.
- [10] **Zribi H. et al.** Industry 4.0: digital twins characteristics, applications, and challenges in-built environments. *Production & Manufacturing Research*. 2025. T. 13. №. 1. P. 2456277. DOI: 10.1080/21693277.2025.2456277
- [11] **Anwer N. et al.** Developing and leveraging digital twins in engineering design. *CIRP Annals*. 2025. V.74. №2. P.843-868. DOI: 10.1016/j.cirp.2025.05.002.
- [12] **Karanam S. A. K., Hartman N. W.** A systematic review of digital twin (DT) and virtual learning environments (VLE) for smart manufacturing education. *Manufacturing letters*. 2025. V.44. P.1597-1608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.179>.
- [13] **Ortiz J. S. et al.** Digital Twin-Based Active Learning for industrial process control and supervision in industry 4.0. *Sensors*. 2025. V.25. №7. P. 2076. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25072076>.
- [14] **Lu Y. et al.** Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. 2020. V.61. P.101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [15] **O'Dwyer E. et al.** Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities and Society*. 2020. V.62. P.102412. DOI: 10.48550/arXiv.2007.12129.
- [16] **Chen X. et al.** Effects of building information modeling prior knowledge on applying virtual reality in construction education: Lessons from a comparison study. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2023. V.10. №5. P.2036-2048. DOI: 10.1093/jcde/qwad091.
- [17] **Терешко Е.К., Малащенко М.Р., Середин Е.П.** Цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3. С.376-389. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-376-389.
- [18] **Wanasinghe T. R. et al.** Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE access*. 2020. V.8. P.104175-104197. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723.

- [19] **Шеляго Е.В., Калашиников П.К.** Цифровизация нефтегазового образования на примере проекта «Губкин цифра». *Научно-практическая конференция «Цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли»*. 2024. С. 143-152.
- [20] **Шеляго Е.В., Шеляго Н.Д.** Применение мобильных обучающих приложений в сфере высшего образования на примере специальности «Нефтегазовое дело». *Нефтяное хозяйство*. 2021. №10. С.128-132. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-10-128-132.
- [21] **Wong, J.Y., et al.** BIM-VR Framework for Building Information Modelling in Engineering Education. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijim)*. 2020. 14(06). P.15–39. DOI: 10.3391/ijim.v14i06.13397.
- [22] **Sepasgozar S. M. E.** Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*. 2020. V.10. №13. P.4678. DOI: 10.3390/app10134678.
- [23] **Di Stefano F. et al.** Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, natural hazards and risk*. 2021. V.12. №1. P.2387-2429. DOI: 10.1080/19475705.2021.1964617.
- [24] **Abreu N. et al.** Procedural point cloud modelling in scan-to-BIM and scan-vs-BIM applications: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023. V.12. №7. P. 260. DOI: 10.3390/ijgi12070260.
- [25] **Abolhassani N.** A Data Mesh Adaptable Oil and Gas Ontology Based on Open Subsurface Data Universe (OSDU). *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2023)*. 2023. Vol.2. P.29–39. DOI: 10.5220/0012160000003598.
- [26] **Tang X.** Construction and application of an ontology-based domain-specific knowledge graph for petroleum exploration and development. *Geoscience Frontiers*. 2023. Vol.14. Article 101426. DOI: 10.1016/j.gsf.2022.101426.
- [27] **Garetti M.** P-PSO ontology for manufacturing systems. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. 2012. P.449–456. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00222.

Сведения об авторах



Терешко Екатерина Кирилловна, 1996 г. рождения. Окончила аспирантуру СПбПУ (2023), к.э.н. (2024). Научный сотрудник лаборатории «Промышленные системы потоковой обработки данных» Передовой инженерной школы (ПИШ) «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. Доцент Высшей инженерно-экономической школы, 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): ABH-2326-2020; ORCID ID: 0000-0001-7117-7549. ektereshko@mail.ru. ✉.

Малашенко Марина Руслановна, 2001 г. рождения. Окончила магистратуру СПбПУ (2025). Аналитик лаборатории «Цифровое моделирование промышленных систем» ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. Ассистент Высшей инженерно-экономической школы, СПбПУ. В списке научных трудов около 20 работ, посвящённых экономике северных регионов и нефтегазовой отрасли. ORCID ID: 0009-0008-5130-1774; ResearcherID (WoS): PKQ-5236-2026; Author ID (РИНЦ.): 1247088. malashenko.marina.r@yandex.ru.



Криони Илья Николаевич, 1996 г. рождения. Окончил магистратуру Уфимского государственного технологического университета (2020). Ведущий программист ООО «Тетракуб». Аспирант Высшей школы передовых цифровых технологий ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. В списке научных трудов более 10 работ в области автоматизации и обеспечения качества процесса строительного проектирования. Author ID (РИНЦ): 1120520; Author ID (Scopus): 57246625000; Researcher ID (WoS): AAX-5344-2021; ORCID ID: 0000-0002-9594-237X. ilkrioni@yandex.ru.

Поступила в редакцию 07.04.2026, после рецензирования 17.08.2026. Принята к публикации 28.08.2026.



Training of oil and gas field maintenance specialists using digital twins

© 2026, E.K. Tereshko ✉, M.R. Malashenko, I.N. Krioni

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

Abstract

The use of digital twins in the training of students and early-career personnel involved in oil and gas field maintenance is considered. The relevance of the topic is determined by the increasing requirements for industrial safety and the operational reliability of production facilities, which significantly limits the use of traditional forms of training that involve direct presence on the site. Under these conditions, digital technologies capable of supporting training in a virtual environment without direct involvement in technological processes are becoming increasingly important. Particular attention is given to the use of digital training simulators developed on the basis of digital modeling technologies. Such solutions can facilitate the safe acquisition and practice of professional skills and expand opportunities for personnel training both at operating production facilities and within educational institutions. Limitations associated with the implementation of digital solutions are also identified, including the high computational resource requirements of the models, dependence on data transmission infrastructure, as well as the need to maintain up-to-date digital representations of physical assets. The aim of the study is to develop a methodology for the use of digital twins within a training environment based on ontology-driven scenarios. Approaches to the development of digital training simulators are analyzed, including three-dimensional modeling and laser scanning technologies, and a structure of a digital training simulator as an element of the educational infrastructure is proposed. The implementation of the proposed approach can improve the quality of practical training of personnel, reduce the likelihood of errors in the performance of technological operations, and contribute to enhanced industrial safety.

Keywords: oil and gas field, digital twins, specialists training, ontology, scenario-based training, digital training simulator.

For citation: Tereshko EK, Malashenko MR, Krioni IN. Training of oil and gas field maintenance specialists using digital twins. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(3): 438-453. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-438-453.

Authors' contributions: Tereshko E.K. – problem formulation, conceptualization, methodology; Malashenko M.R. – data collection and systematization, analysis of analogous solutions, data visualization; Krioni I.N. – development of the ontological model and integration of the "digital twin–ontology–simulator" architecture.

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

List of figures and tables

- Figure 1 – Architecture of trainee–instructor interaction with the digital training simulator
- Figure 2 – Architecture of the digital twin–ontology–simulator integration
- Figure 3 – Fragment of the ontological representation of the “Equipment Familiarization” training scenario
- Figure 4 – Architecture of the formalized ontological model
- Table 1 – Comparison of approaches to creating a digital training simulator
- Table 2 – Classes of the ontological model
- Table 3 – Object properties of the ontological model
- Table 4 – Data properties of the ontological model
- Table 5 – Comparison of oil and gas domain ontologies with the proposed model

References

- [1] Zhang L, Wang J. Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: Connotations and key technologies. *Natural Gas Industry B*. 2023. T. 10. №. 3. P. 293-303. DOI: 10.1016/j.ngib.2023.05.006.

- [2] **Evangelista A. et al.** From knowledge to action: Assessing the effectiveness of immersive virtual reality training on safety behaviors in confined spaces using the Kirkpatrick model. *Safety Science*. 2025; 181: 106693. DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106693.
- [3] **Baymukhametov TA.** Training of professional competencies at oil and gas enterprises at the university [In Russian]. *Education management: theory and practice*. 2023; 2 (60): 223-232. DOI: 10.25726/c5392-0501-1769-k.
- [4] **Volkova MM, Manurova RA, Shaidullina DN.** The use of virtual simulators for training specialists in the oil and gas industry [In Russian]. *Bulletin of the Technological University*. 2019; 22 (4): 115-121.
- [5] **Wei L. et al.** Applications of digital twins to offshore oil/gas exploitation: From visualization to evaluation. *IFAC-PapersOnLine*. 2020; 53(5): 738-743. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.04.166.
- [6] **Gumerov II, Isanbayeva DA.** The use of digital technologies in educational programs of the oil and gas industry to improve the skills of specialists in the context of digital transformation [In Russian]. *Education management: theory and practice*. 2024; 9-1 (86): 151-159. DOI: 10.25726/b2239-8134-2276-s.
- [7] **Adilmuridin RR, Laikov EG, Patoka SS, Valitov EE, Irzhanov AJ.** Analysis of the impact of digitalization on the training of specialists in an oil and gas university [In Russian]. *Education management: theory and practice*. 2024; 2-2(77): 61-71. DOI: 10.25726/t4445-0225-7161-v.
- [8] **Kineber AF. et al.** Modelling the relationship between digital twins implementation barriers and sustainability pillars: Insights from building and construction sector. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 99: 104930. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104930.
- [9] **Lu Y. et al.** Low-latency federated learning and blockchain for edge association in digital twin empowered 6G networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020; 17(7): 5098-5107. DOI: 10.1109/TII.2020.3017668.
- [10] **Zribi H. et al.** Industry 4.0: digital twins characteristics, applications, and challenges in-built environments. *Production & Manufacturing Research*. 2025; 13(1): 2456277. DOI: 10.1080/21693277.2025.2456277.
- [11] **Anwer N. et al.** Developing and leveraging digital twins in engineering design. *CIRP Annals*. 2025; 74(2): 843-868. DOI: 10.1016/j.cirp.2025.05.002.
- [12] **Karanam S. A. K., Hartman N. W.** A systematic review of digital twin (DT) and virtual learning environments (VLE) for smart manufacturing education. *Manufacturing letters*. 2025; 44: 1597-1608. DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.179.
- [13] **Ortiz J. S. et al.** Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in industry 4.0. *Sensors*. 2025; 25(7): 2076. DOI: 10.3390/s25072076.
- [14] **Lu Y. et al.** Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. 2020; 61: 101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [15] **O'Dwyer E. et al.** Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 62: 102412. DOI: 10.48550/arXiv.2007.12129.
- [16] **Chen X. et al.** Effects of building information modeling prior knowledge on applying virtual reality in construction education: Lessons from a comparison study. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2023. T. 10. № 5. C. 2036-2048. DOI: 10.1093/jcde/qwad091.
- [17] **Tereshko EK, Malashenko MR, Seredin EP.** Digital transformation of industrial facilities 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.
- [18] **Wanasinghe TR. et al.** Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE access*. 2020; 8: 104175-104197. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723.
- [19] **Shelyago EV, Kalashnikov PK.** Digitalization of oil and gas education on the example of the Gubkin Digital project [In Russian]. *Scientific and practical conference "Digital transformation in the oil and gas industry"*. 2024: 143-152.
- [20] **Shelyago EV, Shelyago ND.** Case-study of using educational mobile applications in higher education in the oil and gas engineering specialty [In Russian]. *The oil industry*. 2021; 10: 128-132. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-10-128-132.
- [21] **Wong JY, et al.** BIM-VR Framework for Building Information Modelling in Engineering Education. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2020; 14(06): 15-39. DOI: 10.3991/ijim.v14i06.13397.
- [22] **Sepasgozar SME.** Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*. 2020; 10(13): 4678. DOI: 10.3390/app10134678.
- [23] **Di Stefano F. et al.** Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, natural hazards and risk*. 2021; 12(1): 2387-2429. DOI: 10.1080/19475705.2021.1964617.
- [24] **Abreu N. et al.** Procedural point cloud modelling in scan-to-BIM and scan-vs-BIM applications: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023; 12(7): 260. DOI: 10.3390/ijgi12070260.
- [25] **Abolhassani N.** A Data Mesh Adaptable Oil and Gas Ontology Based on Open Subsurface Data Universe (OSDU). *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2023)*. 2023; 2: 29-39. DOI: 10.5220/0012160000003598.

- [26] **Tang X.** Construction and application of an ontology-based domain-specific knowledge graph for petroleum exploration and development. *Geoscience Frontiers*. 2023; 14. Article 101426. DOI: 10.1016/j.gsf.2022.101426.
- [27] **Garetti M.** P-PSO ontology for manufacturing systems. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. 2012. P.449–456. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00222.
-

About the authors

Ekaterina Kirillovna Tereshko (b. 1996) completed her postgraduate studies at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU) in 2023; Candidate of Economic Sciences (2024). Researcher at the Laboratory of Industrial Streaming Data Processing Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. Associate Professor at the Higher School of Engineering and Economics, SPbPU. The list of scientific papers includes more than 50 works in the fields of construction industry development, digital transformation, design automation, 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) received her Master’s degree from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU) in 2025. Analyst at the Laboratory of Digital Modeling of Industrial Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. Assistant Professor at the Higher School of Engineering and Economics, SPbPU. The list of scientific papers includes approximately 20 works on the economics of the northern regions and the oil and gas industry. ORCID ID: 0009-0008-5130-1774; ResearcherID (WoS): PKQ-5236-2026; Author ID (RSCI): 1247088. malashenko.marina.r@yandex.ru.

Ilya Nikolaevich Krioni (b. 1996) received his Master’s degree from Ufa State Technological University in 2020. Lead Software Developer at Tetracube LLC. Postgraduate student at the Higher School of Advanced Digital Technologies, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. The list of scientific papers includes more than 10 works in the fields of automation and quality assurance in the construction design process. Author ID (RSCI): 1120520; Author ID (Scopus): 57246625000; Researcher ID (WoS): AAX-5344-2021; ORCID ID: 0000-0002-9594-237X. ilkrioni@yandex.ru

Received April 7, 2026. Revised August 17, 2026. Accepted August 28, 2026.



Функция локального обнуления в геометрическом моделировании алгебраическими функциями

© 2026, А.В. Толок ✉, Н.Б. Толок

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Москва, Россия

Аннотация

Рассматривается интерактивный принцип геометрического моделирования алгебраическими функциями для автоматизированного построения пространственной твёрдотельной цифровой модели по плоским чертежам. Применение R-функционального моделирования к решению задач описания алгебраическими функциями сложного геометрического контура по чертежу содержит два основных недостатка – сложность описания нуль-контура по заданным точкам чертежа и большие затраты времени компиляции формул для компьютерных расчётов. В статье описан подход к реализации формообразующего закона построения контура нулевой границы (нуль-контура) объекта чертежа, обеспечивающего динамическое формирование R-функциональной предикатной функции твёрдотельного геометрического объекта. Рассматривается функция локального обнуления отрезка между заданными двумя точками. Обсуждаются принципы компьютерного конструирования контуров чертежа с применением последовательного построения функции нуль-контура из функций нуль-отрезков посредством применения функции локального обнуления. Алгоритм моделирования обеспечивает запоминание текущего состояния расчёта функции нуль-контура функционально-воксельной моделью для использования на следующем шаге R-функционального пересечения с новой функцией нуль-отрезка. Последовательное сохранение функционально-воксельных моделей позволяет осуществить возврат на предыдущие шаги проектирования. Такой подход обеспечивает построение поверхности нуль-контура в реализации цифровой 3D-модели посредством аналитического закона вращения. Разработанные средства можно рассматривать как дополнительный инструмент для решения задачи 3D-моделирования по плоским проекциям.

Ключевые слова: R-функция, проекция, функционально-воксельная модель, M-образ, закон вращения, функция локального обнуления, твёрдотельное моделирование.

Цитирование: Толок А.В., Толок Н.Б. Функция локального обнуления в геометрическом моделировании алгебраическими функциями. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.454-464. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-454-464.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление №9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

Вклад авторов: Толок А.В. – принципы применения локальной геометрии в аналитическом моделировании геометрических объектов; Толок Н.Б. – практическая апробация принципов с компьютерной реализацией на примерах.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Алгебраические уравнения неявного вида для описания объектов $f(X_n) = 0$ формулируют закон формообразования нулевых точек в непрерывном пространстве – то есть задают правило, по которому в непрерывном пространстве значений возникают нулевые точки на поверхности объекта (прямая, плоскость, алгебраические кривые и поверхности). Компьютерная запись такой модели компактна и не ограничена размерностью пространства аргументов, но сложна в описании геометрического многообразия. Однако такая модель максималь-

но подходит для аналитических инженерных расчётов, поскольку точно описывает геометрию объекта на границе и внутри его тела, вместе с дифференциальными характеристиками.

Использование алгебраических функций в геометрическом моделировании было предложено в [1], где было показано формообразующее свойство аналитических уравнений. Такое моделирование открыло возможности применения точного описания геометрии объектов в многомерном пространстве (в дальнейшем получило обозначение *F-rep*).

Примерами символьно-графических редакторов, позволяющих наглядно проектировать сложные геометрические объекты функциональными конструкциями, могут служить открытые программные платформы *OpenCAD*¹ и *Antimony*². Оба приложения позволяют составлять описания математических конструкций из алгебраических функций с визуализацией результатов. Недостатком такого подхода является сложность применения полученных моделей в инженерных расчётах, т.к. математическая конструкция записана в структуре кода, имеет свой формат и формулируется громоздкими уравнениями. Графическое отображение является визуальным сопровождением процесса проектирования и не содействует описанию геометрических свойств объекта.

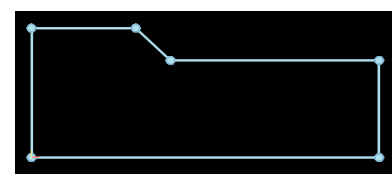
В частности, при работе с плоскими объектами в системе *Antimony* используются следующие базовые геометрические блоки: полилинии (из отрезков), задаваемые последовательным набором точек; плоские фигуры, представленные прямоугольниками, треугольниками, кругами и правильными многоугольниками (полигонами). В качестве примера работы этой системы показано построение контура, заданного набором точек (см. рисунок 1).

Поскольку данный контур не описывается алгебраическим законом формообразования, он не содержит геометрической информации о сформированном замкнутом объекте.

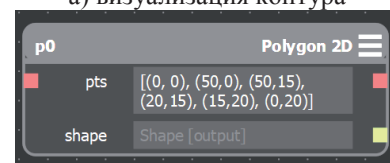
В [2, 3] предложена концепция точечного исчисления (ТИ) как предполагаемой основы для твёрдотельного компьютерного моделирования, где положение точки, принадлежащей объекту, задано параметрическим уравнением. Эта концепция развивает идеи параметрического описания кривых и поверхностей и потому неизбежно наследует как их достоинства, так и известные ограничения, связанные с сеточным заполнением геометрического тела.

Для твёрдотельного моделирования требуется подход, при котором объект задаётся алгебраическими функциями как единое непрерывное целое. Такая модель содержит не только точную геометрическую форму, но и дифференциальные характеристики, а при необходимости и локальные физические свойства (например, плотность, упругость и др.). Благодаря этому булевы операции и аналитические инженерные расчёты могут выполняться на уровне математического описания без потери точности.

Система рекурсивного анализа образных компонентов (*РАНОк*) [4] базируется на компиляции формул и сохранении задаваемой области функции в виде пяти трёхмерных массивов (М-образов). Каждый М-образ содержит для рассчитанных точек дискретной области трёхмерное скалярное поле значений соответствующей компоненты однородного вектора единичной нормали $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)$. Совокупность М-образов для каждой точки дискретной области позволяет собрать *локальную функцию* неявного вида



а) визуализация контура



б) описание в виде набора точек

Рисунок 1 – Построение контура в системе *Antimony*

¹ *OpenCAD* – открытая система автоматизированного проектирования (САПР) для параметрического создания твердотельных трёхмерных объектов. <https://openscad.org/>.

² *Antimony* – САПР, в которой программное обеспечение для САПР развилось на основе Лисп-машин, а не чертёжных столов. <https://www.mattkeeter.com/projects/antimony/3/>.

$$n_1x + n_2y + n_3z + n_4u + n_5 = 0. \quad (1)$$

Локальная функция полностью заменяет в точке конструкцию из функций, описывающих геометрический объект. Точки М-образов кодируются цветом (графически):

$$M_i = \frac{(n_i + 1)P}{2}, P = 256^3 - \text{количество градаций цвета}, \quad (2)$$

которые представляют значения коэффициентов n_i локальной функции (1).

Метод такого представления данных получил название функционально-воксельный (ФВ-модель), где под вокселем подразумевается цвет в многомерном пространстве [5]. Это представление области функции переводит геометрическое моделирование на уровень локальной компьютерной геометрии (ЛКГ), основанной на угловой метрике, где длины, площади и объёмы вычисляются посредством интегрирования угловых компонент. Геометрические преобразования (сдвиг, поворот, масштабирование), в отличие от координатных моделей, определяются пересчётом компонентных значений однородного единичного вектора в точке. Координаты точки на задаваемой области определяют пространственную привязку компонент единичного вектора и не влияют на геометрические характеристики объекта. Переход к угловой метрике увеличивает объём необходимой для компьютера информации для оценки геометрических и физических свойств объекта средствами математического анализа.

В работе [6] рассмотрена задача применения проекционных аналитических функций в построении цифровой 3D-модели по чертежу. ЛКГ позволяет получить необходимую геометрическую информацию в дискретно-аналитическом представлении локальными функциями с непрерывным заполнением тела.

Рассмотрению подлежит задача построения функции нулевой границы (нуль-контура чертежа) с заполнением остального рассматриваемого пространства аргументов (в данном случае на плоскости xOy) локальными функциями неявного вида

$$n_1x + n_2y + n_3z + n_4 = 0. \quad (3)$$

Положительные значения z локальных функций (3) располагаются внутри контура, а отрицательные значения z – снаружи. Такое представление функции в R -функциональном моделировании принято называть предикатным, т.е. различающимся по признаку состояния знака её значения [7-9]. Для построения R -функциональной последовательности вычислений применяется специальный компилятор формул.

ЛКГ построена на принципах дифференциального аналитического моделирования с использованием функционально-воксельной модели для компьютерного представления [10-12].

Принципы построения пространства локальных функций изложены в работе [5] и используются в данной статье при описании функции локального обнуления (*FLOZ* – *Function of Local Zeroing*) [13,14].

1 Постановка задачи

Под *FLOZ* понимается алгебраическая функция или конструкция из алгебраических функций, позволяющая формировать из нулевых значений некоторый геометрический сегмент на заданной области.

В [14] *FLOZ* задаётся следующей конструкцией, состоящей из уравнений расстояния между точками $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ и текущей точкой $P(x, y)$, заданной на области:

$$\begin{aligned} z_{FLOZ} &= d_1 + d_2 - d, \\ d &= \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}, \\ d_1 &= \sqrt{(y_1 - y)^2 + (x_1 - x)^2}, \\ d_2 &= \sqrt{(y - y_2)^2 + (x - x_2)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

При построении отрезка нулевых значений (4) квадратично уменьшается значение z_{FLOZ} при приближении к нуль-отрезку [13]. При этом не удаётся получить линейчатую поверхность, более чётко формирующую отрезок в каждой его точке.

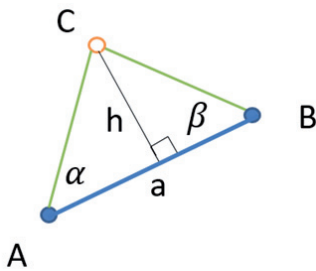


Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация FLOZ

Предлагается воспользоваться формулировкой определения расстояния от произвольной точки C на плоскости до прямой, заданной отрезком AB (см. рисунок 2). Это расстояние равно высоте h треугольника $\triangle ABC$, образуемого точкой C и отрезком AB . В первом случае, если углы α и $\beta \leq 90^\circ$:

$$h = \frac{(y_A - y_B)x_C - (x_A - x_B)y_C + (x_A y_B - x_B y_A)}{\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}}. \quad (5)$$

Во втором случае α или $\beta > 90^\circ$. При этом применяется следующая формулировка условий:

$$\begin{cases} \alpha > 90^\circ \rightarrow h = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2}; \\ \beta > 90^\circ \rightarrow h = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Следуя принципам ЛКГ, получается обобщённая локальная функция вида:

$$l_1 x + l_2 y + l_3 z + l_4 = 0. \quad (7)$$

Функция вычисления расстояния до отрезка, согласно (5), представляется линейчатой поверхностью z :

$$z = \frac{(y_A - y_B)x - (x_A - x_B)y + (x_A y_B - x_B y_A)}{\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}}. \quad (8)$$

Для вычисления первого коэффициента локальной функции достаточно получить частную производную по аргументу x :

$$\frac{\partial z}{\partial x} = - \frac{y_A - y_B}{\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}} = l_1. \quad (9)$$

Второй коэффициент локальной функции является частной производной по аргументу y :

$$\frac{\partial z}{\partial y} = - \frac{x_A - x_B}{\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}} = l_2. \quad (10)$$

Третий коэффициент l_3 равен единице, поскольку соответствует производной по аргументу z , а четвёртый выражается через локальную функцию (7):

$$l_4 = -l_1 x - l_2 y - l_3 z, \quad (11)$$

где z вычисляется по (8).

Аналогичным образом вычисляются коэффициенты для рассмотренного случая с тупыми углами:

$$\begin{aligned} \text{при } \alpha > \pi/2 \rightarrow l_1 &= - \frac{x - x_A}{\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}}, \\ l_2 &= - \frac{y - y_A}{\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}}, l_3 = 1, \\ z &= \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}, \quad l_4 = -l_1 x - l_2 y - l_3 z, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \beta > \pi/2 \rightarrow l_1 &= - \frac{x - x_B}{\sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2}}, \\ l_2 &= - \frac{y - y_B}{\sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2}}, l_3 = 1, \\ z &= \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2}, \quad l_4 = -l_1 x - l_2 y - l_3 z. \end{aligned} \quad (13)$$

Алгоритм вычисления $FLOZ$ можно представить следующей записью:

если $\left(\alpha < \frac{\pi}{2} \text{ и } \beta < \frac{\pi}{2}\right)$, то формулы (8 – 11);

в противном случае $\left\{\text{если } \left(\alpha \geq \frac{\pi}{2}\right), \text{ то формула (12); если } \left(\beta \geq \frac{\pi}{2}\right), \text{ то формула (13)}\right\}$.

Из постановки следует, что значения z полученной функции всегда будут положительными, и это противоречит принципам R -функционального моделирования, где предусматривается пересечение или объединение положительных или отрицательных областей. Для построения сложного контура это является удобным, поскольку исключает эффект «отсечения» выстраиваемой положительной области объекта при процедуре пересечения с новым направлением отрезка контура. На рисунке 3 показано графическое представление полученной $FLOZ$ для заданных точек в виде четырёх М-образов ФВ-модели, цвет которых кодируется согласно (2) с предварительным нормированием полученных l_i :

$$n_i = \frac{l_i}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2}}. \quad (14)$$

Сохранение последовательности ФВ-моделей на каждом этапе построения сложного нуля-контура посредством наращивания вычисляемых $FLOZ$ оператором конъюнкции [1] позволяет получить сценарий для возможного возврата на один или несколько шагов расчёта в процессе конструирования контура сложного чертежа.

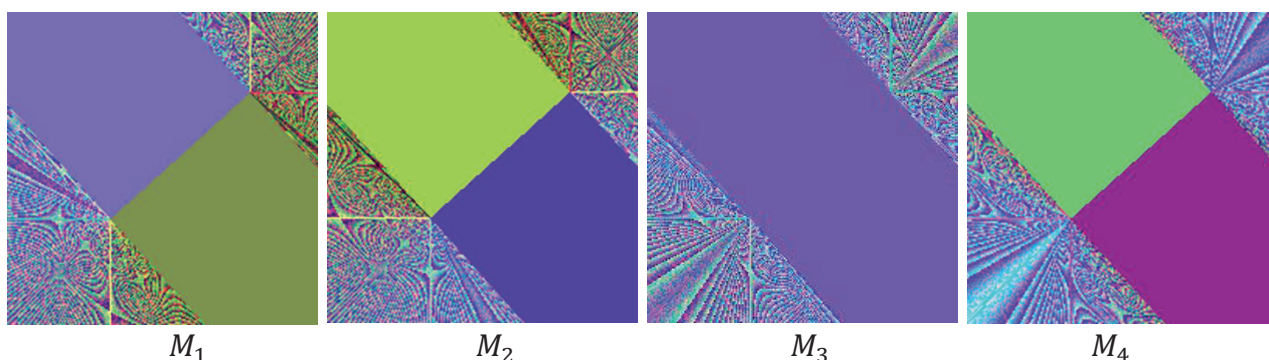


Рисунок 3 – Функционально-воксельная модель из четырёх М-образов

Если рассмотреть конъюнкцию для функций $z = z_1 + z_2 - \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$, то можно заметить, что при любом из аргументов, равном нулю, обнуляется всё выражение.

На рисунке 4 представлено построение замкнутого нуля-контура посредством последовательных пересечений локальной функции $FLOZ$, задаваемой очередной точкой контура, с локальной функцией, получаемой из М-образов текущей ФВ-модели:

$$\begin{aligned} z^{(\text{ФВМ})} &= -l_1^{(\text{ФВМ})}x - l_2^{(\text{ФВМ})}y - l_4^{(\text{ФВМ})}, \\ z^{(FLOZ)} &= -l_1^{(FLOZ)}x - l_2^{(FLOZ)}y - l_4^{(FLOZ)}, \\ l_i^{(\text{ФВМ} \wedge FLOZ)} &= l_i^{(\text{ФВМ})} + l_i^{(FLOZ)} - \left(\frac{l_i^{(\text{ФВМ})}z^{(\text{ФВМ})} + l_i^{(FLOZ)}z^{(FLOZ)}}{\sqrt{(z^{(\text{ФВМ})})^2 + (z^{(FLOZ)})^2}} \right), \\ l_3^{(\text{ФВМ})} &= 1, i = 1, 2, 4. \end{aligned} \quad (15)$$

В скобках указан вид локальной функции, к которой относится компонента l_i .

На рисунке 5 показана ФВ-модель для законченного построения выпуклого контура.

На рисунке 6 приведена последовательность построения замкнутого невыпуклого контура посредством операции пересечения локальной $FLOZ$, задаваемой последующей точкой контура с локальной функцией, получаемой из М-образов текущей ФВ-модели.

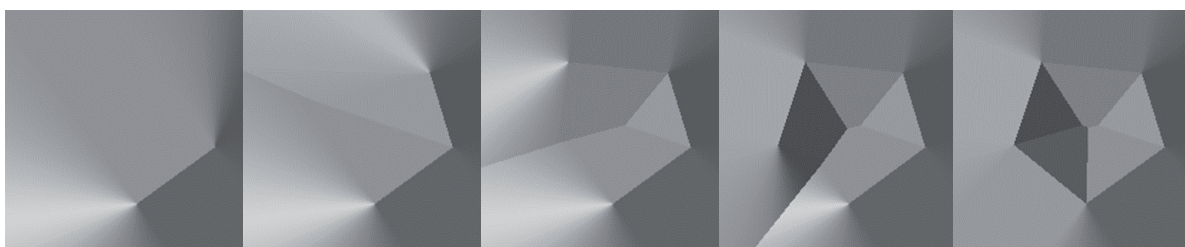


Рисунок 4 – Последовательность построения контура

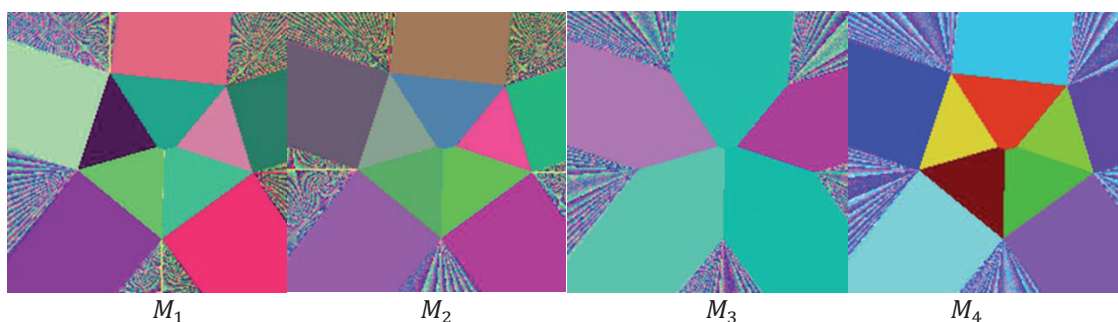


Рисунок 5 – Функционально-воксельная модель из четырёх М-образов, хранящая локальные функции описания выпуклого контура

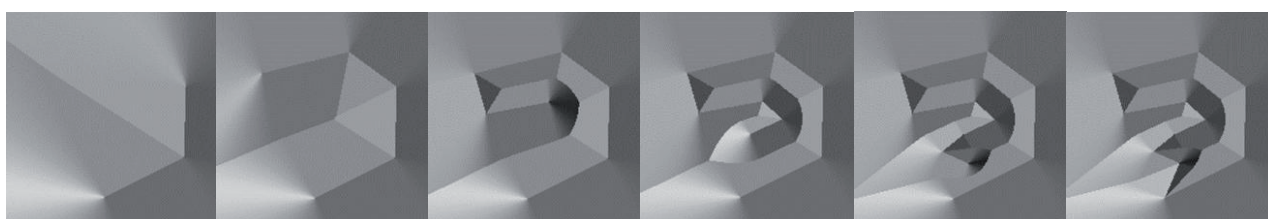


Рисунок 6 – Последовательность построения замкнутого невыпуклого контура

На рисунке 7 представлена ФВ-модель завершённого построения невыпуклого контура.

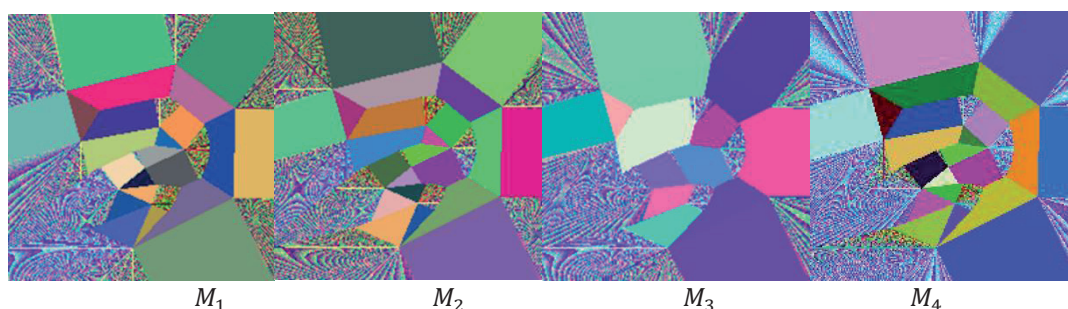


Рисунок 7 – Функционально-воксельная модель из четырёх М-образов, хранящая локальные функции описания невыпуклого контура

Пример построения контура по заданному чертежу (см. рисунок 8). Для вращения относительно оси Oz рисунок 8а повернут на 90^0 и обрезан вдоль этой оси (см. рисунок 8б).

Для организации вращения достаточно указать половину точек контура, расположенных справа (или слева) от оси. На рисунке 9 показово представлен процесс формирования объекта при последовательном указании характерных точек вдоль линии чертежа.

Для применения полученного контура в моделировании вращения необходимо задать область отрицательных значений локальной функции для внешних точек, не принадлежащих

объекту (см. рисунок 10). Для этого указывается любая точка вне контура и применяется алгоритм заливки, как показано на рисунке 10а.

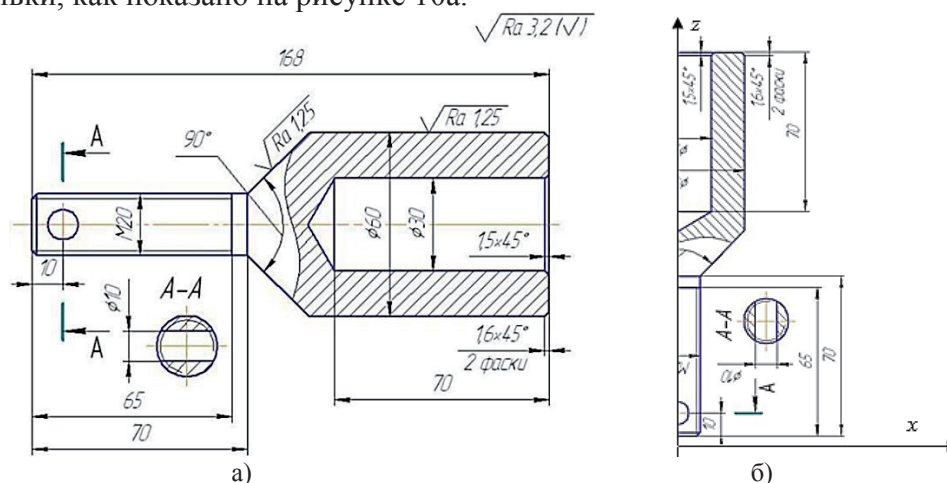


Рисунок 8 – Чертёж детали для построения фигуры вращения (пример)



Рисунок 9 – Построение контура по заданным точкам чертежа

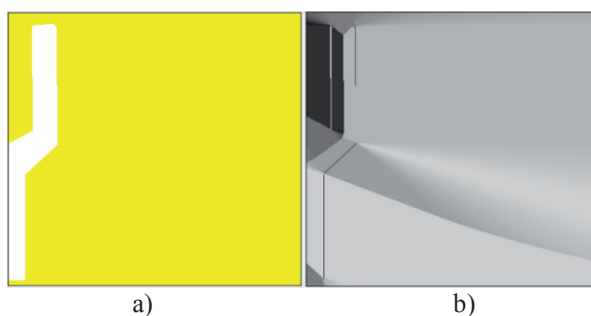


Рисунок 10 – Заливка (а) и инвертирование цвета (б) в зоне отрицательных значений локальной функции

Для получения отрицательного значения локальной функции в точках достаточно инвертировать цвет в этих точках М-образа (рисунок 10б). На рисунке 11 показан окончательный вариант ФВ-модели для применения функции вращения.

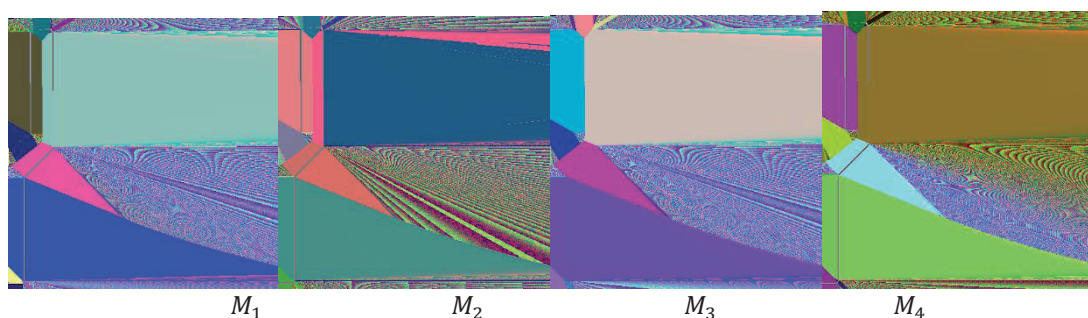


Рисунок 11 – Функционально-воксельная модель из четырёх М-образов, содержащая локальные функции описания контура вращения с учётом области отрицательных значений локальной функции

В работе [6] описан принцип построения трёхмерной ФВ-модели фигуры вращения. Он сводится к пересчёту плоской локальной функции $n_1x + n_3z + n_4u + n_5 = 0$, заданной в плоскости xOz , в локальную функцию $\left(|n_1| \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)x + \left(|n_1| \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)y + n_3z + n_4u + n_5 = 0$ с переходом в пространство $Oxyz$.

На рисунке 12 показана схема композиции из пяти М-образов, описывающих 3D-область аргументов локальной функции для детали, которая представлена в центре композиции.

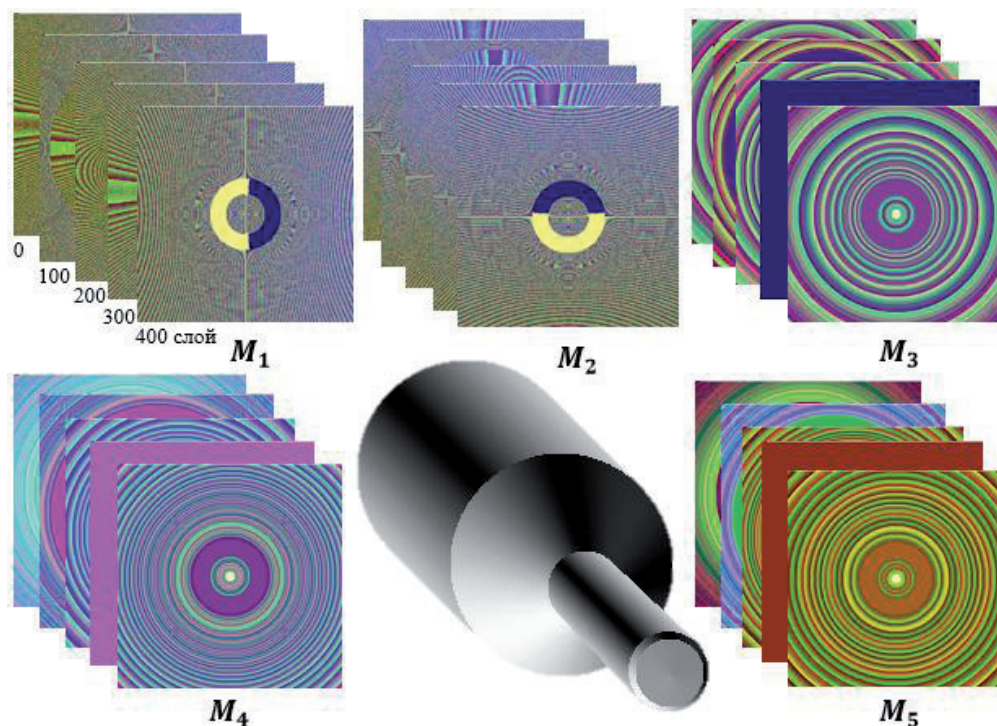


Рисунок 12 – Трёхмерная функционально-воксельная модель и результат построения фигуры вращения

Заключение

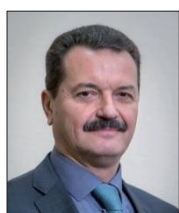
Принцип конструирования чертежа по его контуру с помощью *FLOZ* может быть положен в основу дальнейшего развития средств твёрдотельного моделирования. Данный подход, благодаря дифференциальному компьютерному представлению геометрии, позволит точно описывать объекты и их характеристики в процессе проектирования. Разработанный инструмент *FLOZ*, как генератор линейчатой поверхности с отрезком нулевых значений, упрощает создание аналитического представления проекции нулевых границ объекта для пространственного *R*-функционального моделирования. По такому же принципу может быть построена *FLOZ* для сегмента дуги, заданного двумя точками и радиусом, а также реализован алгоритм построения параметрической кривой, последовательно заполняемой нуль-отрезками.

Разработанные принципы моделирования позволяют свести трудоёмкую процедуру написания математических конструкций к стандартным процедурам проектировщика – указанию опорных точек, обеспечивая построение компьютерной модели, полностью соответствующей модели, описанной алгебраическими функциями.

Список источников

- [1] **Рвачев В.Л.** Об аналитическом описании некоторых геометрических объектов. Доклады Академии наук СССР. 1963. Т.153. №4. С.765–767.
- [2] **Бездитный А.А.** Точечное исчисление как онтологическая основа представления геометрических объектов в проектировании. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59), С.87-97. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-87-97
- [3] **Конопацкий Е.В., Ротков С.И., Логунова М.В., Бессольнов М.В.** Подход к твердотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55), С.24-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33
- [4] **Максименко-Шейко К.В., Шейко Т.И., Толок А.В.** R-функции в аналитическом проектировании с применением системы "РАНОК". *Вестник МГТУ Станкин*. М.: МГТУ "Станкин", 2010. № 4. С.139-151.
- [5] **Толок А.В., Толок Н.Б.** Локальная компьютерная геометрия. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2025. 228 с.
- [6] **Толок А.В., Толок Н.Б.** Проекционный принцип построения функционально-воксельных моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4. С.523-534. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-523-534
- [7] **Максименко-Шейко К.В.** R-функции в математическом моделировании геометрических объектов и физических полей. Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2009. 306 с.
- [8] **Литвинова Ю.С., Максименко-Шейко К.В., Шейко Т.И.** Аналитическая идентификация трёхмерных геометрических объектов по информации о форме их сечений. *Проблемы машиностроения*. 2017. №1(20). С.45-51. EDN: YHXITN.
- [9] **Чопоров С.В., Лисняк А.А., Гоменюк С.И.** Использование функций В.Л. Рвачёва для геометрического моделирования областей сложной формы. *Прикладная информатика*. 2010. №2(26). С.109-122.
- [10] **Локтев М.А.** Особенности применения функционально-воксельного моделирования в задачах поиска пути с препятствиями. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2016. №1. С.45-49.
- [11] **Лоторевич Е.А.** Принципы пространственной визуальной компоновки аналитических моделей, отображённых в воксельном графическом пространстве. *Технология машиностроения*. 2013. №11. С.59-63.
- [12] **Сычева А.А.** Функционально-воксельное моделирование кривых Безье. *Геометрия и графика*. 2021. Т.9, №4. С.63-72.
- [13] **Локтев М.А., Разумовский А.И., Сычева А.А., Харланова П.М.** Функционально-воксельное моделирование кривой Безье. *Перспективы науки*. 2020. №11(134). С.196-198.
- [14] **Tolok A.V., Tolok N.B.** Local R-Functional Modelling (LRFM) / Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2021; Nizhny Novgorod, Russia). Н. Новгород: CEUR Workshop Proceedings, 2021. Vol. 3027. С. <http://ceur-ws.org/Vol-3027/paper64.pdf>.

Сведения об авторах



Толок Алексей Вячеславович, 1961 г. рождения. Окончил Горьковский инженерно-строительный институт им. В.П. Чкалова в 1984 г., к.т.н. (1992), д.т.н. (2004); профессор, заведующий лабораторией компьютерной графики ИПУ РАН. Научные интересы: функционально-воксельное моделирование в компьютерных технологиях, R-функциональное моделирование, САПР, системы управления, теория графов. Researcher ID (WoS): V-7594-2019, Author ID (Scopus): 28268055700, Author ID (РИНЦ): 452677. ORCID: 0000-0002-7257-9029, tolok_61@mail.ru. ✉



Толок Наталия Борисовна, 1974 г. рождения. Окончила Московский технический университет связи и информатики в 1996 г., к.т.н. (2000); старший научный сотрудник ИПУ РАН. Научные интересы: функционально-воксельное моделирование в компьютерных технологиях, R-функциональное моделирование, математическое моделирование в экономике. Researcher ID (WoS): AAI-3684-2021, Author ID (Scopus): 57193099901, Author ID (РИНЦ) 452678. ORCID: 0000-0002-5511-4852. SPIN-код: 8581-0422, nat_tolok@mail.ru.

Поступила в редакцию 02.02.2026, после рецензирования 17.06.2026. Принята к публикации 25.06.2026.



Local zeroing function in geometric modeling with algebraic functions

© 2026, A.V. Tolok ✉, N.B. Tolok

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

An interactive principle of geometric modeling with algebraic functions is considered for the automated construction of a spatial solid digital model from two-dimensional drawings. The application of R-functional modeling to the description of complex geometric contours defined by drawings using algebraic functions has two major drawbacks: the difficulty of constructing a zero contour from specified points in a drawing and the high computational cost associated with compiling formulas for computer calculations. This paper describes an approach to implementing a shape-generation law for constructing the zero-boundary contour (zero contour) of a drawing object, which enables the dynamic generation of an R-functional predicate function for a solid geometric object. A local zeroing function for a line segment defined by two specified points is considered. The principles of computer-aided construction of drawing contours are discussed, based on the sequential construction of a zero-contour function from zero-segment functions using the local zeroing function. The modeling algorithm stores the current state of the zero-contour function computation in a functional-voxel model for use at the subsequent step of R-functional intersection with a new zero-segment function. Sequential storage of functional-voxel models makes it possible to return to previous design steps. This approach enables the construction of a zero-contour surface in a digital 3D model using an analytical law of rotation. The developed tools can be considered an additional means of solving the problem of 3D modeling from two-dimensional projections.

Keywords: *R-function, projection, functional-voxel model, M-image, law of rotation, local zeroing function, solid modeling.*

For citation: Tolok AV, Tolok NB. Local zeroing function in geometric modeling with algebraic functions [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(3): 454-464. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-454-464.

Financial Support: The research was carried out within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, direction No.9 “Artificial intelligence and big data in technical, industrial, natural and social systems.”

Authors' contributions: Tolok A.V. – principles of applying local geometry to the analytical modeling of geometric objects; Tolok N.B. – practical validation of the principles and their computer implementation using illustrative examples.

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

List of figures

- Figure 1 – Contour construction in the Antimony system
- Figure 2 – Geometric interpretation of the local zeroing function (FLOZ)
- Figure 3 – Functional-voxel model composed of four M-images
- Figure 4 – Sequence of contour construction
- Figure 5 – Functional-voxel model composed of four M-images storing local functions describing a convex contour
- Figure 6 – Sequence of constructing a closed non-convex contour
- Figure 7 – Functional-voxel model composed of four M-images storing local functions describing a non-convex contour
- Figure 8 – Drawing of a part for constructing a figure of revolution (example)
- Figure 9 – Contour construction from specified drawing points
- Figure 10 – Filling (a) and color inversion (b) in the region of negative values of the local function
- Figure 11 – Functional-voxel model composed of four M-images containing local functions describing the contour of revolution with allowance for the region of negative values of the local function
- Figure 12 – Three-dimensional functional-voxel model and the resulting solid of revolution

References

- [1] **Rvachev VL.** On the Analytical Description of Some Geometric Objects [In Russian]. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1963; 153(4): 765–767.
- [2] **Bezditny AA.** Point Calculus as an Ontological Basis for Representing Geometric Objects in Design [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(1): 87–97. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-87-97.
- [3] **Konopatsky EV, Rotkov SI, Logunova MV, Bessolnov MV.** An Approach to Solid Modeling of Geometric Objects in Point Calculus [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(1): 24–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.
- [4] **Maksimenko-Sheiko KV, Sheiko TI, Tolok AV.** R-functions in analytical design using the RANOK system [In Russian]. *Bulletin of MSTU Stankin*. 2010; 4: 139–151.
- [5] **Tolok AV, Tolok NB.** Local computer geometry [In Russian]. Moscow: IPR Media, 2025. 228 p.
- [6] **Tolok A.V., Tolok N.B.** Projection principle for constructing functional-voxel models [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(4): 523–534. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-523-534.
- [7] **Maksimenko-Sheiko KV.** R-functions in mathematical modeling of geometric objects and physical fields [In Russian]. Kharkov: IPME NAS of Ukraine, 2009. 306 p.
- [8] **Litvinova YuS, Maksimenko-Sheiko KV, Sheiko TI.** Analytical identification of three-dimensional geometric objects based on information about the shape of their sections [In Russian]. *Problems of mechanical engineering*. 2017; 1(20): 45–51. EDN: YHXITN.
- [9] **Choporov SV, Lisnyak AA, Gomenyuk SI, Using VL.** Rvachev functions for geometric modeling of complex-shaped areas [In Russian]. *Applied Informatics*. 2010; 2(26): 109–122.
- [10] **Loktev MA.** Features of the application of functional-voxel modeling in problems of finding a path with obstacles [In Russian]. *Information Technologies in Design and Production*. 2016; 1: 45–49.
- [11] **Lotorevich EA.** Principles of spatial visual layout of analytical models displayed in voxel graphic space [In Russian]. *Mechanical Engineering Technology*. 2013; 11: 59–63.
- [12] **Sycheva AA.** Functional-voxel modeling of Bezier curves [In Russian]. *Geometry and Graphics*. 2021; 9(4): 63–72.
- [13] **Loktev MA, Razumovsky AI, Sycheva AA, Kharlanova PM.** Functional-voxel modeling of the Bezier curve [In Russian]. *Prospects for Science*. 2020; 11(134): 196–198.
- [14] **Tolok AV, Tolok NB.** Local R-Functional Modelling (LRFM). *Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2021; Nizhny Novgorod, Russia)*. CEUR Workshop Proceedings, 2021. Vol.3027. <http://ceur-ws.org/Vol-3027/paper64.pdf>.

About the authors

Aleksey Vyacheslavovich Tolok (b. 1961) graduated from the Gorky Civil Engineering Institute named after V.P. Chkalov in 1984, Candidate of Technical Sciences (1992), Doctor of Technical Sciences (2004); Professor, Head of the Computer Graphics Laboratory at the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. Research interests include functional-voxel modeling in computer technologies, R-functional modeling, CAD, control systems, and graph theory. Researcher ID (WoS): V-7594-2019, Author ID (Scopus): 28268055700, Author ID (РИНЦ): 452677. ORCID: 0000-0002-7257-9029, tolok_61@mail.ru. ✉

Natalia Borisovna Tolok (b. 1974) graduated from the Moscow Technical University of Communications and Informatics in 1996, Candidate of Technical Sciences (2000); Senior Researcher at the Institute of Control Systems of the Russian Academy of Sciences. Research interests include functional-voxel modeling in computer technology, R-functional modeling, and mathematical modeling in economics. Researcher ID (WoS): AAI-3684-2021, Author ID (Scopus): 57193099901, Author ID (РИНЦ) 452678. ORCID: 0000-0002-5511-4852. SPIN-код: 8581-0422, nat_tolok@mail.ru.

Received February 02, 2026, Revised June 17, 2026. Accepted June 25, 2026.



Онтологическая декомпозиция задачи технического зрения в дискретном производстве

© 2026, В.А. Печенин ✉, А.И. Хаймович

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

Аннотация

Предлагается онтологически ориентированный подход к автоматизации учёта состояния производственного передела в дискретном производстве. Разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий идентификацию деталей в производственных тарах с использованием технологий технического зрения и каскадного алгоритма на основе свёрточных нейронных сетей. Выполнена онтологическая декомпозиция задачи: вместо обучения одной универсальной модели нейронной сети применяется иерархия специализированных моделей, активируемых на основе онтологических маркеров (*ArUco*, *QR*-коды). Такой подход позволяет на 50-70% снизить требуемый объём обучающих данных при сохранении точности детектирования в условиях «информационного шума» (освещённость, ориентация тары, посторонние объекты). В разработанном комплексе формализованы знания о структуре производственной тары, её состояниях, отношениях и неопределённостях в дискретном производстве. Сравнительный анализ решения экспериментальных задач подтверждает эффективность предложенного метода для прослеживаемости материальных потоков в гибких производственных системах.

Ключевые слова: онтологическая декомпозиция, техническое зрение, производственная тара, дискретное производство, прослеживаемость, неопределённость, машинное обучение.

Цитирование: Печенин В.А., Хаймович А.И. Онтологическая декомпозиция задачи технического зрения в дискретном производстве. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.465-476. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-465-476.

Финансирование: подготовка статьи поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSSS-2024-0019).

Вклад авторов: Печенин В.А. – постановка задачи, разработка онтологической модели и каскадного алгоритма, проведение экспериментов, обработка и анализ результатов; Хаймович А.И. – формулировка онтологического подхода к задаче, интерпретация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современное машиностроительное производство характеризуется высокой степенью гибкости и широкой номенклатурой выпускаемой продукции. Гибкие производственные системы обеспечивают автоматизацию процессов планирования и контроля, однако остаются уязвимыми к ошибкам, связанным с человеческим фактором при учёте материальных потоков и состояния производственных переделов. Это особенно важно в дискретном производстве, где партии деталей перемещаются в тарах, а автоматическая прослеживаемость каждой детали внутри тары затруднена из-за изменения размеров деталей в процессе обработки и необходимости маркировать каждую единицу.

Системы управления производством оперируют неявными, распределёнными по людям знаниями, что приводит к высокой проектной неопределённости и ошибкам. Отсутствует явная формализация знаний субъектов проектирования (технологов, операторов, конструкторов) о структуре и возможных состояниях производственных объектов и процессов [1, 2]. В онтологии проектирования рассматриваются методы формализации знаний о проектируемых

объектах, процессах и среде их функционирования [3]. Формирование онтологических моделей предметной области (ПрО) позволяет систематизировать знания экспертов [4] и использовать их при создании интеллектуальных систем поддержки принятия решений и автоматизации проектной и производственной деятельности [5].

Активно развиваются исследования, связанные с применением онтологических моделей в задачах технического зрения (ТЗр) и интеллектуального производства. В [6] предложен подход к применению систем ТЗр на производстве, в котором результаты ТЗр семантически связываются с онтологической моделью производственных событий. Показано, что использование семантического уровня позволяет повысить интерпретируемость результатов распознавания и упростить интеграцию систем ТЗр с информационными системами.

В [7] разработана онтология производственных процессов, предназначенная для формального представления структуры производственного потока, оборудования и операций; показана возможность использования онтологий для динамического управления производственными сценариями и повышения согласованности данных между различными уровнями цифрового производства.

В [8] предложен онтологически ориентированный конвейер построения цифровых двойников производственных систем. Онтология используется как средство формализации структуры оборудования, параметров процессов и взаимосвязей между компонентами системы.

В [9] онтологии используются для интеграции данных сенсорных систем и ТЗр в промышленной среде. Онтологическое описание объектов и процессов позволило унифицировать данные от различных источников и повысить устойчивость системы к неопределённости и шуму.

В [10] проведён анализ производственных онтологий в Индустрии 4.0, включая семантическое описание оборудования, маршрутов обработки, логистики и интеллектуальных систем контроля качества.

В [11] предложен подход к объединению методов ТЗр и семантических связей для анализа производственных сцен. Семантическая интерпретация позволяет распознавать объекты, выполнять логическую проверку корректности наблюдаемых состояний и выявлять нештатные ситуации.

Целью настоящей статьи является описание разработки и экспериментального обоснования онтологически ориентированного подхода к автоматизации учёта состояния производственного передела в дискретном производстве на основе каскадного алгоритма (КА) машинного обучения (МО), обеспечивающего высокую точность идентификации при ограниченных объёмах данных. В данной статье онтологическая модель используется как средство формального описания производственного объекта и как основа для онтологически ориентированной декомпозиции задачи ТЗр на иерархию специализированных моделей МО.

1 Онтологическая декомпозиция задачи технического зрения

На рисунке 1 приведена схема онтологии задачи автоматизированной идентификации содержимого производственных тар (ПТ). Онтология ПТ включает:

- модель объекта (классы «тара», «ячейка», «деталь», «маркер», атрибуты типоразмера, материала, допустимого содержимого);
- модель состояний (пустая/занятая ячейка, наличие/отсутствие маркера, ориентация);
- модель отношений (однозначное соответствие: «ID детали – ID тары – номер ячейки», «тара - технологический маршрут», «ячейка - допустимый класс детали»);
- модель неопределённости и «информационного шума» (классы отклонений: освещённость, угол поворота, частичное перекрытие, посторонние объекты).

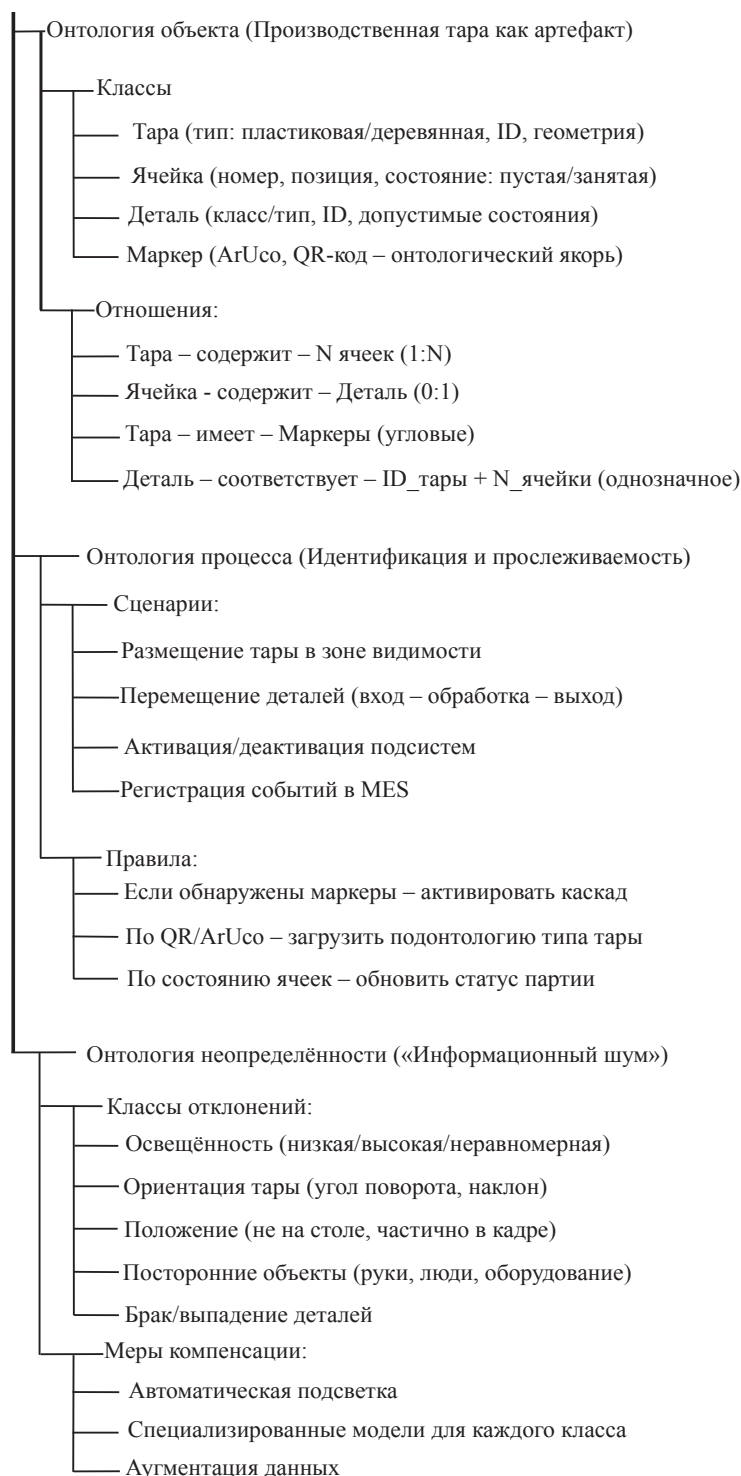


Рисунок 1 – Схема онтологии задачи автоматизированной идентификации содержимого производственных тар

Для формализации ПрО разработана прикладная онтология ПТ, описывающая классы объектов, их свойства и ограничения. Основные элементы онтологии приведены в таблице 1.

Онтология позволяет выполнять семантические запросы к состоянию производственного передела. Примеры запросов: определить все занятые ячейки тары заданного типа; проверить соответствие типа детали типу тары; выявить случаи отсутствия маркеров; определить изображения с высоким уровнем неопределённости.

Таблица 1 – Основные классы и свойства онтологии производственной тары

Класс	Описание	Обозначения свойств на формальном языке	Ограничения
Тара	Производственная тара с фиксированной геометрией	<i>hasCell, hasMarker, containerType</i>	Тара должна содержать не менее одной ячейки
Ячейка	Локальная область хранения детали	<i>containsPart, cellID, cellState</i>	Ячейка может содержать не более одной детали
Деталь	Деталь определённого типа	<i>partType, partID</i>	Тип детали должен соответствовать типу тары
Маркер	Визуальный идентификатор	<i>markerType, markerID</i>	Каждый маркер принадлежит только одной таре
	Маркер пространственной ориентации <i>ArUco</i>	<i>activatesCascade</i>	Используется для активации каскада
	Маркер типа тары <i>QR</i> -код	<i>containerTypeID</i>	Определяет допустимый набор деталей

На схеме (см. рисунок 1) используется иерархическая онтология, где каждый уровень соответствует онтологии объекта, процесса и неопределённости. Маркеры используются как онтологические якоря, обеспечивающие активацию онтологий и моделей.

Под онтологической декомпозицией понимается функциональное разделение задачи ТЗр на последовательность подзадач (детектирование маркеров - выбор специализированных моделей - детектирование ячеек - классификация содержимого) и формализацию взаимосвязей между уровнями обработки данных, объектами ПрО и соответствующими моделями.

Использованы следующие принципы построения онтологии задачи ТЗр:

- *Разделение по уровням абстракции.* На верхнем уровне рассматривается ПТ как целостный объект производственного процесса. На нижних уровнях выделяются маркеры, ячейки и отдельные детали. Каждому уровню соответствует модель МО.
- *Инкапсуляция знаний о классе объектов.* Для каждого типа тары формируется фрагмент онтологии, включающий типы ячеек, деталей и состояний.
- *Наследование свойств и ограничений.* Тип тары, определяемый по *QR*-маркеру, задаёт ограничения для последующих этапов обработки: допустимые типы ячеек, наборы деталей и сценарии эксплуатации.
- *Композиция результатов распознавания.* Итоговое состояние ПТ формируется путём объединения результатов отдельных моделей в единую семантическую структуру: *Тара → Ячейка → Деталь → Состояние ячейки → Состояние тары*.

2 Онтологически управляемый каскадный алгоритм

В разработанном КА МО вместо использования одной универсальной модели на всём множестве классов ПрО используется многоуровневая онтология задачи (см. рисунок 2).

Предложенный каскад представляет собой формализацию знаний эксперта-технолога о процессе идентификации в виде иерархии решающих правил и специализированных моделей. *QR*-код и *ArUco*-маркеры позволяют в реальном времени подгружать нужный фрагмент онтологии ПрО и активировать соответствующие процедуры детектирования. Онтология используется для динамической валидации распознанных состояний ПТ и проверки согласованности результатов работы КА. После завершения этапов детектирования и классификации формируется семантическое описание текущего состояния тары в виде набора фактов:

$$\{Тара_i, Ячейка_i, Деталь_i, Состояние_i\}.$$

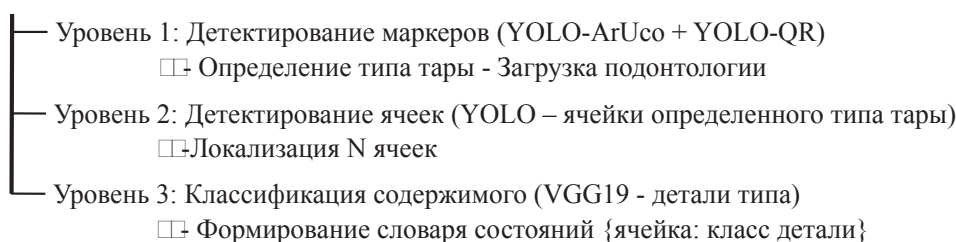


Рисунок 2 – Многоуровневая онтология задачи

Полученные факты проверяются на соответствие ограничениям ПрО, заданным в онтологии. В частности, выполняется контроль:

- соответствия типа детали типу тары;
- допустимости размещения детали в конкретной ячейке;
- отсутствия одновременно нескольких деталей в одной ячейке;
- технологического маршрута партии;
- наличия обязательных маркеров идентификации.

Например, если после распознавания система получает состояние: $Ячейка_{12} \rightarrow Деталь_B$, а онтология определяет, что для тары типа $Ячейка_{12}$ допустимы только детали типа $Деталь_A$, формируется сообщение о логическом противоречии и событие классифицируется как нештатная ситуация.

Онтология может использоваться для поддержки оператора производственного участка. При обнаружении противоречивых состояний система способна автоматически формировать рекомендации: проверить корректность загрузки тары; выполнить повторное сканирование; удалить посторонний объект из зоны видимости; направить тару на дополнительную проверку и др. В разработанном комплексе онтология определяет декомпозицию задачи и выполняет функцию семантической верификации состояний производственного передела.

Пусть для одного изображения X нужно принять четыре решения (метку):

- Y_1 – есть ли $ArUco$ на таре (число возможных состояний $K_1=2$).
- Y_2 – есть ли QR -код на таре ($K_2=2$).
- Y_3 – детектировать ячейки тары ($K_3=2$).
- Y_4 – заполненность ячейки типом детали по QR -коду или пустая ячейка ($K_4=2$).

Декомпозиция задачи ТЗр приводит к снижению требуемого объема обучающих данных за счёт факторизации исходной многомерной задачи распознавания на иерархию более простых и онтологически однородных подзадач. В традиционной постановке одна нейронная сеть обучается аппроксимации совместного апостериорного распределения:

$$P(Y_1, \dots, Y_4 | X) = \frac{P(X | Y_1, \dots, Y_4) P(Y_1, \dots, Y_4)}{P(X)}. \quad (1)$$

Число возможных состояний такой совместной метки растёт мультипликативно, что приводит к экспоненциальному увеличению требуемого объема обучающих данных.

В предложенном подходе структура задачи определяется онтологией объекта и процесса, что позволяет аппроксимировать факторизованное распределение вида:

$$P(Y_1, \dots, Y_4 | X) \approx \prod_{i=1}^4 P(Y_i | X, \theta_i), \quad (2)$$

где θ_i – соответствующий фрагмент онтологии (тип тары, класс деталей, структура ячеек).

Такая факторизация отражает физический и технологический смысл процесса и реализуется в виде каскада специализированных моделей.

Использование $ArUco$ - и QR -кодов дополнительно снижает энтропию подзадач, поскольку тип тары и допустимые классы деталей определяются маркером. В результате каждая специализированная модель обучается в узком, семантически однородном подпространстве без смешения геометрий, масштабов и типов объектов.

3 Решение экспериментальных задач

В МО автоматическому распознаванию используются нескольких видов деталей, находящихся в ячейках ПТ. Детали перемещались в ПТ с обрешёткой, в каждой ячейке могла находиться одна деталь. Необходимо выделить и классифицировать ячейки ПТ как пустые или содержащие детали, а также определить *ArUco*- и *QR*-коды.

Исходные данные представляли собой набор видеозаписей с двумя типами ПТ с ячейками, в каждой из которых могла находиться одна из множества деталей или же ячейка могла быть пустой. Каждый видеокادر использовался для обучения модели, где важно было распознать присутствие деталей, учесть их тип, а также тип *QR*-кодов (обычный или *ArUco*-). Обучение нейронных сетей проводилось с использованием видеокарты *NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti* с 12Гб видеопамати.

В разработанном программно-аппаратном комплексе для съёмки использовались *Web*-камера *Logitech* и *IP*-камера *DH-IPC-HFW5442EP-ZE*. Аппаратная часть комплекса включала также: системный блок *Hiper M9 Cel G5905 (3.5) 4Gb SSD128Gb UHDG 610*; штатив *Hama Action 165 3D* для закрепления камер; коммуникационный модуль для включения автоматической подсветки и сигнала оператору; сигнальную лампу и светодиодную лампу подсветки. В качестве устройства ввода-вывода использован персональный компьютер, а коммуникационный модуль представлял собой аппаратное устройство, подключаемое к компьютеру по *USB*-порту и выполняющее включение/выключение светодиодной и сигнальной ламп.

3.1 Набор данных

В экспериментах использовались изображения ПТ двух типов, оснащённых *QR*- и *ArUco*-кодами, с размещёнными внутри ПТ тремя типами деталей. В таблице 2 приведены данные для обучения моделей *YOLO* [12], используемых для детектирования ПТ.

Таблица 2 – Используемые данные

Параметр	Одна модель			Каскад моделей			
Объём выборки/ тип объекта	100%	60%	30%	<i>ArUco</i>	<i>QR</i>	Ячейка тары 1	Ячейка тары 2
Обучение	287	146	86	20	20	27	19
Тест	34			8	9	10	7
Проверка	145			28	36	53	28

Исходный набор данных включал 466 уникальных изображений, содержащих различные комбинации положения ПТ, освещённости, и заполненности ячеек. Изображения были поделены в пропорции 69 % и 31 %. Первая группа изображений разделена на обучающую и тестовую выборки в соотношении 90 % и 10 % для универсальной модели детектирования всех классов объектов. Для анализа влияния объёма данных дополнительно формировались обучающие подвыборки, содержащие 30 % и 60 % исходной обучающей выборки. Формирование подвыборок осуществлялось случайным образом с сохранением пропорций классов объектов и типов тар. Вторая группа изображений использовалась как проверочная (не участвующая в обучении) выборка.

Для каскадной модели использовались те же исходные изображения, однако обучающие подвыборки формировались отдельно для каждой специализированной модели. Поскольку каждая модель решала узкую задачу (детектирование только *ArUco*-маркеров, только *QR*-кодов либо ячеек определённого типа тары), из общего набора выбирались только изображения, содержащие соответствующий объект. Таким образом, обучающие выборки каскадной модели являлись специализированными подмножествами единого исходного набора данных. Обучающая выборка составила 30% от данных, используемых в универсальной модели. Те-

стовая и проверочная выборка оставались в прежнем объёме. Для классификации содержимого ячеек выбрана архитектура *VGG19* [13], и для её обучения использовано 1100 взятых фрагмента из изображений, участвующих в обучении и тестировании *YOLO*. На фрагментах изображена ячейка тары с содержимым. 90% составили обучающую выборку, 10% – тестовую. Кроме того, использованы 375 фрагментов фотографий для проверочной выборки, не участвующей в обучении. При формировании подвыборок обеспечивалась сбалансированность по типам тар, типам деталей, состояниям ячеек (пустая/заполненная) и условиям съёмки (освещённость, угол поворота).

3.2 Подход с универсальной моделью нейронной сети

В рамках первого эксперимента обучались универсальные модели *YOLOv5* [14], позволяющие одновременно детектировать маркеры, ячейки тары и детали. Рассматривались три варианта архитектуры, различающиеся числом параметров и вычислительной сложностью: *YOLOv5s (small)* – компактная и быстрая модель; *YOLOv5m (medium)* – модель средней ёмкости; *YOLOv5l (large)* – наибольшая по числу параметров и потенциальной способности. Указанные варианты далее обозначаются соответственно как *Y5-S*, *Y5-M* и *Y5-L*. Обучение проводилось отдельно для каждого объёма обучающей выборки.

Для оценки точности результатов детектирования использовалась метрика $mAP_{\{50\}}$ (*Mean Average Precision*) являющаяся средним значением всех детектируемых классов C (количество N_C) на изображении для метрик AP (*Average Precision*) для каждого класса. Рассчитывалась AP для порога уверенности IoU (*Intersection over Union*) [15] равного 0,5.

$$mAP = \frac{1}{N_C} \sum_{c \in C} AP_c . \quad (3)$$

Результаты расчёта приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты по точности и производительности подхода с универсальной моделью

Модель	Доля обучающей выборки	mAP , %			Время на кадр, с
		Обучение	Тест	Проверочная	
<i>Y5-S</i>	30%	0,840	0,791	0,785	0,073
	50%	0,912	0,870	0,866	
	100%	0,945	0,907	0,895	
<i>Y5-M</i>	30%	0,826	0,786	0,767	0,143
	50%	0,949	0,856	0,874	
	100%	0,922	0,902	0,886	
<i>Y5-L</i>	30%	0,937	0,828	0,842	0,266
	50%	0,921	0,855	0,860	
	100%	0,954	0,897	0,879	

Увеличение времени детектирования между версиями *YOLOv5* коррелирует с ростом количества параметров и вычислительной сложности каждой модели. Между *Y5-S* и *Y5-M* время детектирования увеличивается примерно в 2 раза. Это связано с тем, что модель *Y5-M* имеет почти в 3 раза больше параметров, чем *Y5-S*. Между *Y5-M* и *Y5-L* время детектирования возрастает ещё в 1,9 раза. В среднем время выросло между *Y5-S* и *Y5-L* в 3,6 раза. С ростом модели растёт точность, а при разном объёме выборки точность снижается: для модели *Y5-M* на 11,9%, для модели *Y5-L* – на 3,7%. Полученные результаты показывают, что для используемого объёма данных применение более сложных архитектур не обеспечивает статистически значимого прироста качества по сравнению с компактной моделью *Y5-S*, тогда как время обработки кадра возрастает более чем в 3,5 раза.

3.3 Подход с использованием онтологически ориентированного каскада моделей

Во втором эксперименте применялся каскад специализированных моделей, структура которого определялась онтологией объекта и процесса: *Y5-S* для детектирования *QR*-кодов, *ArUco*-кодов и ячеек тары (отдельная модель для каждого типа тары); *VGG19* для классификации содержимого ячеек (отдельная модель для каждого типа деталей).

Каждая модель обучалась на наборе данных (п. 3.1), соответствующем своей онтологически однородной подзадаче. Для моделей детектирования использовалась метрика mAP (3), для классификационных моделей – точность работы ac , как отношение количества правильно классифицированных изображений N_i к их общему количеству N_{all} :

$$ac = N_i / N_{all} . \quad (4)$$

В таблице 4 приведены результаты расчётов точности и затрат времени отдельно обученных моделей, входящих в онтологически ориентированный каскад.

Таблица 4 – Результаты по точности и производительности моделей каскадного подхода

Подзадача	Модель	mAP			Время на кадр, с
		Обучение	Тест	Проверочная	
Детектирование <i>ArUco</i>	<i>Y5-S</i>	0,996	0,991	0,949	0,071
Детектирование <i>QR</i>		0,977	0,869	0,878	
Ячейки тары 1		0,965	0,925	0,871	
Ячейки тары 2		0,977	0,937	0,844	
Подзадача	Модель	ac			Время на кадр, с
		Обучение	Тест	Проверочная	
Деталь А	<i>VGG19</i>	0,993	0,933	0,928	0,043
Деталь В		1,000	1,000	0,985	
Деталь С		1,000	0,946	0,931	

Затраты времени на обработку одного кадра в каскаде складываются из затрат времени трёх сетей *YOLO*. После детектирования *QR* используется определённая сеть для конкретного типа тары. Кроме того, производится классификация содержимого каждой ячейки использованием определённой (в соответствии с типом тары и партией в ней) сети *VGG* каждой ячейки (в рассматриваемых объектах максимум 12 ячеек). Максимальное время для рассматриваемых объектов как сумма затрат времени отдельно обученных моделей, входящих в каскад, составило 0,729 с.

3.4 Сравнительный анализ подходов

Для оценки качества каскада моделей в целом введена метрика корректной идентификации ячейки (сквозная точность) – mAP_r . Ячейка считалась корректно распознанной, если выполнялись следующие условия:

- проведена корректная активация системы для детектирования по *ArUco*-коду;
- корректно определён тип тары по *QR*-коду;
- ячейка была правильно локализована;
- правильно определено состояние ячейки (пустая или содержащая деталь).

Сквозная точность определялась как отношение числа корректно идентифицированных ячеек N_{c_c} к общему числу ячеек на тестовой выборке N_{c_all} :

$$mAP_r = N_{c_c} / N_{c_all} . \quad (5)$$

Использована метрика mAP_r^* , отражающая накопление ошибок между этапами алгоритма и позволяющая оценить влияние качества отдельных подсистем на итоговый результат:

$$mAP_r^* = mAP_{ArUco} \cdot mAP_{QR} \cdot mAP_{cell_obj} , \quad (6)$$

где mAP_{ArUco} – точность детектирования $ArUco$ -кодов; mAP_{QR} – точность детектирования QR -кодов; mAP_{cell_obj} – точность локализации и определения состояния ячейки.

$$mAP_{cell_obj} = \frac{1}{N_{cell} \cdot N_{obj}} \sum_{j \in C_{cell}} \sum_{i \in C_{obj}} mAP_{cell}^j \cdot ac_i, \quad (7)$$

где N_{cell} – количество типов ячеек из множества C_{cell} ; N_{obj} – количество типов классов объектов в ячейках из множества C_{obj} ; mAP_{cell} – точность детектирования ячеек.

Итоговая сквозная точность дополнительно рассчитывалась непосредственно на тестовой выборке как доля полностью корректно обработанных ячеек mAP_r . В таблице 5 приведено сопоставление подхода с универсальной моделью и онтологически ориентированного подхода по критерию (5) и вычислительной эффективности на проверочной выборке.

Таблица 5 – Сравнение двух подходов по точности и производительности

Подход		Объём обуча- ющих данных	mAP_{ArUco}	mAP_{QR}	mAP_{cell_obj}	mAP_r^*	mAP_r	Время на кадр, с
Универсальная модель	Y5-S	30%	0,823	0,700	0,792	0,457	0,701	0,073
		50%	0,836	0,722	0,880	0,531	0,736	
		100%	0,935	0,744	0,912	0,634	0,768	
	Y5-M	30%	0,858	0,675	0,783	0,454	0,695	0,143
		50%	0,874	0,734	0,892	0,572	0,742	
		100%	0,951	0,758	0,899	0,648	0,781	
	Y5-L	30%	0,804	0,710	0,864	0,493	0,714	0,266
		50%	0,890	0,699	0,881	0,548	0,751	
		100%	0,929	0,750	0,894	0,623	0,772	
Каскад моделей		30%	0,949	0,878	0,815	0,679	0,823	0,729

Каскадный подход обеспечивает более высокую точность на уровне конечной задачи (идентификация состояния ячейки), несмотря на сопоставимые или более низкие значения mAP_r на отдельных этапах. Значения экспериментальной сквозной точности mAP_r оказались выше оценки mAP_r^* , вычисляемой как произведение метрик отдельных этапов каскада. Метрика mAP характеризует качество точности и полноты и зависит от распределения порогов уверенности IoU , поэтому её прямое перемножение приводит к консервативной оценке. Этапы КА являются условно зависимыми: успешное обнаружение $ArUco$ - и QR -кодов уменьшает пространство поиска и снижает вариативность задач локализации и классификации.

Полученные результаты (рост точности с 65 % до 68 % по mAP_r^* и с 77% до 82% по mAP_r при снижении объёма обучающих данных более чем в три раза) показывают эффективность онтологически ориентированного подхода к построению систем МО в задачах ТЗр.

Максимальное время обработки одного кадра с использованием разработанного КА детектирования составило 0,729 с. Максимальное время обработки одного кадра при подходе с универсальной моделью составило 0,143-0,266 с. С учётом специфики рассматриваемой производственной системы (движение деталей малыми партиями) подобный рост времени обработки не критичен для автоматизации процесса.

Заключение

В статье рассмотрен онтологически ориентированный подход на основе технологий ТЗр для идентификации содержимого ПТ. Предложен КА, основанный на принципе онтологической декомпозиции задачи, при котором вместо одной универсальной модели используется иерархия специализированных нейронных сетей: модели *YOLO* применяются для детектирования онтологических якорей ($ArUco$ - и QR -кодов) и ячеек ПТ, а модель *VGG19* – для классификации их содержимого.

Показано, что использование онтологических якорей и декомпозиция задачи позволяют сократить объем требуемой обучающей выборки (на 50-70%) при сохранении точности распознавания и устойчивости к вариациям условий наблюдения.

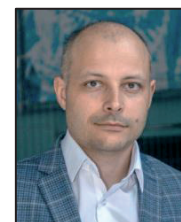
Разработанный программно-аппаратный комплекс автоматизированной идентификации содержимого ПТ показал возможность практического применения в задачах промышленного ТЗр, обеспечивая повышение эффективности МО в условиях ограниченности данных и высокой вариативности номенклатуры, характерных для дискретного производства.

Список источников

- [1] **Боргест Н.М.** Границы онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №1(23). С.7–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.
- [2] **Боргест Н.М.** Научный базис онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2013. Т.3, №1(7). С.7–25.
- [3] **Боргест Н.М.** Онтологии проектирования от Витрувия до Виттиха. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4(30). С.487–522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.
- [4] **Насонов М.А., Манцеров С.А.** Онтологическая модель профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59), С.25-39. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39.
- [5] **Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю.** Использование онтологических шаблонов содержания при построении баз знаний для технического обслуживания и ремонта авиационной техники. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.158-171. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-158-171.
- [6] **Xia K., Saidy C., Kirkpatrick M., Anumbe N., Sheth A., Harik R.** Towards semantic integration of machine vision systems to aid manufacturing event understanding. *Sensors*. 2021. Vol.21, No.13. Art.4276. DOI: 10.3390/s21134276.
- [7] **Yang C., Zheng Y., Tu X., Ala-Laurinaho R., Autiosalo J., Seppänen O., Tammi K.** Ontology-based knowledge representation of industrial production workflow. *Advanced Engineering Informatics*. 2023. Vol.58. Art.102185. DOI: 10.1016/j.aei.2023.102185.
- [8] **Göppert A., Grahn L., Rachner J. et al.** Pipeline for ontology-based modeling and automated deployment of digital twins for planning and control of manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol.34. P.2133–2152. DOI: 10.1007/s10845-021-01860-6.
- [9] **Gonçalves E.M.N., Freitas A., Botelho S.** An AutomationML based ontology for sensor fusion in industrial plants. *Sensors*. 2019. Vol.19, No.6. Art.1311. DOI: 10.3390/s19061311.
- [10] **Sapel P., Molinas Comet L., Dimitriadis I., Hopmann C.** A review and classification of manufacturing ontologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025. Vol.36. P.3669–3693. DOI: 10.1007/s10845-024-02425-z.
- [11] **Liu Z., Zhang A., Wang W.** Combining computer vision with semantic reasoning for on-site safety management in construction. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol.42. Art.103036. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103036.
- [12] **Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A.** You only look once: Unified, real-time object detection. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, USA, 2016. P.779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [13] **Simonyan K., Zisserman A.** Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *Proc. 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*. San Diego, USA, 2015. Vol.1409. P.1556. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
- [14] **Dulal R., Zheng L., Kabir M.A. et al.** Automatic cattle identification using YOLOv5 and mosaic augmentation: A comparative analysis. *arXiv preprint*. 2022. P.1–8. DOI: 10.48550/arXiv.2210.11939.
- [15] **Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., et al.** Generalized intersection over union: a metric and a loss for bounding box regression. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. P.658–666. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00075.

Сведения об авторах

Печенин Вадим Андреевич, 1990 г. рождения. Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева в 2012 г., к.т.н. (2017). Заведующий научно-исследовательской лабораторией "Искусственный интеллект в производственных стемах", доцент кафедры технологий производства двигателей Самарского национального





исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). В списке научных трудов около 150 работ. Author ID (РИНЦ): 793203; Author ID (Scopus): 56401223700; Researcher ID (WoS): F-1835-2017. ORCID: 0000-0003-4961-7338. pechenin.va@ssau.ru. ✉.

Хаймович Александр Исаакович, 1965 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва (1989), д.т.н. (2014). Заведующий кафедрой технологий производства двигателей Самарского университета, г.н.с. Инжинирингового центра Самарского университета. В списке научных трудов более 200 работ. Author ID (РИНЦ): 463931; Author ID (Scopus): 56400927200. ORCID: 0000-0002-9935-5703. khaimovich.ai@ssau.ru.

Поступила в редакцию 30.03.2026, после рецензирования 18.05.2026. Принята к публикации 27.07.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-465-476

Ontological decomposition of a machine vision task in discrete manufacturing

© 2026, V.A. Pechenin ✉, A.I. Khaimovich

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

An ontology-oriented approach to automating the monitoring of production process status in discrete manufacturing is proposed. A hardware and software system has been developed for identifying parts in manufacturing containers using machine vision technologies and a cascade algorithm based on convolutional neural networks. An ontological decomposition of the task is implemented: instead of training a single universal neural network model, a hierarchy of specialized models is employed, with individual models activated on the basis of ontological markers (ArUco markers and QR codes). This approach reduces the required amount of training data by 50–70% while maintaining detection accuracy under conditions of “information noise,” including variations in illumination, container orientation, and the presence of extraneous objects. The developed system formalizes knowledge concerning the structure of manufacturing containers, their states, relationships, and uncertainties in discrete manufacturing. A comparative analysis of experimental results confirms the effectiveness of the proposed method for ensuring material-flow traceability in flexible manufacturing systems.

Keywords: *ontological decomposition, machine vision, manufacturing container, discrete manufacturing, traceability, uncertainty, machine learning.*

For citation: *Pechenin VA, Khaimovich AI. Ontological decomposition of a machine vision task in discrete manufacturing [In Russian]. Ontology of designing. 2026; 16(3): 465-476. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-465-476.*

Financial Support: The preparation of the paper was sponsored by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSSS-2024-0019).

Authors' contributions: *Pechenin V.A.* – problem formulation, development of the ontological model and cascade algorithm, experimental investigation, data processing, and analysis of the results; *Khaimovich A.I.* – formulation of the ontological approach to the problem and interpretation of the results.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Ontology scheme for the automated identification of manufacturing container contents

Figure 2 – Multi-level task ontology

Table 1 – Main classes and properties of the manufacturing container ontology

Table 2 – Data used

Table 3 – Accuracy and performance results of the universal-model approach

Table 4 – Accuracy and performance results for the cascade-approach models

Table 5 – Comparison of the two approaches in terms of accuracy and performance

References

- [1] **Borgest NM.** Boundaries of the ontology of designing [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2017; 7(1): 7–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.
- [2] **Borgest NM.** Scientific basis for the ontology of designing [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2013; 3(1): 7–25.
- [3] **Borgest NM.** The ontologies of designing from Vitruvia to Vittikh [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2018; 8(4): 487–522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.
- [4] **Nasonov MA, Mantserov SA.** Ontological model of preventive maintenance of industrial enterprise equipment [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(1): 25–39. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39.
- [5] **Dorodnykh NO, Nikolaychuk OA, Yurin AY.** Using ontological content patterns in knowledge base engineering for maintenance and repair of aviation equipment [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(2): 158–171. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-158-171.
- [6] **Xia K, Saidy C, Kirkpatrick M, Anumbe N, Sheth A, Harik R.** Towards semantic integration of machine vision systems to aid manufacturing event understanding. *Sensors*. 2021; 21(13): 4276. DOI: 10.3390/s21134276.
- [7] **Yang C, Zheng Y, Tu X, Ala-Laurinaho R, Autiosalo J, Seppänen O, Tammi K.** Ontology-based knowledge representation of industrial production workflow. *Advanced Engineering Informatics*. 2023; 58: 102185. DOI: 10.1016/j.aei.2023.102185.
- [8] **Göppert A, Grahn L, Rachner J et al.** Pipeline for ontology-based modeling and automated deployment of digital twins for planning and control of manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023; 34: 2133–2152. DOI: 10.1007/s10845-021-01860-6.
- [9] **Gonçalves EMN, Freitas A, Botelho S.** An AutomationML based ontology for sensor fusion in industrial plants. *Sensors*. 2019; 19(6): 1311. DOI: 10.3390/s19061311.
- [10] **Sapel P, Molinas Comet L, Dimitriadis I, Hopmann C.** A review and classification of manufacturing ontologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025; 36: 3669–3693. DOI: 10.1007/s10845-024-02425-z.
- [11] **Liu Z, Zhang A, Wang W.** Combining computer vision with semantic reasoning for on-site safety management in construction. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42: 103036. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103036.
- [12] **Redmon J, Divvala S, Girshick R, Farhadi F.** You only look once: Unified, real-time object detection. In: *Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, USA, 2016: 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [13] **Simonyan K, Zisserman A.** Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In: *Proc. 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*. San Diego, USA, 2015. Vol. 1409, p. 1556. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
- [14] **Dulal R, Zheng L, Ashad Kabir M. et al.** Automatic cattle identification using YOLOv5 and mosaic augmentation: A comparative analysis. *arXiv preprint* 2022: 1–8. DOI: 10.48550/arXiv.2210.11939.
- [15] **Rezatofighi H, Tsoi N, Gwak J. et al.** Generalized intersection over union: a metric and a loss for bounding box regression. In: *Proc. IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Long Beach, USA, 2019: 658–666. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00075.

About the authors

Vadim Andreevich Pechenin (b. 1990) graduated from Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev in 2012; Candidate of Technical Sciences (2017). Head of the Research Laboratory “Artificial Intelligence in Manufacturing Systems” and Associate Professor at the Department of Engine Manufacturing Technologies, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University). He is the author and a co-author of about 150 scientific publications. Author ID (RSCI): 793203; Author ID (Scopus): 56401223700; Researcher ID (WoS): F-1835-2017. ORCID: 0000-0003-4961-7338. pechenin.va@ssau.ru. ✉.

Alexander Isaakovich Khaimovich (b. 1965) graduated from Kuibyshev Aviation Institute named after Academician S. P. Korolev in 1989; Doctor of Technical Sciences (2014). Head of the Department of Engine Manufacturing Technologies at Samara University and Chief Researcher at the Engineering Center of Samara University. He is the author and co-author of more than 200 scientific publications. Author ID (RSCI): 463931; Author ID (Scopus): 56400927200. ORCID: 0000-0002-9935-5703. khaymovich.ai@ssau.ru.

Received March 30, 2026. Revised May 18, 2026. Accepted July 27, 2026.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.4

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-477-490

**Обеспечение интероперабельности
как межотраслевая наукоёмкая проблема**

© 2026, А.Т. Салбиев

*АНО «Международный альянс стратегических проектов БРИКС» (МАСП-БРИКС), Москва, Россия***Аннотация**

Статья посвящена исследованию интероперабельности как межотраслевой наукоёмкой проблемы и соответствия её критериям отнесения к сквозным технологиям Российской Федерации. Методология исследования включает концептуальный, фактологический, нормативный и прецедентный анализ на основе нормативных правовых актов и международного опыта. Показано, что технология обеспечения интероперабельности обладает научным фундаментом, объединяющим дескрипционные логики, онтологический инжиниринг и формальную верификацию, и нуждается в проведении целенаправленных научно-исследовательских работ. В статье проведён системный анализ интероперабельности как объекта технологической политики; обоснована трёхуровневая функциональная модель технологии обеспечения интероперабельности как базовой технологии семантического веба; выявлены нормативные противоречия между включением технологии обеспечения безопасности и отсутствием технологии обеспечения интероперабельности в сквозных технологиях Российской Федерации. Обоснована четырёхуровневая аргументативная база для разработки технологии обеспечения интероперабельности. Разработан проект дорожной карты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на 2026–2032 годы и консервативная финансовая модель. Результаты исследования обосновывают необходимость включения технологии обеспечения интероперабельности в Перечень сквозных технологий Российской Федерации для обеспечения эффективной цифровой трансформации экономики и государственного управления.

Ключевые слова: интероперабельность, сквозная технология, семантический веб, семантическое согласование, уровень готовности технологии, профиль интероперабельности, онтология.

Цитирование: Салбиев А.Т. Обеспечение интероперабельности как межотраслевая наукоёмкая проблема. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.477-490. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-477-490.

Благодарности: автор выражает признательность д.т.н., проф. А.Я. Олейникову за конструктивные замечания, а также членам подкомитета ПК-206 «Интероперабельность» ТК-МТС-22 за обсуждение результатов исследования.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Цифровая трансформация экономики и государственного управления вступила в стадию, при которой существенная доля инвестиций направляется не на создание отдельных информационных систем (ИС), а на обеспечение их совместной работы. Интероперабельность перестаёт быть технической проблемой, а приобретает статус стратегического фактора эффективности цифровой инфраструктуры. Однако государственная технологическая политика не содержит системного ответа на этот вызов. Например, Перечень важнейших наукоёмких технологий [1], включает технологии обеспечения информационной безопасности (пп.11, 13 раздела критических технологий), но не содержит технологии обеспечения интероперабель-

ности (ТОИ). Это порождает структурный дисбаланс: безопасность данных обеспечена конкретными технологиями, а их совместное использование технологической поддержки не имеет.

1 Актуальность проблемы интероперабельности

ИС, как, например, система межведомственного электронного взаимодействия (СМЭВ) и единая система идентификации и аутентификации (ЕСИА), решают задачу доставки данных до адресата, но не обеспечивают смысловой интерпретации полученных данных в контексте иной предметной области (ПрО). Наименее проработанной остаётся семантическая составляющая: способность систем понимать и адекватно интерпретировать информацию на основе формальных онтологий. Эту задачу призвана решать ТОИ, понимаемая как совокупность научно и практически обоснованных методов, средств и процессов, обеспечивающих переход от ручного или слабоавтоматизированного онтологического согласования к автоматизированному с формальными гарантиями корректности [2]. Например, Федеральный закон (ФЗ) «Об отдельных вопросах регулирования платформенной экономики в РФ» [3] и проект ФЗ «О технологической платформе создания, развития и эксплуатации информационных систем» [4] содержат требования к интероперабельности, но не обеспечены технологическим инструментарием. Это создаёт разрыв «обязывание без технологии», который мог бы разрешиться включением ТОИ в Перечень сквозных технологий (ПСТ).

Следует терминологически разграничить национальный профиль интероперабельности (НПИ) [5], определяющий, **что** должно быть обеспечено на уровне принципов и архитектуры, и ТОИ, определяющую, **как** обеспечить это на уровне научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). В п.1.1 стандарта [2] единый подход к обеспечению интероперабельности квалифицируется как метатехнология, а ТОИ наполняет этот методологический каркас инженерным содержанием: алгоритмами автоматизированного онтологического отображения, процедурами формальной верификации семантических мостов и методами автоматизированного семантического согласования.

Центральный исследовательский вопрос: удовлетворяет ли ТОИ критериям включения в PST, установленным ФЗ [6] и Постановлением Правительства [7]? Для ответа на этот вопрос необходимо установить, обладает ли ТОИ междотраслевым характером и специфичным научным фундаментом и требуется ли проведение целенаправленных НИОКР. Эти и другие подвопросы соответствуют квалификационным критериям, закреплённым в [7].

Исследование включает концептуальный анализ ключевых дефиниций, фактологический анализ эмпирических данных, нормативно-правовой и сравнительно-прецедентный анализ отечественных и международных актов.

2 Концептуальные основы и терминология

Стандарт [2] определяет интероперабельность как «способность двух или более ИС или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена» (п. 3.1.8). Это определение согласуется с международными стандартами [8, 9], которые определяют интероперабельность как «возможность взаимодействия, обмена данными и совместного использования информации между двумя или более системами или компонентами». В ряде национальных стандартов (например, [10]) контекст интероперабельности распространён на сложные организационно-технические системы. В соответствии с [2, 11, 12] интероперабельность декомпозируется на три уровня (рисунок 1).

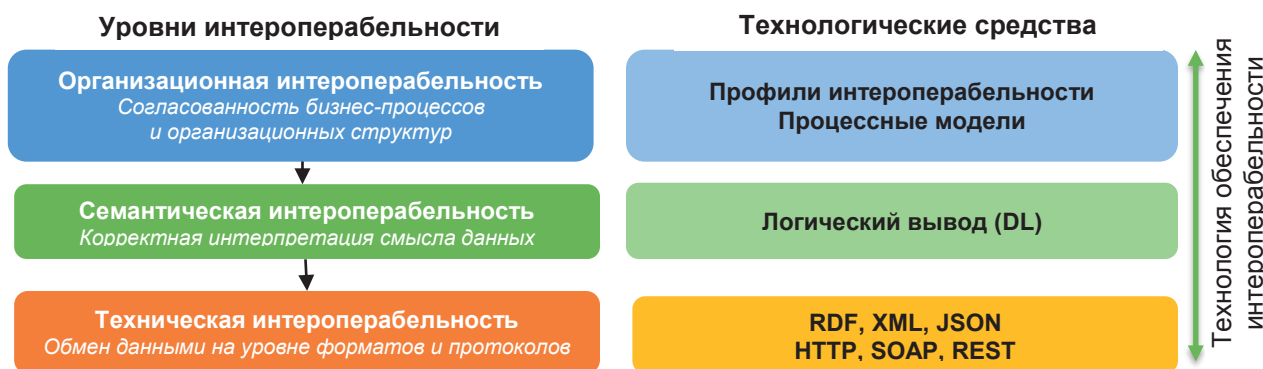


Рисунок 1 – Трёхуровневая модель интероперабельности и технологических средств её обеспечения

Синтаксическая интероперабельность обеспечивает способность систем обмениваться данными на уровне форматов и протоколов передачи. Семантическая интероперабельность гарантирует корректную интерпретацию смысла обмениваемых данных на основе формальных онтологий. Организационная интероперабельность позволяет достичь согласованности бизнес-процессов, правовых и организационных процедур в рамках которых осуществляется обмен. Каждому уровню соответствуют класс задач и набор технологических решений: транспортные протоколы на первом уровне, онтологические модели и механизмы логического вывода на втором, процессные модели и профили интероперабельности на третьем.

Различение транспортной связности и семантической интероперабельности имеет практическое значение. Например, платформы СМЭВ и региональная СМЭВ (РСМЭВ) обеспечивают транспортную связность между ведомственными системами; [13] фиксирует данную задачу как приоритетную; ЕСИА решает задачу аутентификации. При этом семантический разрыв сохраняется: данные доходят до адресата, но требуются их нормализация, перекодировка и интерпретация. Это позволяет определить содержание проблемы, на решение которой направлена ТОИ – смысловое согласование данных после передачи.

Онтология – «формальная явная спецификация концептуализации» [14]. В контексте ТОИ онтологии суть формальные модели ПрО, выраженные на языке дескрипционных логик [15] и реализованные в стандарте *OWL 2*. Профиль интероперабельности [16] определяется как спецификация требований к семантической совместимости единиц производственных возможностей. В ТОИ этот подход расширен до межотраслевого уровня: понятие «единиц производственных возможностей» обобщается до «информационных единиц», семантически значимых компонентов ИС (справочники, классификаторы, онтологии), между которыми устанавливаются отношения эквивалентности или включения.

Семантический мост представляет собой формально специфицированное множество аксиом отображения между сущностями и отношениями двух или более онтологий, обеспечивающее сохранение семантики при преобразовании данных. $B(O_1, O_2) = \{m_1, \dots, m_i, \dots, m_k\}$, где O_1 и O_2 – онтологии ПрО; m_i – аксиома отображения, устанавливающая отношение эквивалентности, включения или обратного включения между сущностями онтологий O_1 и O_2 .

Автоматизированное семантическое согласование определяется как компонент ТОИ, обеспечивающий корректность интерпретации связанных данных в разнородных средах.

НПИ представляет собой комплекс принципов и методологических рекомендаций для достижения интероперабельности на национальном уровне [5]. НПИ должен определять организационные, семантические и технические аспекты обеспечения интероперабельности. Уровень готовности технологии (УГТ) оценивается по девятиуровневой шкале от фундаментальных исследований (УГТ 1) до успешного применения в продуктивной среде (УГТ 9), в соответствии с методикой [7], гармонизированной со стандартом [17].

Различие между интероперабельностью, как свойством систем, и ТОИ, как технологией её обеспечения, структурно аналогично соотношению «свойство: технология его обеспечения». При этом безопасность, как свойство систем, обеспечивается технологиями информационной безопасности, включёнными в ПСТ в разделе критических технологий [1]; транспортная доступность обеспечивается технологиями транспортного уровня; энергоэффективность обеспечивается технологиями энергосбережения. Интероперабельность признана критически важной в десятках нормативных правовых актов и национальных стандартов, но технология её обеспечения в ПСТ отсутствует.

Если интероперабельность трактовать как свойство, то обеспечение интероперабельности становится задачей каждого отдельного ведомства. Такой подход приводит к фрагментации на технологическом уровне: каждое ведомство создаёт собственные локальные решения, которые оказываются несовместимы друг с другом. Формулировка «технология (направление)» в тексте закона [6] подчёркивает допустимость включения в ПСТ как устоявшихся инженерных решений, так и формирующихся научно-технологических направлений.

В [2] представлена последовательность применения организационных инструментов для решения проблемы интероперабельности. ТОИ определяет конкретное инженерное содержание: алгоритмы, программные средства и производственные процессы, обеспечивающие автоматизированное семантическое согласование. ТОИ является практической реализацией стандарта [2], без которой его методологические положения остаются декларативными.

3 Семантическая паутина в технологии обеспечения интероперабельности

Проблема семантической несовместимости ИС отражает технологический переход от синтаксического веба, построенного на принципе связанных документов, к семантическому вебу, основанному на принципе связанных данных [18]. Принципиальное ограничение синтаксического веба состоит в том, что смысловое содержание размещённых в нём данных остаётся машинно-неинтерпретируемым: веб-страницы предоставляют текст и структурированные форматы, но не содержат формальных спецификаций смысла.

Фундаментальный научный вызов состоит в противоречии: экспоненциальный рост объёмов разнородных машиночитаемых данных (в форматах *JSON*, *XML*, *RDF* и др.) сопровождается экспоненциальным ростом семантической неоднородности [19, 20 и др.].

Технологический фундамент семантического веба образуют стандарты Консорциума Всемирной паутины (W3C) [21]. Ключевыми из них являются (см. рисунок 2): *RDF* (*Resource Description Framework*), представляющий информацию в виде триплетов «субъект-предикат-объект»; *OWL* (*Web Ontology Language*), обеспечивающий применение дескрипционных логик для формализации онтологий; *SPARQL* – язык запросов к *RDF*-графам; *SHACL* для валидации *RDF*-данных; *SWRL* для правил логического вывода. Реализация принципов семантического веба получила развитие в [18]: использование *URI* как идентификаторов объектов; использование *HTTP-URI* для их доступности; предоставление информации в стандарте *RDF*; включение ссылок на *URI* других объектов, обеспечивающее связность данных.

Семантический веб активно внедряется в практику, и для обеспечения обмена данными используются онтологии [22]. В корпоративном секторе базы знаний, построенные на технологиях семантического веба, стали стандартной инфраструктурой крупнейших технологических компаний. Использование открытых международных стандартов, как технической основы, не противоречит задаче обеспечения технологического суверенитета: аналогично национальным технологиям искусственного интеллекта (ИИ), реализуемым с опорой на открытые фреймворки, ТОИ может строиться на открытых стандартах W3C с национальной спецификацией профилей и онтологий.

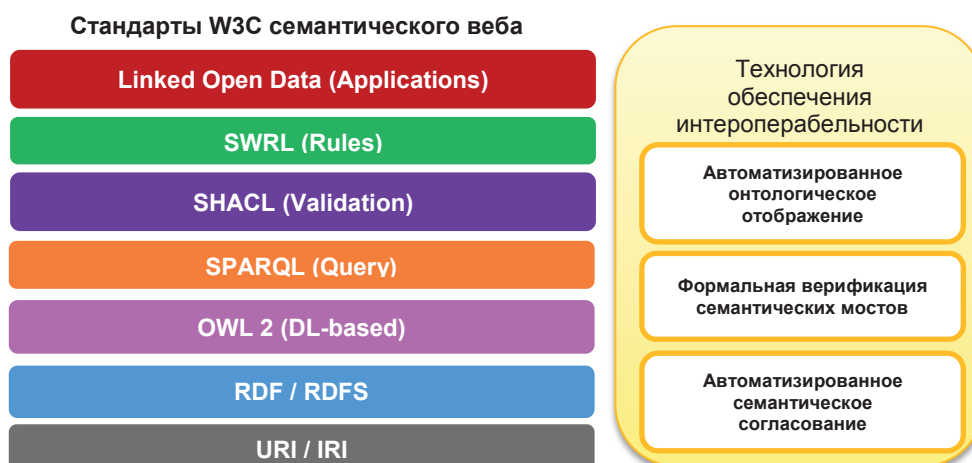


Рисунок 2 – Стандарты W3C и технологии обеспечения интероперабельности

Регламент [23] закрепляет обязательства государств по обеспечению интероперабельности публичных цифровых сервисов, включая семантический уровень. В РФ аналогичные тенденции закреплены в документах [24-26], в которых содержится требование обеспечения семантической интероперабельности в ИС. Разработана методология, включающая модели интероперабельности [12], подходы к профилированию [27], стандартизацию национальных рамочных конструкций [5] и онтологическое отображение в прикладных областях [28, 29].

Онтологии непрерывно эволюционируют, что при десятках ПрО делает ручной подход к изменению их отображений практически неосуществимым. ТОИ нацелена на практическое, формально-верифицируемое согласование в конкретных отраслевых контекстах.

Роль ТОИ в процессе перехода к семантическому вебу раскрывается через три фундаментальные функции.

Автоматизированное онтологическое отображение. На практике ПрО используют различные, зачастую несовместимые онтологии. Например, понятие «пациент» в единой государственной ИС в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ) [30] и в региональных медицинских ИС может иметь различный набор атрибутов и связей. Автоматизированное онтологическое отображение устанавливает формальные соответствия (эквивалентность или включение) между сущностями разнородных онтологий, обеспечивая возможность автоматического преобразования данных при сохранении их смысла.

Формальная верификация семантических мостов. Семантические мосты могут порождать логические противоречия (нарушение непротиворечивости, консистентность), что делает их использование недопустимым в критических применениях. ТОИ должна обеспечить автоматическую проверку непротиворечивости результирующей онтологии средствами дескрипционных логик $O_1 \cup B(O_1, O_2) \cup O_2 \neq \perp$, где $B(O_1, O_2)$ – семантический мост между онтологиями; $\neq$ – знак невыводимости; $\perp$ – логическое противоречие.

Автоматизированное семантическое согласование. При объединении данных из разнородных источников неизбежны конфликты интерпретации. Автоматизированное семантическое согласование разрешает или усиливает такие конфликты, обеспечивая корректность результирующего представления данных [31].

4 Межотраслевой характер и наукоёмкость

Каждая отрасль формирует собственную терминологическую систему, онтологии и стандарты обмена данными [32]. В таблице 1 представлены приоритетные отрасли для примене-

ния методов ТОИ с указанием характера семантического разрыва и соответствующей потребности в компонентах технологии. Свидетельством междотраслевого характера ТОИ является структурный изоморфизм: задача обеспечения взаимодействия для любой пары систем сводится к одной и той же фундаментальной проблеме выравнивания онтологий [33].

Таблица 1 – Приоритетные отрасли для применения технологии обеспечения интероперабельности

Отрасль	Семантический разрыв	Потребность в ТОИ
Здравоохранение	Несовместимость концептуальных моделей ЕГИСЗ [30] и региональных медицинских ИС	Онтологическое отображение медицинских терминов; верификация семантических мостов
Государственное управление	Различие ведомственных моделей данных; отсутствие семантического слоя в СМЭВ [13, 34]	Профили интероперабельности для модернизации СМЭВ
Промышленность	Несогласованность моделей; отсутствие производственных онтологий [32, 35]	Автоматизированное отображение производственных онтологий
Транспорт	Терминологические различия между подсистемами; отсутствие транспортной онтологии [36]	Единая транспортная онтология; профили мультимодальных перевозок
Финансовый сектор	Несовместимость форматов отчетности; различие семантики транзакций [37, 38]	Онтологическое отображение финансовых терминов
Оборона	Несовместимость моделей; семантические разрывы в сетевых системах [28, 29, 39]	Профили интероперабельности для сетевых систем

Формально изоморфизм проявляется в том, что задача обеспечения взаимодействия для любой пары систем из таблицы 1 сводится к установлению отношения эквивалентности ($\equiv$) или включения ($\subseteq$) между сущностями двух онтологий. Например, в финансовом секторе стандарты [38] и форматы Банка России [37] задают синтаксис обмена, но не обеспечивают семантическую совместимость каталогов финансовых продуктов; в транспортной отрасли аналогичная проблема возникает при согласовании онтологий логистических и портовых операторов [36]; в здравоохранении «Пациент» в онтологии ЕГИСЗ O_1 соответствует «Зарегистрированному лицу» в онтологии региональной медицинской ИС O_2 , что требует вывода аксиомы $O_1:\text{Пациент} \equiv O_2:\text{Зарегистрированное_лицо}$. Это единство метода, инвариантного к PrO , позволяет квалифицировать ТОИ как сквозную технологию.

Существует также провал координации между государственными заказчиками: каждое ведомство не заинтересовано в выделении средств на решение задач, полезный эффект от которых будет распределяться между всеми ведомствами. Включение ТОИ в ПСТ способно сформировать принципиально новый рынок услуг в области семантической интероперабельности для государственных и корпоративных ИС.

Научный фундамент ТОИ объединяет математическую логику [15], информатику, системную инженерию [40, 41] и информационное право [23]. Для признания наукоёмкости, согласно [7] требуется соответствие хотя бы одному из критериев. Научный фундамент ТОИ удовлетворяет всем четырём: требует специфических знаний, подтверждаемых наличием профильных научных школ; признан научным сообществом (см. например, [12]); содержит новые закономерности междисциплинарного характера; создаёт охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (см. например, [42, 43]). Дополнительным подтверждением служит участие школы ПК-206 в [22].

Необходимость государственной поддержки ТОИ обусловлена разрывом между текущим УГТ и уровнем, необходимым для промышленного внедрения. Основные компоненты ТОИ находятся в диапазоне УГТ 3–5 (таблица 2), что соответствует стадии формирующегося направления: лабораторные прототипы продемонстрировали работоспособность в контролируемых условиях, но промышленное внедрение не достигнуто. Целевой УГТ 7–8 соответствует промышленной зрелости и успешной апробации в реальных условиях.

Таблица 2 – Оценки уровня готовности технологий для технологии обеспечения интероперабельности

Компонент ТОИ	Текущий УГТ	Описание состояния	Целевой УГТ
Онтологическое отображение	4–5	Лабораторные прототипы; верификация на 3–4 предметных областях	7–8
Формальная верификация семантических мостов	4	Методы разработаны; апробация на модельных данных	7
Профили интероперабельности	5	Эталонные профили для двух отраслей; частичная стандартизация	8
Автоматизированное семантическое согласование	3–4	Концептуальная модель и прототип алгоритма	7
Интегрированная платформа ТОИ	3	Архитектура спроектирована; компоненты не интегрированы	8

Наличие разрыва между текущим УГТ 3–5 и целевым УГТ 7–8 является индикатором объективной потребности в целенаправленных НИОКР. Включение технологий на ранних стадиях зрелости имеет международную практику: в программе [44] УГТ 5–6 рассматривается как типичная точка входа для инновационных проектов, а в [45] УГТ 4–6 характеризуется как зона концептуального доказательства. Оценки УГТ приведены в соответствии с методикой, утверждённой [7] и гармонизированной с [17].

Переход от УГТ 3–5 к УГТ 8 требует преодоления четырёх разрывов: 1) масштабирование автоматизированного согласования онтологий с 3–4 до 10–15 ПрО; 2) разработка процедур верификации семантических мостов с формальными гарантиями корректности; 3) создание алгоритмов автоматизированного семантического согласования для конфликтных ситуаций в отраслевых контекстах; 4) разработка метрик и инструментов мониторинга интероперабельности. Согласно [7] перспективность обосновывается глобальным вектором эволюции информационной инфраструктуры в сторону семантического веба и соответствием [46]. По мере роста объёма машиночитаемых данных семантическая несовместимость будет обостряться, что делает инвестиции в ТОИ стратегически оправданными.

5 Нормативная база

Проведённый анализ свидетельствует о наличии обширной, но несогласованной нормативной базы, требующей систематизации на основе единой технологической платформы путём разработки ТОИ. Например: в [47] констатируется необходимость «разработки форматов интероперабельности с международными эквивалентами» без указания конкретных технологических средств; в [48] в качестве требования указано «Обеспечение семантической интероперабельности с внешними медицинскими ИС», но без определения метода обеспечения; в [49] создана правовая основа информационного обмена конкретных требований к семантической составляющей; в [50] технические требования к взаимодействию в СМЭВ включают требования к профилям интероперабельности без указания единой технологической платформы; в [3] предписано обеспечивать цифровые платформы равным и беспрепятственным доступом пользователей, что предполагает семантическую совместимость каталогов товаров и услуг без указания механизма её достижения.

В проектах законов [4, 51] наращиваются обязательства в сфере интероперабельности, но технологический инструментарий их реализации отсутствует.

Регламент [23] является обязывающим нормативным актом, регулирующим интероперабельность публичных цифровых сервисов на наднациональном уровне. Оценки [52] показывают, что совокупные издержки от фрагментации и несовместимости в различных областях могут составлять значительные макроэкономические величины и не могут игнорироваться при формировании технологической политики. ЕС перешёл от рекомендаций к обязыванию, тогда как в РФ рамочная конструкция остаётся добровольной и не подкреплена механизмами контроля. Аналогичная тенденция наблюдается в странах БРИКС.

ТОИ может стать экспортно-ориентированной технологией для трансграничных цифровых экосистем БРИКС [53], что коррелирует с задачей технологического суверенитета [54].

Законами [6, 55] создаётся правовое пространство для тестирования инновационных технологий без необходимости немедленного изменения общего регулирования. Это соответствует принципам регуляторной политики [56] и достаточно для поэтапного масштабирования ТОИ без дополнительного изменения законодательства.

6 Архитектурная интеграция

ТОИ является горизонтальной технологией-интегратором и создаётся для обеспечения бесшовной семантической интеграции данных. Указанные в таблице 3 технологии оперируют интерпретированными данными и без формализованного семантического слоя не могут обеспечить корректность взаимодействия. Например, для цифровых двойников [57] требуется семантическое согласование моделей изделий, а для распределённых реестров [58] – интероперабельность смарт-контрактов.

Таблица 3 – Сквозные технологии, для которых семантическое согласование критично

Сквозная технология	Признаки критичности	Функционал ТОИ
Технологии ИИ	Семантическое согласование обучающих данных	Онтологическое отображение источников; верификация семантических мостов
Технологии кибербезопасности	Интероперабельность систем обнаружения вторжений	Профили интероперабельности для платформ обмена информацией о киберугрозах
Цифровые двойники	Онтологическое отображение моделей предметных областей	Автоматизированное отображение онтологий; верификация корректности интеграции
Технологии распределённых реестров	Интероперабельность смарт-контрактов между платформами	Профили для межплатформенных транзакций; семантические мосты
Робототехника	Семантическая интероперабельность гетерогенных робототехнических систем	Профили интероперабельности для межплатформенного взаимодействия

Для перехода от текущего УТГ 3–5 к целевому УТГ 8 требуется выполнение НИОКР (см. таблицу 4). Представленная дорожная карта и бюджетные оценки являются индикативными и составлены на основе экспертных заключений и анализа международного опыта.

Таблица 4 – Дорожная карта реализации программы НИОКР

Этап	Период	Цель	Ключевые задачи	Целевой УТГ	Бюджет (млн руб.)
I. Фундаментальные исследования и прототипирование	2026–2028	Создание научного задела и лабораторных прототипов	Разработка методов автоматизированного онтологического отображения; верификация на 3–4 предметных областях	5–6	120–160
II. Прикладные разработки и пилотирование	2028–2030	Демонстрация работоспособности	Масштабирование на 10–15 предметных областей; пилотное внедрение через СМЭВ	6–7	230–310
III. Стандартизация и промышленное внедрение	2030–2032	Достижение промышленной зрелости	Разработка 5–7 стандартов; внедрение в федеральные платформы; формирование рынка услуг	8	185–310

Целевыми ориентирами являются показатели, предусмотренные для сквозных технологий [7, 59, 60]: к концу этапа III обеспечить автоматизированное семантическое согласование для не менее чем 10–15 ПрО, снизив зависимость от зарубежных решений. Архитектурная интеграция со СМЭВ [34] предполагает двухуровневую модель: СМЭВ обеспечивает транс-

портный уровень, ТОИ реализует семантический уровень. Интеграция реализуется путём добавления семантического сервиса: на этом уровне предлагается развернуть модуль автоматизированного семантического согласования, разрешающий конфликты интерпретации в реальном времени. Следует разграничить ТОИ и Национальную систему управления данными (НСУД) [61]: функционал НСУД сосредоточен на каталогизации и паспортизации данных, тогда как ТОИ формирует отсутствующий семантический слой над инфраструктурой НСУД, предоставляя возможность автоматизированного согласования смысла каталогизированных данных. НСУД отвечает на вопрос: «Какие данные есть?»; ТОИ – на вопрос: «Что они значат в контексте иной Про?»

Заключение

Проведённый анализ позволяет сформулировать основные выводы.

- Проблема интероперабельности носит преимущественно семантический характер, смысловое согласование данных между разнородными системами остаётся ручным и неконтролируемым.
- ТОИ удовлетворяет квалификационным критериям сквозной технологии, установленным [6, 7]. Ведомства не заинтересованы в самостоятельном финансировании ТОИ: полезный эффект от семантического согласования распределяется между всеми участниками обмена, что обуславливает необходимость системной государственной поддержки.
- ТОИ является горизонтальной технологией-интегратором для существующих сквозных технологий, обеспечивая семантическую совместимость данных.
- Включение ТОИ в ПСТ является необходимым условием эффективной цифровой трансформации экономики и государственного управления.

Настоящее исследование имеет ряд ограничений: анализ межотраслевой фрагментации основан на шести отраслях и не претендует на исчерпывающую полноту; оценка УТГ основана на экспертных оценках, и требуется её формализованная верификация.

Список источников

- [1] Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий». *Собрание законодательства РФ*. 2024. № 26. Ст. 3640.
- [2] ГОСТ Р 55062-2021. Информационные технологии. Интероперабельность. Основные положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
- [3] Федеральный закон от 31.07.2025 № 289-ФЗ «Об отдельных вопросах регулирования платформенной экономики в Российской Федерации». *Собрание законодательства РФ*. 2025. № 31. Ст. 5210.
- [4] Проект Федерального закона № 1076648-8 «О технологической платформе создания, развития и эксплуатации информационных систем» (внесен Правительством РФ). <https://sozd.duma.gov.ru/bill/1076648-8>.
- [5] **Салбиев А.Т.** Интероперабельность: основа экономики данных: монография. М.: ИД «Стафеев и К»; СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. 494 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id25-591.
- [6] Федеральный закон от 28.12.2024 № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». *Собрание законодательства РФ*. 2024. № 52 (ч. I). Ст. 8003.
- [7] Постановление Правительства РФ от 06.10.2025 № 1552 «О планировании технологической политики в Российской Федерации». *Собрание законодательства РФ*. 2025. № 41. Ст. 7002.
- [8] ISO/IEC 2382:2015. Information technology: Vocabulary. Geneva: ISO, 2015.
- [9] ISO/IEC/IEEE 24765:2017. Systems and software engineering: Vocabulary. Geneva: ISO, 2017.
- [10] ГОСТ Р 59796-2021. Информационные технологии. Интероперабельность. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
- [11] Levels of Information Systems Interoperability (LISI). C4ISR Architecture Working Group. Washington, D.C.: Department of Defense, 1998.

- [12] Макаренко С.И., Олейников А.Я., Черницкая Т.Е. Модели интероперабельности информационных систем. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. № 4. С. 215–245. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10408.
- [13] Паспорт федерального проекта «Цифровое государственное управление». Утв. президиумом Правительственной комиссии по цифровому развитию, протокол от 28.05.2019, №9.
- [14] Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993. Vol.5, No.2. P.199–220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
- [15] Baader F., Calvanese D., McGuinness D., Nardi D., Patel-Schneider P. (eds.). *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [16] ГОСТ Р 71778.1-2024 (ИСО 16300-1:2018). Умное производство. Интероперабельность единиц производственных возможностей. Часть 1. Критерии интероперабельности. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2024.
- [17] ГОСТ Р 58048-2017. Трансфер технологий. Оценка уровня зрелости технологий. Методические указания. М.: Стандартинформ, 2017.
- [18] Bizer C., Heath T., Berners-Lee T. Linked Data: The Story So Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2009. Vol. 5, No. 3. P. 1–22. DOI: 10.4018/jswis.2009081901.
- [19] Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O. The Semantic Web. *Scientific American*. 2001. Vol.284, No.5. P.34–43. DOI: 10.1038/scientificamerican0501-34.
- [20] Berners-Lee T., Hall W., Hendler J., O'Hara K., Shadbolt N., Weitzner D.J. A Framework for Web Science. *Foundations and Trends in Web Science*. 2006. Vol. 1, No. 1. P. 1–130. DOI: 10.1561/18000000001.
- [21] W3C. Semantic Web Standards (RDF, OWL, SPARQL, SHACL, SWRL). URL: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/> (дата обращения: 23.04.2026).
- [22] International Data Spaces Association (IDSA). Reference Architecture Model, Version 4.0. Dortmund: IDSA, 2023.
- [23] Regulation (EU) 2024/903 of the European Parliament and of the Council of 13 March 2024 (Interoperable Europe Act). Official Journal of the European Union. 2024. L 177, P. 1–47.
- [24] Стратегия развития рынка больших данных 2030. М.: Ассоциация больших данных, 2025. <https://rubda.ru/deyatelnost/strategiya/> (дата обращения: 23.04.2026).
- [25] Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». *Собрание законодательства РФ*. 2019. № 41. Ст. 5700.
- [26] Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года».
- [27] Баишыкова А.А., Каменников А.А., Олейников А.Я. О подходах к разработке профилей интероперабельности в военной области. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2017. №4. С.112–121.
- [28] NATO Science and Technology Organization. C2SIM Lecture Series: Simulation Interoperability Standards. Brussels: NATO STO, 2020.
- [29] Макаренко С.И. Интероперабельность организационно-технических систем. Санкт-Петербург: Издательство: Научные технологии. 2024. 313 с.
- [30] Концепция создания единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ): утв. Приказом Минздравсоцразвития РФ от 28.04.2011 №364. М.: Минздравсоцразвития, 2011.
- [31] Коммюнике Онтологического Саммита 2016. Онтологии в семантически интероперабельных экосистемах. *Онтология проектирования*, Т.6, №2, 2016, с.241–247. *Ontology Summit 2016 Communique. Ontologies within Semantic Interoperability Ecosystems*. <http://ontologforum.org/index.php/OntologySummit2016/Communique>.
- [32] ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014. Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология. М.: Стандартинформ, 2014.
- [33] Euzenat J., Shvaiko P. *Ontology Matching*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2013.
- [34] Постановление Правительства РФ от 08.09.2010 № 697 «О единой системе межведомственного электронного взаимодействия» (ред. от 23.04.2026). *Собрание законодательства РФ*. 2010. № 37. Ст. 4683.
- [35] ГОСТ Р 70992-2023. Цифровая промышленность. Интеграция и интероперабельность систем. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
- [36] Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р.
- [37] Положение Банка России от 29.12.2018 № 5032-У «О форматах электронных документов, применяемых при взаимодействии Банка России с кредитными организациями».
- [38] ISO 20022:2013. Financial services: Universal financial industry message scheme. Geneva: ISO, 2013.
- [39] ГОСТ Р 70569-2022. Информационные технологии. Сетецентрические информационно-управляющие системы. Интероперабельность. М.: Российский институт стандартизации, 2022.
- [40] ГОСТ Р ИСО 11354-2-2016. Усовершенствованные автоматизированные технологии. Требования к установлению интероперабельности процессов. Часть 2. Модель зрелости. М.: Стандартинформ, 2016.
- [41] Department of Defense Architecture Framework (DoDAF), Version 2.02. Washington, D.C.: DoD, 2010.

- [42] Патент № 2406117 С2 РФ, МПК G06F 13/00. Автоматизированная информационная система для придания совместимости программно-аппаратным компонентам / **Батоврин В.К.** [и др.]; заявитель и патентообладатель ИРЭ РАН. № 2008144386; заявл. 10.11.2008; опубл. 27.10.2010.
- [43] Патент № 2656841 С2 РФ, МПК G06F 17/00. Способ построения единого информационного пространства на основе обеспечения интероперабельности / **Олейников А.Я.** [и др.]; заявитель ИРЭ РАН. № 2017123456; заявл. 04.07.2017; опубл. 12.06.2018.
- [44] European Commission. Horizon Europe Work Programme 2023–2025: Cluster 4. Brussels: EC, 2023.
- [45] U.S. Government Accountability Office. Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices. GAO-20-48G. Washington, D.C.: GAO, 2020.
- [46] Программа фундаментальных научных исследований Российской Федерации на 2021–2030 годы: утв. распоряжением Правительства РФ от 31.12.2020 № 3684-р.
- [47] Распоряжение Правительства РФ от 10.05.2014 № 793-р «Об утверждении Концепции методологии систематизации и кодирования информации» (ред. от 13.10.2017).
- [48] Методические рекомендации по обеспечению функциональных возможностей МИС МО. Утв. Минздравом России 01.02.2016.
- [49] Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» (ред. от 28.12.2024). *Собрание законодательства РФ*. 2006. № 31 (ч. I). Ст. 3448.
- [50] Приказ Минкомсвязи России от 23.06.2015 № 210 «Об утверждении Технических требований к взаимодействию ИС в СМЭВ». Зарег. в Минюсте России 25.08.2015 № 38668.
- [51] Проект Федерального закона «Об основах государственного регулирования сфер применения технологий искусственного интеллекта в Российской Федерации» (публичное обсуждение 18.03.2026). <https://regulation.gov.ru/projects#npa=143702>.
- [52] European Parliamentary Research Service. Europe's Two Trillion Euro Dividend: Mapping the Cost of Non-Europe, 2019–2024. Brussels: EPRS, 2020.
- [53] BRICS Digital Economy Partnership Framework. 2022. <https://www.brics2022.mfa.gov.cn/eng/>.
- [54] UN General Assembly. Resolution A/RES/79/1 «The Pact for the Future». New York: UN, 2024.
- [55] Федеральный закон от 31.07.2020 № 258-ФЗ «Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых и технологических инноваций» (ред. от 28.12.2024). *Собрание законодательства РФ*. 2020. № 31 (ч. I). Ст. 5012.
- [56] Федеральный закон от 24.04.2020 № 123-ФЗ «О проведении эксперимента по установлению специального регулирования в целях создания среды для внедрения технологий ИИ в г. Москве». *Собрание законодательства РФ*. 2020. № 17. Ст. 2705.
- [57] ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
- [58] ISO/TR 23455:2019. Blockchain and distributed ledger technologies: Overview of and interactions between smart contracts. Geneva: ISO, 2019.
- [59] Постановление Правительства РФ от 31.07.2025 № 1141 «Об отдельных вопросах развития сквозных технологий». *Собрание законодательства РФ*. 2025. № 31. Ст. 4835.
- [60] Постановление Правительства РФ от 05.12.2025 № 1990 «О целевых показателях в области технологической политики». *Собрание законодательства РФ*. 2025. № 51. Ст. 8157.
- [61] Постановление Правительства РФ от 14.05.2021 № 733 «О национальной системе управления данными» (ред. от 24.03.2026). *Собрание законодательства РФ*. 2021. № 20. Ст. 3432.

Сведения об авторе

Салбиев Алан Тасолтанович, 1981 г. рождения. Окончил Северо-Кавказский государственный технологический университет (2003), к.т.н. (2006). Вице-президент МАСП БРИКС по международному технологическому сотрудничеству. Член рабочей группы подкомитета ПК-206 «Интероперабельность» технического комитета по стандартизации ТК-МТС-22 «Информационные технологии». Автор научной монографии «Интероперабельность – основа экономики данных». Область научных интересов: интероперабельность информационных систем, онтологический инжиниринг, семантический веб, стандартизация. Author ID (РИНЦ): 1635-6440; Researcher ID (WoS): OUK-2934-2025; ORCID 0009-0005-6185-5664. AlanSalbiev@yandex.ru.



Поступила в редакцию 30.05.2026, после рецензирования 08.06.2026. Принята к публикации 15.06.2026.



Ensuring interoperability as a cross-sectoral knowledge-intensive challenge

© 2026, A.T. Salbiev

ANO "International Alliance of BRICS Strategic Projects" (IASP-BRICS), Moscow, Russia

Abstract

This article explores interoperability as a cross-sectoral, knowledge-intensive challenge and assesses its compliance with the criteria for classification as a cross-cutting technology in the Russian Federation. The research methodology includes conceptual, factual, regulatory, and case-based analysis grounded in legal and regulatory documents as well as international experience. The study demonstrates that ensuring interoperability is based on a scientific foundation integrating description logics, ontology engineering, and formal verification, and therefore requires dedicated research and development efforts. A systematic analysis of interoperability as an object of technology policy is conducted. A three-level functional model for ensuring interoperability is substantiated, considering it as a foundational technology of the Semantic Web. The study also identifies regulatory inconsistencies arising from the inclusion of security technologies and the absence of interoperability technologies in the current list of Russian cross-cutting technologies. A four-level argumentation framework supporting the development of interoperability technologies is proposed. In addition, a draft roadmap for research and development activities covering the period 2026–2032, together with a conservative financial model, has been developed. The findings substantiate the necessity of including interoperability technology in the List of Cross-Cutting Technologies of the Russian Federation to ensure effective digital transformation of the economy and public administration.

Keywords: interoperability, cross-cutting technology, Semantic Web, semantic alignment, technology readiness level, interoperability profile, ontology.

For citation: Salbiev AT. Ensuring interoperability as a cross-sectoral knowledge-intensive challenge [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(3): 477-490. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-477-490.

Acknowledgments: The author expresses sincere gratitude to Doctor of Technical Sciences, Professor A.Ya. Oleynikov for his constructive comments, as well as to the members of Subcommittee PC-206 "Interoperability" of Technical Committee TC-MTS-22 for Information Technologies for their discussion of the research results.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Three-level model of interoperability and the technological means supporting it

Figure 2 – W3C standards and interoperability technologies

Table 1 – Priority sectors for the application of interoperability technologies

Table 2 – Technology readiness level assessments for interoperability technologies

Table 3 – Cross-cutting technologies dependent on semantic alignment

Table 4 – R&D program implementation roadmap

References

- [1] Decree of the President of the Russian Federation No. 529 of 18.06.2024 "On the approval of priority areas of scientific and technological development and the list of critical knowledge-intensive technologies" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2024; 26: 3640.
- [2] GOST R 55062-2021. Information technology. Interoperability. General principles [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021.
- [3] Federal Law No. 289-FZ of 31.07.2025 "On certain issues of regulation of the platform economy in the Russian Federation" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2025; 31: 5210.
- [4] Draft Federal Law No. 1076648-8 "On the technological platform for the creation, development, and operation of information systems" [In Russian]. Submitted by the Government of the Russian Federation. Available from: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/1076648-8>

- [5] **Salbiev AT.** Interoperability is the basis of the data economy: monograph [In Russian]. Moscow; St. Petersburg: POLITEKH-PRESS; 2025. 494 p. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id25-591.
- [6] Federal Law No. 523-FZ of 28.12.2024 "On technological policy in the Russian Federation" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2024; 52(Pt. I): 8003.
- [7] Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1552 of 06.10.2025 "On planning technological policy in the Russian Federation" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2025; 41: 7002.
- [8] ISO/IEC 2382:2015. Information technology: Vocabulary. Geneva: ISO; 2015.
- [9] ISO/IEC/IEEE 24765:2017. Systems and software engineering: Vocabulary. Geneva: ISO; 2017.
- [10] GOST R 59796-2021. Information technology. Interoperability. Terms and definitions [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021.
- [11] Levels of Information Systems Interoperability (LISI). C4ISR Architecture Working Group. Washington, DC: Department of Defense; 1998.
- [12] **Makarenko SI, Oleynikov AYa, Chernitskaya TE.** Models of interoperability assessment for information systems [In Russian]. *Systems of Control, Communications and Security*. 2019; 4: 215-245. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10408.
- [13] Passport of the federal project "Digital Public Administration" [In Russian]. Approved by the Presidium of the Government Commission on Digital Development, Protocol No. 9 of 28.05.2019.
- [14] **Gruber TR.** A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993; 5(2): 199-220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
- [15] **Baader F, Calvanese D, McGuinness D, Nardi D, Patel-Schneider P,** editors. The Description Logic Handbook. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2007.
- [16] GOST R 71778.1-2024 (ISO 16300-1:2018). Smart manufacturing. Interoperability of capability units. Part 1. Interoperability criteria [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2024.
- [17] GOST R 58048-2017. Technology transfer. Technology readiness assessment. Guidelines [In Russian]. Moscow: Standartinform; 2017.
- [18] **Bizer C, Heath T, Berners-Lee T.** Linked Data: The Story So Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2009; 5(3): 1-22. DOI: 10.4018/jswis.2009081901.
- [19] **Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O.** The Semantic Web. *Scientific American*. 2001; 284(5): 34-43. DOI: 10.1038/scientificamerican0501-34.
- [20] **Berners-Lee T, Hall W, Hendler J, O'Hara K, Shadbolt N, Weitzner DJ.** A Framework for Web Science. *Foundations and Trends in Web Science*. 2006; 1(1): 1-130. DOI: 10.1561/18000000001.
- [21] W3C. Semantic Web Standards. Available at: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/> (accessed April 23, 2026).
- [22] International Data Spaces Association (IDSA). Reference Architecture Model, Version 4.0. Dortmund: IDSA; 2023.
- [23] Regulation (EU) 2024/903 of the European Parliament and of the Council (Interoperable Europe Act). *Official Journal of the European Union*. 2024; L 177: 1-47.
- [24] Big Data Market Development Strategy 2030 [In Russian]. Moscow: Big Data Association; 2025. <https://rubda.ru/deyatelnost/strategiya/>. (accessed April 23, 2026).
- [25] Decree of the President of the Russian Federation No. 490 of 10.10.2019 "On the development of artificial intelligence in the Russian Federation" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2019; 41: 5700.
- [26] Order of the Government No. 1315-r of 20.05.2023 "On approval of the Concept of technological development for the period up to 2030" [In Russian].
- [27] **Bashlykova AA, Kamenshchikov AA, Oleynikov AYa.** On approaches to the development of interoperability profiles in the military field [In Russian]. *Information Technologies and Computing Systems*. 2017; 4: 112-121.
- [28] NATO Science and Technology Organization. C2SIM Lecture Series. Brussels: NATO STO; 2020.
- [29] **Makarenko SI.** Interoperability of Organizational-Technical Systems [In Russian]. St. Petersburg: Naukaemkie Tekhnologii Publishing House, 2024. 313 p.
- [30] Concept of the Unified State Health Information System (USHIS) [In Russian]. Order of the Ministry of Health No. 364 of 28.04.2011.
- [31] Ontology Summit 2016 Communiqué. Ontologies within Semantic Interoperability Ecosystems. *Ontology of Designing*. 2016; 6(2): 241–247. Available at: <http://ontologyforum.org/index.php/OntologySummit2016/Communique>.
- [32] GOST R IEC 62264-1-2014. Enterprise-control system integration. Part 1. Models and terminology [In Russian]. Moscow: Standartinform; 2014.
- [33] **Euzenat J, Shvaiko P.** Ontology Matching. 2nd ed. Berlin: Springer; 2013.
- [34] Resolution of the Government of the Russian Federation No. 697 of 08.09.2010 "On the unified system of interdepartmental electronic interaction" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2010; 37: 4683.
- [35] GOST R 70992-2023. Digital industry. System integration and interoperability. Terms and definitions [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023.
- [36] Transport Strategy of the Russian Federation up to 2030 with a forecast period up to 2035 [In Russian]. Order of the Government No. 3363-r of 27.11.2021.
- [37] Regulation of the Bank of Russia No. 5032-U of 29.12.2018 On formats of electronic documents used in interactions between the Bank of Russia and credit institutions [In Russian].
- [38] ISO 20022:2013. Financial services: Universal financial industry message scheme. Geneva: ISO; 2013.
- [39] GOST R 70569-2022. Information Technology. Network-Centric Information and Control Systems. Interoperability [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022.

- [40] GOST R ISO 11354-2-2016. Advanced automation technologies and their applications. Requirements for establishing process interoperability. Part 2. Maturity model [In Russian]. Moscow: Standartinform; 2016.
 - [41] Department of Defense Architecture Framework (DoDAF), Version 2.02. Washington, DC: DoD; 2010.
 - [42] Patent No. 2406117 C2, RF. Automated information system for achieving compatibility of hardware and software components [In Russian]. *Batovrin VK* et al. 2010.
 - [43] Patent No. 2656841 C2, RF. Method for constructing a unified information space based on interoperability assurance [In Russian]. *Oleynikov AYa* et al. 2018.
 - [44] European Commission. Horizon Europe Work Programme 2023-2025: Cluster 4. Brussels: EC; 2023.
 - [45] U.S. Government Accountability Office. Technology Readiness Assessment Guide. GAO-20-48G. Washington, DC: GAO; 2020.
 - [46] Program of Fundamental Scientific Research of the Russian Federation 2021-2030 [In Russian]. Order of the Government No. 3684-r of 31.12.2020.
 - [47] Directive of the Government No. 793-r of 10.05.2014 "On approval of the Concept of methodology for information systematization and coding" [In Russian].
 - [48] Guidelines for ensuring functional capabilities of medical information systems. Approved of the Ministry of Health [In Russian]. 01.02.2016.
 - [49] Federal Law No. 149-FZ of 27.07.2006 "On information, information technologies and information protection" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2006; 31(Pt. I): 3448.
 - [50] Order of the Ministry of Communications of the Russian Federation No. 210 of 23.06.2015. On Approval of Technical Requirements for Information System Interaction within SMEV [In Russian].
 - [51] Draft Federal Law "On the Foundations of State Regulation of Artificial Intelligence Application Areas in the Russian Federation" [In Russian]. Public discussion 18.03.2026. Available at: <https://regulation.gov.ru/projects#npa=143702>.
 - [52] European Parliamentary Research Service. Europe's Two Trillion Euro Dividend. Brussels: EPRS; 2020.
 - [53] BRICS Digital Economy Partnership Framework. 2022.
 - [54] UN General Assembly. Resolution A/RES/79/1 "The Pact for the Future". New York: UN; 2024.
 - [55] Federal Law No. 258-FZ of 31.07.2020 "On experimental legal regimes in the sphere of digital and technological innovations" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2020; 31(Pt. I): 5012.
 - [56] Federal Law No. 123-FZ of 24.04.2020 On Conducting an Experiment to Establish Special Regulation for Creating an Environment for the Development and Implementation of Artificial Intelligence Technologies in Moscow. [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2020; 17: 2705.
 - [57] GOST R 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins. General principles [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021.
 - [58] ISO/TR 23455:2019. Blockchain and DLT: Overview of smart contracts. Geneva: ISO; 2019.
 - [59] Resolution of the Government No. 1141 of 31.07.2025 "On certain issues of cross-cutting technology development" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2025; 31: 4835.
 - [60] Resolution of the Government No. 1990 of 05.12.2025 "On target indicators in the field of technology policy [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2025; 51: 8157.
 - [61] Resolution of the Government No. 733 of 14.05.2021 "On the national data management system" [In Russian]. *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2021; 20: 3432.
-

About the author

Alan Tasoltanovich Salbiev (b. 1981) graduated from the North Caucasus State Technological University (2003), Candidate of Technical Sciences (2006). Vice-President for International Technological Cooperation of the BRICS International Alliance of Strategic Projects (BRICS IASP). Member of the working group of Subcommittee PC-206 "Interoperability" of Technical Committee for Standardization TC-MTS-22 "Information Technologies". Author of the scientific monograph "Interoperability: the Foundation of the Data Economy". Research interests include interoperability of information systems, ontology engineering, the Semantic Web, and standardization. Author ID (RSCI): 1635-6440; Researcher ID (WoS): OUK-2934-2025; ORCID: 0009-0005-6185-5664. AlanSalbiev@yandex.ru.

Received May 30, 2026. Revised June 08, 2026. Accepted June 15, 2026.



Доменно-независимый онтологический паттерн проектирования интерпретируемых нейросимвольных систем

© 2026, А.Н. Жданова

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Интерпретируемые нейросимвольные системы анализа данных, объединяющие графы знаний и графовые нейронные сети, разрабатываются для конкретных предметных областей. В работе предложен доменно-независимый онтологический паттерн проектирования «Объект анализа – Признак – Целевая характеристика», задающий структуру интерпретируемой нейросимвольной системы, в которой формирование объяснений определяется онтологической организацией знаний. Паттерн включает классы концептов, предикаты, правила преобразования онтологии в граф знаний и построения графовой нейронной сети. На его основе разработан метод проектирования, включающий переход от концептуализации предметной области к построению графа знаний, обучению модели и формированию семантических путей объяснения. Предложенный паттерн объединяет структуру знаний, механизмы вывода и формирования объяснений в единой концептуальной схеме. Применение паттерна показано на примере двух предметных областей: психологического профилирования пользователей социальной сети; дерматоскопической диагностики новообразований кожи. Выделены доменно-инвариантные и доменно-специфичные элементы онтологии и выполнено отображение онтологической структуры на граф знаний. Показано, что структура паттерна, механизмы вывода и формирования объяснений сохраняются для различных предметных областей. Интерпретация решения определяется онтологической структурой нейросимвольной системы и формируется посредством семантических связей между объектом анализа, его признаками и целевой характеристикой.

Ключевые слова: онтологический паттерн, нейросимвольная система, граф знаний, графовые нейронные сети, интерпретируемость, объяснимый искусственный интеллект.

Цитирование: Жданова А.Н. Доменно-независимый онтологический паттерн проектирования интерпретируемых нейросимвольных систем. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.491-501. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-491-501.

Благодарности: автор выражает благодарность д.т.н., доценту А.В. Куприянову за обсуждение результатов исследования и замечания при подготовке статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Интерпретируемость выводов в системах поддержки принятия решений – важное практическое требование, в том числе в таких областях, как медицина, психологическая диагностика и безопасность. Распространённым способом повышения интерпретируемости являются апостериорные методы атрибуции, формирующие объяснения для уже обученной модели. Объяснения формируются независимо от процесса вывода и не опираются на формализованное представление предметного знания, их связь с используемыми понятиями предметной области (ПрО) остаётся неявной.

В нейросимвольных системах (НСС) графы знаний (ГЗ) используются для представления предметного знания, а графовые нейронные сети (ГНС) – для анализа данных и формирования предсказаний. Интерпретация результата в этом случае может быть представлена семантическим путём в ГЗ. Подобные системы проектируются независимо для каждой ПрО.

Предметом настоящей статьи является онтологический паттерн (ОП) проектирования и его применение в различных ПрО. Предлагаемый ОП основан на разработанном автором подходе к построению интерпретируемых НСС [1].

1 Источниковая база для исследования

Онтология в инженерии знаний определяется как формальная спецификация концептуализации ПрО [2]. Реализация онтологий обычно основана на языках *RDF* и *OWL* [3, 4].

ОП проектирования представляют собой переиспользуемые решения типовых задач построения онтологий [5, 6]. ОП фиксируют устойчивые структуры классов и отношений, применимые в различных ПрО. Выделяются содержательные, логические и другие виды ОП, рассматриваются методы их каталогизации и повторного использования [7].

В онтологии проектирования рассматриваются знания о процессах создания и модификации артефактов, включая описание объектов и субъектов проектирования, используемых понятий, ограничений и процедур [8]. Вопросы инженерии знаний, онтологического моделирования и построения порталов знаний исследованы в работах [4, 9].

В нейросимвольном искусственном интеллекте объединены методы машинного обучения и формализованное представление знаний [10]. В таких системах предметное знание представлено ГЗ, а обработка данных выполняется ГНС [11].

Для обработки графовых структур используются ГНС, в том числе графовые сети внимания [12], включающие структуры ГЗ и выявленные зависимости при формировании предсказаний. Существующие НСС ориентированы преимущественно на решение задач в отдельных ПрО. Инвариантные компоненты их онтологической организации и механизмы междоменного переноса не формализованы.

В обзоре [13] систематизированы методы нейросимвольных рассуждений с помощью ГЗ; в [14] причинно-ориентированный механизм объяснения встроен непосредственно в ГНС; в [15] в сеть встраиваются обучаемые нечёткие правила для интерпретируемой классификации медицинских изображений; в [16] интерпретируемость графовой сети усиливается интеграцией внешних предметных знаний; в [17] предложены объяснения для задач дополнения ГЗ. Онтологическая составляющая объяснимого искусственного интеллекта рассматривается в обзоре [18].

В настоящей работе под *интерпретируемостью* понимается возможность проследить формирование предсказания через семантические связи ГЗ: от наблюдаемого признака к целевой характеристике [1]; интерпретируемость определяется структурой онтологии и связями между её концептами. *Объяснение* рассматривается как представление этого процесса в форме подграфа вывода, набора семантических путей или их текстового описания.

2 Паттерн «Объект анализа – Признак – Целевая характеристика»

ОП задаёт доменно-инвариантную структуру онтологии интерпретируемой НСС. В его состав входят классы концептов, предикаты и ограничения, не зависящие от ПрО. Наполнение признаков и целевых характеристик определяется применением ОП в конкретной ПрО.

ОП включает следующие классы сущностей.

Объект анализа (*AnalysisObject*) – сущность ПрО, для которой выполняется анализ и формируется предсказание. Объект описывается набором атрибутов, получаемых из исходных данных и производных признаков.

Признак (*Feature*) – характеристика объекта анализа, используемая при построении предсказания. Состав признаков определяется ПрО.

Целевая характеристика (*TargetCharacteristic*) – концепт ПрО, отражающий интерпретируемое свойство объекта анализа и являющийся объектом предсказания или объяснения.

Значение целевой характеристики (*TargetMeasurement*) – значение целевой характеристики, полученное в результате наблюдения, измерения или экспертной оценки и используемое при обучении и валидации модели.

Разделение классов *TargetCharacteristic* и *TargetMeasurement* отражает различие между концептами ПрО и результатами их измерения. Наличие этих классов упрощает расширение онтологии и формулирование зависимостей между признаками и характеристиками.

Семантические связи ОП задаются бинарными предикатами.

- *has_feature* (имеет_признак): домен – *AnalysisObject*, ко-домен – *Feature*. Связывает объект анализа с наблюдаемым признаком.
- *associated_with* (ассоциируется_с): домен – *Feature*, ко-домен – *TargetCharacteristic*. Отражает связь признака с целевой характеристикой. Количественная оценка этой связи определяется при построении ГЗ для конкретной ПрО.
- *correlates_with* (коррелирует_с): домен и ко-домен – *TargetCharacteristic*. Описывает взаимосвязи между целевыми характеристиками и используется при задании предметных ограничений.

Композиция предикатов *has_feature* и *associated_with* образует элементарный семантический путь вывода вида «Объект анализа – Признак – Целевая характеристика». Данный путь является базовой структурой интерпретации результатов в рамках предлагаемого ОП. Для описания ОП используются языки *OWL* и *RDF*. Фрагмент спецификации инвариантного ядра в синтаксисе *Turtle* имеет вид:

```
:AnalysisObject          a owl:Class.
:Feature                  a owl:Class.
:TargetCharacteristic     a owl:Class.
:TargetMeasurement       a owl:Class.
:has_feature a owl:ObjectProperty;
  rdfs:domain :AnalysisObject;
  rdfs:range :Feature.
:associated_with a owl:ObjectProperty;
  rdfs:domain :Feature;
  rdfs:range :TargetCharacteristic.
```

Спецификация задаёт структуру ОП и служит основой для построения ГЗ, используемого в НСС. Схема ОП представлена на рисунке 1.

ОП содержит набор аксиом, определяющих структуру онтологии и правила формирования интерпретации.

Для предикатов *has_feature* и *associated_with* задаются ограничения домена и ко-домена. Предикат *has_feature* связывает экземпляры классов *AnalysisObject* и *Feature*, а предикат *associated_with* – экземпляры классов *Feature* и *TargetCharacteristic*. Ограничения предотвращают формирование семантически некорректных связей.

Классы *AnalysisObject*, *Feature*, *TargetCharacteristic* и *TargetMeasurement* являются попарно дизъюнктивными. Один и тот же индивид не может одновременно принадлежать нескольким классам ОП.

Предикат *correlates_with* задаётся как симметричный. Если одна целевая характеристика связана отношением корреляции с другой, то справедливо и обратное отношение.

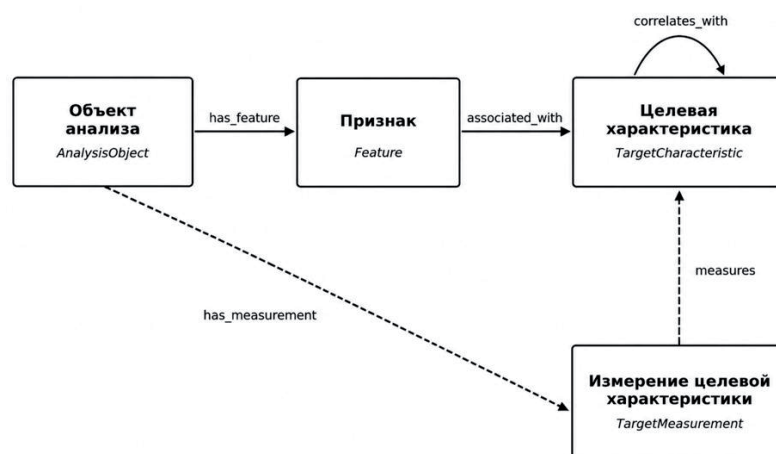


Рисунок 1 – Схема онтологического паттерна

Для отношения *associated_with* может задаваться характеристика *associationStrength*, отражающая силу связи между признаком и целевой характеристикой. Способ определения данного значения зависит от конкретной реализации и может основываться на статистических оценках, экспертных знаниях или параметрах обучаемой модели.

3 Метод проектирования нейросимвольной системы на основе паттерна

Проектирование начинается с выделения объекта анализа и целевых характеристик ПрО. Далее выполняется выделение признаков объекта анализа на основе знания ПрО. Каждый признак отображается на концепт класса *Feature* и включается в онтологическую модель.

Устанавливаются связи между признаками и целевыми характеристиками. Отношения *associated_with* задаются на основе статистических зависимостей, экспертных знаний или их комбинации.

Построенная онтология отображается в ГЗ. На следующем этапе обучается ГНС. В настоящей работе используется ГНС внимания, но допускается применение других моделей обработки графов.

После обучения модели формируются объясняющие пути, связывающие объект анализа, признаки и целевые характеристики. Интерпретация результата представляется в виде подграфа вывода или набора семантических путей, а её качество может оцениваться специализированными метриками на основе онтологии.

Схема метода проектирования НСС представлена на рисунке 2. Этапы концептуализации ПрО, выделения признаков и построения онтологии зависят от рассматриваемого домена. Построение ГЗ, обучение графовой модели и формирование объясняющих путей определяются инвариантной структурой паттерна и воспроизводятся при его переносе между ПрО.



Рисунок 2 – Схема метода проектирования нейросимвольной системы

4 Объяснимость как следствие онтологической модели

Объяснение строится на основе онтологии. Элементарное объяснение предсказания есть семантический путь, составленный из ребра *has_feature* и ребра *associated_with*. Онтология фиксирует допустимые типы связей и их семантику. Специалист может сопоставить путь с предметным знанием и принять либо опровергнуть полученную интерпретацию.

Применение ОП можно показать на примере дерматоскопической диагностики. Пусть для изображения *o* графовая модель сформировала предсказание класса «меланома» *t*. Объясняющий путь строится из двух рёбер: ребро *has_feature* связывает *o* с присутствующим на изображении признаком «структурная гетерогенность» *f*, а ребро *associated_with* связывает этот признак с целевой характеристикой «меланома», поскольку в ГЗ задана соответствующая

щая значимая ассоциация. Полученный путь «*o* – *has_feature* – структурная гетерогенность – *associated_with* – меланома» – допускает проверку специалистом: структурная неоднородность относится к признанным дерматоскопическим индикаторам злокачественности [19]. Если модель опирается на признак, не имеющий значимого ребра к предсказанному классу, путь не строится. Таким образом, наличие и состав объяснения определяются структурой онтологии, а не постобработкой.

Для количественной оценки качества объяснений используется структурная метрика, анализирующая граф вывода. Метрика учитывает наличие значимого объясняющего пути и степень его использования моделью при формировании решения. Поскольку метрика определяется на уровне онтологической модели ГЗ, она сохраняет применимость при переносе ОП на различные ПрО.

Объясняющим путём для предсказания целевой характеристики t объекта o называется путь $\pi = (o \rightarrow f \rightarrow t)$, состоящий из ребра *has_feature* (объект обладает признаком f) и ребра *associated_with* (признак ассоциирован с целевой характеристикой t). Путь считается значимым, если одновременно выполняются два условия: нормированная выраженность признака c объекта o удовлетворяет условию $c(f, o) > \tau$, $\tau = 0,2$, а связь *associated_with* становится статистически значимой после поправки на множественные сравнения $q < 0,05$.

Основной характеристикой интерпретируемости является покрытие значимыми объясняющими путями. Для каждого объекта o вводится индикатор

$$I_n = \begin{cases} 1, & \text{если существует хотя бы один значимый путь } \pi, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Тогда показатель покрытия $GPI_{cov} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n$, где N – количество объектов выборки.

Дополнительно оценивается взвешенная согласованность объясняющих путей, отражающая долю вклада значимых путей в итоговое решение:

$$GPI_w = \frac{\sum_{\pi \in \Pi_{sig}} w(\pi)}{\sum_{\pi \in \Pi} w(\pi)},$$

где Π – множество всех путей от объекта o к предсказанной целевой характеристике t , $\Pi_{sig} \subseteq \Pi$ – множество значимых путей.

Вес отдельного пути вычисляется по формуле $w(\pi) = c(f, o) \cdot \alpha_e$, где $c(f, o)$ – нормированная выраженность признака объекта, а α_e – коэффициент внимания ребра *associated_with* между признаком f и целевой характеристикой t , полученный в процессе обучения ГНС внимания. Значения GPI_{cov} и GPI_w вычисляются для каждого объекта и затем усредняются по всей выборке. В качестве дополнительной проверки объяснений используется тест верности. Узлы графа, соответствующие признакам, последовательно удаляются в порядке убывания их вклада в предсказание (например, по величине коэффициента внимания α_e). Корректное объяснение должно приводить к монотонному снижению уверенности модели при удалении наиболее значимых признаков.

5 Отображение онтологии на графовую нейронную сеть

Связь онтологии с ГНС устанавливается на двух уровнях.

На *структурном уровне* классы ОП отображаются в типы узлов ГЗ, а предикаты – в типизированные рёбра. Ограничения онтологии фиксируют допустимую топологию графа, поэтому механизм передачи сообщений графовой сети внимания (*GAT*) действует только вдоль разрешённых типов связей, и любой путь вывода основан на онтологии.

На *параметрическом уровне* атрибут *associationStrength* инициализируется статистически значимой мерой связи между признаком и целевой характеристикой. В процессе обуче-

ния этот атрибут уточняется как коэффициент внимания соответствующего ребра в последнем слое *GAT*. Таким образом, структура определяет, что может быть связано, а данные – что действительно связано и насколько сильно.

Онтологические ограничения учитываются при обучении. Функция потерь включает основной член ошибки предсказания и регуляризирующий член, штрафующий нарушение структуры взаимосвязей целевых характеристик, заданной предикатом *correlates_with*:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{pred}} + \lambda \cdot \mathcal{R},$$

где $\mathcal{L}_{\text{pred}}$ – стандартная функция потерь (например, кросс-энтропия для классификации или среднеквадратичная ошибка для регрессии), λ – гиперпараметр, управляющий силой регуляризации, $\mathcal{R}$ – штраф за несоответствие между предсказанными значениями целевых характеристик и их известными корреляционными связями:

$$\mathcal{R} = \sum_{(i,j) \in E_{\text{corr}}} (\text{sim}(\hat{y}_i, \hat{y}_j) - \rho_{ij})^2,$$

где E_{corr} – множество рёбер *correlates_with* между целевыми характеристиками i и j ; $\hat{y}_i$ и $\hat{y}_j$ – предсказания модели для соответствующих характеристик; $\text{sim}(\cdot)$ – функция сходства (например, косинусное сходство или коэффициент корреляции Пирсона); ρ_{ij} – заданная в онтологии эталонная мера связи (например, экспертно определённый коэффициент корреляции). Регуляризатор способствует тому, чтобы предсказания модели согласовывались с известной структурой зависимостей между целевыми характеристиками.

Обучению подлежит только графовый модуль (слой внимания и классификатор), тогда как энкодеры признаков используются в режиме фиксированных параметров. Это предотвращает искажение семантики признаков в процессе обучения и сохраняет прослеживаемость связи «онтология – ГЗ – архитектура – обучение»: узлы и рёбра сети сохраняют предметную семантику на всех этапах.

Отображение онтологии на ГНС_Q и интерпретация объяснения могут быть представлены следующим псевдокодом.

Вход: онтология O (классы, предикаты, ограничения); обучающая выборка; извлечённые признаки объектов.

Выход: обученная ГНС внимания; объясняющие пути; значение метрики интерпретируемости.

- 1) Для каждого класса O создать тип узла ГЗ; для каждого предиката – тип ребра.
- 2) Для каждого объекта o добавить узел и рёбра *has_feature* к присутствующим признакам (вес – нормированная выраженность признака $c(f, o)$).
- 3) Для каждой пары «признак – целевая характеристика» вычислить статистическую меру связи (например, корреляцию Пирсона); включить ребро *associated_with* только при статистической значимости после поправки на множественность ($q < 0,05$); вес ребра инициализируется значением *associationStrength*.
- 4) Инициализировать ГНС внимания топологией ГЗ; механизм передачи сообщений ограничен типами рёбер, заданными онтологией.
- 5) Обучить графовый модуль, минимизируя $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{pred}} + \lambda \mathcal{R}$ с онтологической регуляризацией; веса рёбер *associated_with* уточняются механизмом внимания, т.е. финальный вес ребра становится равным коэффициенту внимания α_e из последнего слоя *GAT*.
- 6) Извлечь объясняющие пути (композиции рёбер *has_feature* и *associated_with*) и вычислить компоненты метрики интерпретируемости (*GPI_cov*, *GPI_w*).

6 Перенос паттерна между предметными областями

Возможность переноса предложенного ОП показана на двух ПрО. В обоих случаях используется одно и то же инвариантное ядро, включающее классы и предикаты, описанные в разделе 2. Различается наполнение сущностей и отношений ПрО.

Задача 1 – Применение ОП для психологического профилирования. В задаче анализа пользователей социальных сетей класс «Объект анализа» соответствует профилям пользова-

телей. Признаки формируются на основе поведенческих и визуальных модальностей цифровой активности, а целевые характеристики соответствуют психометрическим факторам личности. Измерения целевых характеристик получены с использованием известных психологических методик. Отношения *associated_with* связывают поведенческие признаки с факторами личности, тогда как отношения *correlates_with* отражают взаимосвязи между факторами [1].

Задача 2 – Применение ОП для дерматоскопической диагностики. В задаче анализа изображений новообразований кожи объектом анализа является дерматоскопическое изображение. Признаки соответствуют дескрипторам правила *ABCD* (асимметрия, нерегулярность границы, вариативность цвета и диаметр) [19], а также показателям структурной гетерогенности. Целевыми характеристиками являются диагностические категории, измерения которых определяются клиническим диагнозом. Отношения *associated_with* связывают выявленные дерматоскопические признаки с диагностическими категориями. Постановка задачи основана на правиле [19] и наборе данных [20].

Сопоставление двух реализаций ОП (таблица 1) показывает, что инвариантными остаются классы и предикаты, способ построения ГЗ, тип обучаемой модели и механизм формирования объяснений.

Таблица 1 – Сопоставление доменно-инвариантных и доменно-специфичных элементов паттерна

Элемент проектирования	Инвариантно (ядро паттерна)	Домен 1 – Психология	Домен 2 – Дерматоскопия
Объект анализа	класс <i>AnalysisObject</i>	профиль соцсети	дерматоскопическое изображение
Признаки	класс <i>Feature</i> , предикат <i>has_feature</i>	данные цифровой активности и визуальные	дескрипторы <i>ABCD</i> и структуры
Целевая характеристика	класс <i>TargetCharacteristic</i>	факторы личности	диагностические категории
Измерение	класс <i>TargetMeasurement</i>	психологическая методика	клинический диагноз
Ассоциации	предикат <i>associated_with</i>	связь данных цифровой активности с факторами	связь дескрипторов с диагнозом
Обучаемая модель	графовая нейронная сеть	графовые сети внимания	графовые сети внимания
Механизм объяснения	семантический путь в графе	идентичен	идентичен

Доменно-зависимыми являются состав признаков и целевых характеристик, источники ассоциаций и используемые измерительные методики. Сопоставление двух онтологий с выделением общего ядра представлено на рисунке 3.

Для формализации переносимости ОП разграничиваются терминологический и фактологический компоненты онтологии. ОП как терминологический компонент (*TBox*) задаётся четвёркой $P = \langle C, R, A, M \rangle$, где C – множество классов, R – множество типов предикатов, A – онтологические аксиомы, M – механизм вывода интерпретации (семантический путь). Реализация ОП в конкретной ПрО представляет собой отображение, которое наполняет фактологический компонент (*ABox*) экземплярами классов «Признак» и «Целевая характеристика», а также определяет источник весов ассоциаций.

Для рассмотренных ПрО без изменений сохраняются элементы *TBox* онтологии. Доменная адаптация сводится к пополнению *ABox*. Сохранение единого онтологического ядра при существенном различии ПрО подтверждает доменную независимость предложенного ОП и общность метода проектирования НСС.

Работоспособность ОП подтверждена количественно в двух рассмотренных ПрО.

Результаты в психологическом домене представлены в [1].



Рисунок 3 – Психологическая и дерматоскопическая реализации паттерна с выделением общего онтологического ядра

В дерматоскопическом домене (HAM10000 [20], 10 015 изображений, 7 диагностических классов) получены следующие значения показателей работы модели: извлечение признаков $Accuracy = 0,807$ и $AUC = 0,955$; при равной точности рассуждающих модулей ($\approx 0,67$) отделено графовое рассуждение, опирающееся на концепты, от моделей типа «чёрный ящик» без онтологической опоры $GPI_w = 0,42$ (GAT) при покрытии $GPI_{cov} \approx 1,0$. Переносимость подтверждена внешней валидацией на независимом наборе ISIC 2018¹ (1 511 изображений), где воспроизведены показатели классификатора и значимые рёбра ГЗ. ОП апробирован на задачах интерпретируемой классификации токсичных текстов и классификации эмоций.

ОП предполагает наличие полной и непротиворечивой предметной онтологии. При неполной онтологии часть решений модели не покрывается объясняющими путями; это состояние диагностируется метрикой (снижение GPI_{cov}) и указывает на необходимость расширения словаря признаков. Противоречивые или ложные экспертные ассоциации отсеиваются на этапе статистической валидации рёбер: связи, не подтверждённые данными после поправки на множественность проверок, в ГЗ не включаются. Качество объяснений ограничено качеством исходной концептуализации: ОП структурирует и верифицирует предметные знания, но не заменяет доменную экспертизу, а при смене ПрО требуется повторная реализация словаря признаков и целевых характеристик.

ОП реализован в программном комплексе, включающем модули: извлечения признаков; наполнения ГЗ по правилам ОП; нейросимвольного вывода и генерации объяснений с ранжированием семантических путей. Веб-интерфейс визуализирует объясняющие пути и вклад признаков, обеспечивая возможность экспертной верификации результатов анализа.

Заключение

Предложен доменно-независимый ОП проектирования интерпретируемых НСС анализа данных «Объект анализа – Признак – Целевая характеристика» и метод его применения. ОП включает классы, типы отношений, способ построения ГЗ, тип обучаемой модели и механизм формирования объяснений.

¹ ISIC 2018 Challenge (International Skin Imaging Collaboration) – международный конкурс по анализу изображений кожных поражений. <https://challenge.isic-archive.com/landing/2018/>.

Применение ОП в задачах психологического профилирования и дерматоскопической диагностики показало, что при различии ПрО сохраняются структура онтологии, механизм вывода и способ формирования объяснений. Новым является выделение доменно-инвариантного ядра проектирования, сохраняемого при изменении ПрО, а также метод построения объясняющих путей вывода на основе онтологической структуры ГЗ.

Список литературы

- [1] **Жданова А.Н.** Онтологический подход к предсказанию психологических характеристик пользователей соцсетей на основе графов знаний. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2025. №3. С.40-59. DOI: 10.14357/20718594250304.
- [2] **Studer R., Benjamins V.R., Fensel D.** Knowledge Engineering: Principles and Methods. *Data & Knowledge Engineering*. 1998. Vol.25(1-2). P.161-197.
- [3] **Hitzler P., Krötzsch M., Rudolph S.** Foundations of Semantic Web Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2009. 455 p.
- [4] **Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.** Инженерия знаний. Модели и методы. СПб.: Лань, 2016. 324 с.
- [5] **Gangemi A.** Ontology Design Patterns for Semantic Web Content. *The Semantic Web – ISWC 2005*. Berlin: Springer, 2005. P.262-276.
- [6] **Presutti V., Gangemi A.** Pattern-Based Ontology Design. *Ontology Engineering in a Networked World*. Berlin: Springer, 2012. P.35-64. DOI: 10.1007/978-3-642-24794-1_3.
- [7] **Blomqvist E., Hammar K., Presutti V.** Engineering Ontologies with Patterns – The eXtreme Design Methodology. *Ontology Engineering with Ontology Design Patterns*. Amsterdam: IOS Press, 2016. P.23-50. DOI: 10.3233/978-1-61499-676-7-23.
- [8] **Боргест Н.М.** Научный базис онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2013. Т.3. №1. С.7-25.
- [9] **Загоруйко Ю.А.** Построение порталов научных знаний на основе онтологии. *Вычислительные технологии*. 2007. Т.12. Спец. вып. С.169-177.
- [10] **d’Avila Garcez A., Lamb L.C.** Neurosymbolic AI: The 3rd Wave. *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol.56. P.12387-12406. DOI: 10.48550/arXiv.2012.05876.
- [11] **Hogan A., Blomqvist E., Cochez M.** et al. Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021. Vol.54(4). Art.71. DOI: 10.1145/3447772.
- [12] **Velicković P., Cucurull G., Casanova A.** et al. Graph Attention Networks. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2018. 12 p. DOI: 10.48550/arXiv.1710.10903.
- [13] **Liu L., Wang Z., Tong H.** Neural-Symbolic Reasoning over Knowledge Graphs: A Survey from a Query Perspective. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2412.10390.
- [14] **Zheng K., Yu S., Chen B.** CI-GNN: A Granger Causality-Inspired Graph Neural Network for Interpretable Brain Network-Based Psychiatric Diagnosis. *Neural Networks*. 2024. Vol.172. Art.106147. arXiv:2301.01642v3 [stat.ML] 28 Jan 2024.
- [15] **Sengupta P., Rekik I.** FireGNN: Neuro-Symbolic Graph Neural Networks with Trainable Fuzzy Rules for Interpretable Medical Image Classification. arXiv preprint arXiv:2509.10510. 2025.
- [16] **Raj K. A** Neuro-symbolic Approach to Enhance Interpretability of Graph Neural Network through the Integration of External Knowledge. *Proc. of the 32nd ACM Int. Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM)*. 2023. DOI: 10.1145/3583780.3616008.
- [17] **Chang H., Ye J., Lopez Avila A., Du J., Li J.** Path-based Explanation for Knowledge Graph Completion. *Proc. of the 30th ACM SIGKDD Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*. 2024. DOI: 10.1145/3637528.3671683.
- [18] **Barredo Arrieta A.** et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*. 2020. Vol.58. P.82-115. DOI: 10.48550/arXiv.1910.10045.
- [19] **Nachbar F., Stolz W., Merkle T.** et al. The ABCD Rule of Dermatoscopy: High Prospective Value in the Diagnosis of Doubtful Melanocytic Skin Lesions. *Journal of the American Academy of Dermatology*. 1994. Vol.30(4). P.551-559.
- [20] **Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H.** The HAM10000 Dataset, a Large Collection of Multi-Source Dermatoscopic Images of Common Pigmented Skin Lesions. *Scientific Data*. 2018. Vol.5. Art.180161. DOI: 10.1038/sdata.2018.161.

Сведения об авторе

Жданова Александра Николаевна, 1986 г. рождения. Окончила Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва в 2009 г., к.т.н. (2012). Доцент кафедры программных систем Самарского университета. В списке научных трудов более 90 работ в области ИИ и систем поддержки принятия решений. Author ID (РИНЦ): 762284; Author ID (Scopus): 57076115300; Researcher ID (WoS): QMP-9127-2026; ORCID: 0009-0002-6370-1894. aleksandra.zhd@yandex.ru.



Поступила в редакцию 19.06.2026, после рецензирования 19.07.2026. Принята к публикации 31.07.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-491-501

Domain-independent ontology design pattern for interpretable neuro-symbolic systems

© 2026, A.N. Zhdanova

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

Interpretable neuro-symbolic data analysis systems integrating knowledge graphs and graph neural networks are typically developed for specific application domains. This paper proposes a domain-independent ontology design pattern, "Analysis Object – Feature – Target Characteristic," which defines the structure of an interpretable neuro-symbolic system in which explanation generation is governed by the ontological organization of knowledge. The pattern includes concept classes, predicates, rules for transforming the ontology into a knowledge graph, and rules for constructing a graph neural network. Based on this pattern, a design method is developed that covers the transition from domain conceptualization to knowledge graph construction, model training, and the generation of semantic explanation paths. The proposed pattern integrates knowledge structure, inference mechanisms, and explanation generation within a unified conceptual framework. The application of the pattern is demonstrated in two domains: psychological profiling of social network users and dermoscopic diagnosis of skin lesions. Domain-invariant and domain-specific ontology elements are identified, and the ontological structure is mapped onto a knowledge graph. It is shown that the pattern structure, inference mechanisms, and explanation-generation procedures are preserved across various application domains. The interpretation of a decision is determined by the ontological structure of the neuro-symbolic system and is generated through semantic relationships between the analysis object, its features, and the target characteristic.

Keywords: ontology design pattern, neuro-symbolic system, knowledge graph, graph neural networks, interpretability, explainable artificial intelligence.

For citation: Zhdanova A.N. Domain-independent ontology design pattern for interpretable neuro-symbolic systems. [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(3): 491-501. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-491-501.

Acknowledgment: The author expresses gratitude to A.V. Kupriyanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, for valuable discussions and providing valuable comments during the preparation of this paper.

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

List of figures and table

Figure 1 – Ontology design pattern structure

Figure 2 – Neuro-symbolic system design method scheme

Figure 3 – Psychological and dermoscopic implementations of the pattern highlighting the shared ontological core

Table 1 – Comparison of domain-invariant and domain-specific elements of the pattern

References

- [1] **Zhdanova AN.** Ontological Approach to Predicting Psychological Characteristics of Social Network Users Based on Knowledge Graphs [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2025; 3: 40–59. DOI: 10.14357/20718594250304.
- [2] **Studer R, Benjamins VR, Fensel D.** Knowledge Engineering: Principles and Methods. *Data & Knowledge Engineering*. 1998; 25(1-2): 161-197.
- [3] **Hitzler P, Krötzsch M, Rudolph S.** Foundations of Semantic Web Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2009. 455 p.
- [4] **Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI.** Knowledge Engineering: Models and Methods [In Russian]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2016. 324 p.
- [5] **Gangemi A.** Ontology Design Patterns for Semantic Web Content. *The Semantic Web – ISWC 2005*. Berlin: Springer, 2005. P.262-276.
- [6] **Presutti V, Gangemi A.** Pattern-Based Ontology Design. *Ontology Engineering in a Networked World*. Berlin: Springer, 2012. P.35-64. DOI: 10.1007/978-3-642-24794-1_3.
- [7] **Blomqvist E, Hammar K, Presutti V.** Engineering Ontologies with Patterns – The eXtreme Design Methodology. *Ontology Engineering with Ontology Design Patterns*. Amsterdam: IOS Press, 2016. P.23-50. DOI: 10.3233/978-1-61499-676-7-23.
- [8] **Borgest NM.** Scientific Basis of the Ontology of Designing [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2013; 1(7): 7–25.
- [9] **Zagorulko YuA.** Development of Scientific Knowledge Portals Based on Ontologies [In Russian]. *Computational Technologies*, 2007; 12(2): 169–177.
- [10] **d’Avila Garcez A, Lamb LC.** Neurosymbolic AI: The 3rd Wave. *Artificial Intelligence Review*. 2023; 56: 12387-12406. DOI: 10.48550/arXiv.2012.05876.
- [11] **Hogan A, Blomqvist E, Cochez M.** et al. Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021; 54(4): Art.71. DOI: 10.1145/3447772.
- [12] **Veličković P, Cucurull G, Casanova A.** et al. Graph Attention Networks. International Conference on Learning Representations (ICLR). 2018. 12 p. DOI: 10.48550/arXiv.1710.10903.
- [13] **Liu L, Wang Z, Tong H.** Neural-Symbolic Reasoning over Knowledge Graphs: A Survey from a Query Perspective. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2412.10390.
- [14] **Zheng K, Yu S, Chen B.** CI-GNN: A Granger Causality-Inspired Graph Neural Network for Interpretable Brain Network-Based Psychiatric Diagnosis. *Neural Networks*. 2024; 172: Art.106147. arXiv:2301.01642v3 [stat.ML] 28 Jan 2024.
- [15] **Sengupta P, Rekik I.** FireGNN: Neuro-Symbolic Graph Neural Networks with Trainable Fuzzy Rules for Interpretable Medical Image Classification. arXiv preprint arXiv:2509.10510. 2025.
- [16] **Raj K.** A Neuro-symbolic Approach to Enhance Interpretability of Graph Neural Network through the Integration of External Knowledge. *Proc. of the 32nd ACM Int. Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM)*. 2023. DOI: 10.1145/3583780.3616008.
- [17] **Chang H, Ye J, Lopez Avila A, Du J, Li J.** Path-based Explanation for Knowledge Graph Completion. *Proc. of the 30th ACM SIGKDD Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*. 2024. DOI: 10.1145/3637528.3671683.
- [18] **Barredo Arrieta A.** et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges Toward Responsible AI. *Information Fusion*. 2020; 58: 82-115. DOI: 10.48550/arXiv.1910.10045.
- [19] **Nachbar F, Stolz W, Merkle T.** et al. The ABCD Rule of Dermatoscopy: High Prospective Value in the Diagnosis of Doubtful Melanocytic Skin Lesions. *Journal of the American Academy of Dermatology*. 1994; 30(4): 551-559.
- [20] **Tschandl P, Rosendahl C, Kittler H.** The HAM10000 Dataset, a Large Collection of Multi-Source Dermatoscopic Images of Common Pigmented Skin Lesions. *Scientific Data*. 2018. Vol.5. Art.180161. DOI: 10.1038/sdata.2018.161.

About the author

Aleksandra Nikolaevna Zhdanova (b.1986) graduated from the S.P. Korolev Samara State Aerospace University in 2009, Candidate of Technical Sciences (2012). Associate Professor at the Department of Software Systems, Samara University. She is the author of more than 90 scientific publications in the fields of artificial intelligence and decision support systems. Author ID (RSCI): 762284; Scopus Author ID: 57076115300; Researcher ID (WoS): QMP-9127-2026; ORCID: 0009-0002-6370-1894. aleksandra.zhd@yandex.ru.

Received June 19, 2026. Revised July 19, 2026. Accepted July 31, 2026.



Программный конвейер для формирования шаблонов онтологий из текстов на естественном языке

© 2026, С.А. Федосин ✉, С.А. Ямашкин, А.А. Сайгин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва), Саранск, Россия

Аннотация

Рассматривается задача извлечения и связывания фактов из русскоязычных юридических текстов и конвейерный способ её решения для формирования базы знаний в виде иерархического словаря, как шаблона онтологии предметной области. Предлагаемый программный конвейер включает этапы нормализации входных данных, лексический анализ с извлечением именованных сущностей, синтаксический анализ с построением абстрактного синтаксического дерева и отображение полученного словаря в *RDF/OWL*-представление. В лексическом анализе использован гибридный модуль извлечения сущностей, сочетающий модели на основе машинного обучения и правила, заданные грамматиками и шаблонами. Проведена экспериментальная оценка качества анализа на специализированном корпусе решений региональных подразделений Федеральной антимонопольной службы России: показано, что добавление правил к обученным моделям приводит к приросту интегральных метрик извлечения сущностей около 5%. На этапе синтаксического анализа предложена конфигурируемая грамматика, позволяющая отделять разные дела в одном юридическом документе и связывать извлечённые сущности в структурированный словарь. Такой словарь может быть отображён в онтологический граф и использован как слой онтологизации для хранения в графовой базе знаний и сопоставления с подходами на основе больших языковых моделей.

Ключевые слова: извлечение фактов, шаблон онтологии, обработка естественного языка, извлечение сущностей, извлечение отношений, машинное обучение, словарь.

Цитирование: Федосин С.А., Ямашкин С.А., Сайгин А.А. Программный конвейер для формирования шаблонов онтологий из текстов на естественном языке. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.502-514. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-502-514.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках НИР «Создание лаборатории искусственного интеллекта» по программе социально-экономического развития Республики Мордовия на 2022-2026 гг.

Вклад авторов: Федосин С.А. – экспертиза исходных данных и результатов; Ямашкин С.А. – постановка задачи, разработка концепции, формализация модели; Сайгин А.А. – разработка программного кода и обработка текстов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Большой объём текстовой информации в Интернете доступен для автоматизированной обработки с целью извлечения новых полезных знаний и моделирования предметных областей (ПрО). Извлечение фактов при этом является основой для построения онтологий, семантического поиска и систем поддержки принятия решений [1].

Цель статьи – разработка программного конвейера (ПрК), обеспечивающего извлечение упорядоченных наборов данных из слабоструктурированных документов, позволяющего повысить точность извлечения данных и снизить ресурсоёмкость процесса обработки. ПрК должен обеспечивать сбор и нормализацию текстовых данных, извлечение именованных

сущностей, выделение отношений между ними и формирование иерархических словарей, которые могут рассматриваться как шаблоны онтологий ПрО.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать подходы к извлечению фактов из текстов на естественном языке (ЕЯ);
- спроектировать архитектуру ПрК, включающего этапы сбора и нормализации данных, лексического и синтаксического анализа;
- разработать модуль извлечения именованных сущностей и связей на основе сочетания методов машинного обучения (ММО) и правил, заданных грамматиками и шаблонами;
- сформировать иерархические словари в машиночитаемом формате на основе выделенных сущностей и отношений, определить правила их отображения средствами *RDF/OWL*-представления в шаблоны онтологического описания ПрО;
- провести оценку качества извлечения фактов на специализированном наборе данных.

1 Программный конвейер обработки текстов

Процесс обработки текстов на ЕЯ можно осуществить посредством ПрК. На первом этапе проводится извлечение и нормализация данных, очистка их от артефактов вёрстки, обработка кодировок и сегментация текста на предложения. На этапе лексического анализа текста осуществляется семантическая разметка текста. После того, как лексемы найдены, определяются логические связи между ними, превращая изолированные термины в факты. Для каждой пары сущностей в одном логическом блоке проверяется наличие семантической связи. На заключительном этапе осуществляется перевод полученных результатов в машиночитаемый формат. Данные упаковываются в иерархическую структуру (например, *JSON*-объект), и полученный объект экспортируется в требуемый формат (см. рисунок 1).

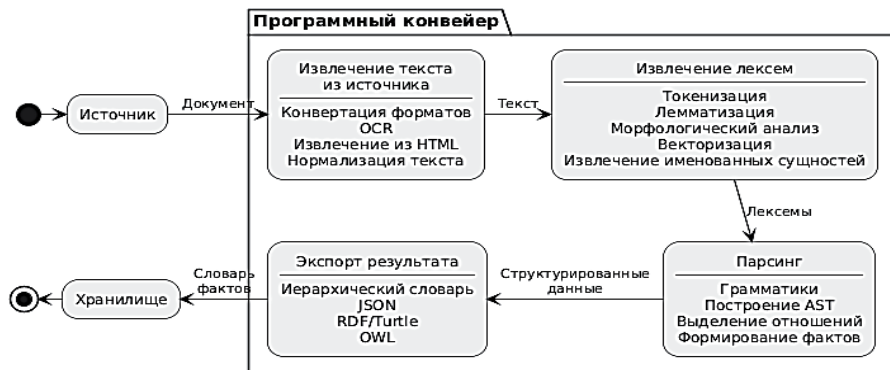


Рисунок 1 – Схема программного конвейера обработки текстов

В ПрК реализованы конвертеры для следующих форматов: текстовых (*DOC*, *RTF*, *DOCX*, *ODT*, *PDF*); табличных (*XLS*, *XLSX*, *ODS*); графических (*JPEG*, *TIFF* и т.п.). Для графических форматов требуется применение оптического распознавания (*Optical Character Recognition*, *OCR*). Задача ПрК – независимо от исходного формата входного файла сформировать текстовый выход в кодировке *UTF-8* с сохранением логической структуры документа.

2 Лексический анализ текста

Исходный текст преобразуется в формализованное представление потока лексем, пригодное для анализа и извлечения информации. Каждая лексическая единица снабжается набором атрибутов: позиция в тексте; словоформа; нормальная форма; часть речи; морфологические характеристики; признаки, характеризующие контекст употребления. Задача извле-

чения именованных сущностей (*Named Entity Recognition, NER*) рассматривается как задача классификации [2].

Ранние методы автоматизированного извлечения фактов из текстов на ЕЯ базировались на явном кодировании лингвистических и логических правил, а также на использовании шаблонов. В методах, основанных на правилах, знания специалиста Про формализуются в виде набора инструкций, которые применяют к тексту для извлечения фактов [3]. Способ прописать правила для извлечения фактов, используя регулярные выражения, эффективен в случаях, когда в тексте есть подстроки, о которых можно сделать вывод о принадлежности строки, её части или соседнего фрагмента к какому-либо классу [4].

В методе концептуального моделирования строится граф, в вершинах которого находятся понятия, а на рёбрах задаются связи между понятиями. Метод включает построение множества концептуальных графов, которые агрегируются, и на этой основе выделяются формальные понятия, между которыми можно выстраивать связи [5].

Распространённым методом извлечения фактов из текстовой информации являются правила, построенные на основе контекстно-свободных грамматик (КС-грамматик) [6]. Шаблоны, написанные с применением КС-грамматик, можно применить для текстов на ЕЯ.

В онтологическом подходе для каждой категории фактов разрабатывается набор шаблонов извлечения, которые обобщают имеющиеся в тексте субъекты, объекты и отношения [7].

На первом этапе работы ПрК текст разбивается на отдельные слова, слоги, знаки препинания, отступы. Это лингвистический процесс, основанный на правилах и регулярных выражениях. Далее текстовые токены преобразуются в векторы из чисел. ПрК анализирует полученные векторы признаков, определяет границы сущностей и их типы (см. рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема извлечения именованных сущностей

Системы на базе ММО обладают устойчивостью к вариативности языка, их качество зависит от качества обучающей выборки, результаты сложнее интерпретировать. В гибридном подходе одна часть задачи решается с помощью правил, другая – с помощью ММО. Многие сущности могут быть описаны шаблонами, общими для разных текстов, например: номера телефонов, адреса электронной почты, признаки различных документов. Такие сущности удобно извлекать с помощью регулярных выражений. Наименования, которые не меняются в тестах, такие как топонимы, можно искать с помощью словарей. Другие сущности, не обладающие таким постоянством (имена, фамилии, названия организаций и др.), распознаются с помощью обученной модели. Такой подход применён в библиотеке *SpaCy*¹, где для извлечения именованных сущностей используется языковая модель.

Если существует метка, которая моделью не распознаётся, и дообучение не даёт приемлемого результата, то можно прописать набор правил, который будет использоваться совместно с моделью *SpaCy*. Для подтверждения данной гипотезы проведён ряд экспериментов. В *SpaCy* есть набор предобученных моделей, в том числе три для работы с текстами на русском языке: *ru_core_news_sm*, *ru_core_news_md* и *ru_core_news_lg*. Все три модели обучены на одном корпусе данных – *Nerus*, и содержат одинаковый набор компонентов: токенизатор, морфологию, синтаксический анализатор и *NER*. Различие между моделями состоит в наличии и размере статических векторных представлений слов, что влияет на точность, вес моде-

¹ SpaCy – открытая библиотека *Python* для продвинутой обработки ЕЯ. <https://spacy.io/>.

ли и её возможности. В маленькой модели (*sm*) нет статических векторов, в средней (*md*) – около 50000 векторов, в большой (*lg*) – 500000 векторов.

Для проверки предложенного подхода использован размеченный набор данных *slm-ct/fas_ad_practice_dataset*², который представляет собой коллекцию текстов решений региональных подразделений Федеральной антимонопольной службы (ФАС), подвергнутую предварительной подготовке. Анализ набора данных позволил составить список меток, приведённый в таблице 1.

Полученный набор данных содержит 4332 записи с 45305 размеченными метками. Обучающая выборка содержит 3118 записей, валидационная – 780, тестовая – 434. Для проверки обученных моделей используются стандартные классификационные метрики.

Точность (*precision*) показывает, какая доля ответов спрогнозирована верно. Метрика характеризует способность отличать класс от других. Полнота (*recall*) показывает долю верно спрогнозированных объектов метки из общего объёма метки. Эти метрики не зависят от соотношения классов и применимы в условиях несбалансированных выборок. На их основе выводится единый критерий – гармоническое среднее точности и полноты.

Известны различные подходы к расчёту метрик [8].

Для извлечения сущностей *EMAIL*, *URL*, *PHONE* и *LAW* написаны правила. В *SpaCy* правила легко встраиваются с помощью класса *EntityRuler* в общий конвейер обработки. Сравнение оценки моделей на тестовой выборке приведены в таблице 2. Добавление правил улучшило работу моделей, прирост метрик составил от 2 до 6%.

Таблица 1 – Список извлекаемых сущностей

Метка	Описание	Количество
<i>PER</i>	ФИО людей	13049
<i>LOC</i>	Локация (страна, область, город и т.д.)	10380
<i>ORG</i>	Название организации	9562
<i>DATE</i>	Дата	5766
<i>URL</i>	Адрес в Интернете	178
<i>EMAIL</i>	Электронная почта	1725
<i>PHONE</i>	Номер телефона	1739
<i>LAW</i>	Закон	1792
<i>CRIME</i>	Правонарушение	663
<i>PUNISH</i>	Решение по делу	451

Таблица 2 – Результаты оценки моделей

Модель	Обучение					Обучение + правила				
	<i>Micro p</i>	<i>Micro r</i>	<i>Micro F1</i>	<i>Macro F1</i>	<i>Weighted F1</i>	<i>Micro p</i>	<i>Micro r</i>	<i>Micro F1</i>	<i>Macro F1</i>	<i>Weighted F1</i>
<i>SpaCy sm</i>	0,78	0,71	0,74	0,65	0,73	0,81	0,71	0,76	0,70	0,75
<i>SpaCy md</i>	0,78	0,73	0,76	0,66	0,74	0,78	0,74	0,76	0,72	0,77
<i>SpaCy lg</i>	0,78	0,73	0,75	0,66	0,74	0,79	0,75	0,77	0,73	0,78

Для задач извлечения структуры из текстов на ЕЯ применяются большие языковые модели (БЯМ), способные выделять сущности, отношения и формировать *JSON*-подобные представления без дообучения. БЯМ целесообразно рассматривать как дополнительный семантический модуль, применяемый для обработки неоднозначных фрагментов, редких конструкций и сложных ссылок.

При выборе подхода для извлечения структуры из русскоязычных юридических документов необходимо учитывать не только качество выделения сущностей и связей, но и ресурсоёмкость решения, включая требования к локальному оборудованию, стоимость эксплуатации и зависимость от внешней вычислительной инфраструктуры.

3 Извлечение отношений

Для консолидации разрозненных сущностей в связные факты необходимо решить задачу выявления отношений между парами сущностей в неструктурированных текстовых данных.

² Hugging Face. https://huggingface.co/datasets/slm-ct/fas_ad_practice_dataset.

Автоматическое распознавание связей востребовано при анализе документов, справочников и новостных лент [9].

Известны два подхода к решению задачи извлечения отношений. Первый – синтаксический анализ: осуществляется процесс сопоставления линейной последовательности лексем некоторой формальной грамматике. Другой подход связан с применением ММО, в котором используются нейронные сети с архитектурой *seq2seq*, предназначенные для преобразования последовательностей из одной области в последовательности другой области [10]. Нейронные сети рассматривают извлечение отношений как задачу машинного перевода, что делает невозможной интерпретацию результатов. По этим причинам применяют методы на основе грамматик или совместно с ММО [11].

Для связывания лексем, полученных на этапе извлечения именованных сущностей инструментом синтаксического анализа является абстрактное синтаксическое дерево (АСД) [12]. В настоящей работе под АСД понимается дерево, вершины которого соответствуют нормализованным фактам и их компонентам (предикатам и аргументам), а листья – выделенным именованным сущностям и ключевым лексическим единицам, непосредственно участвующим в формировании факта. При построении АСД опускаются вспомогательные грамматические узлы (служебные части речи, промежуточные нетерминалы, знаки пунктуации) и свёртываются сложные синтаксические конструкции в узлы «нормализованного действия/факта», что позволяет рассматривать полученную структуру как промежуточное представление между деревом зависимостей и семантическим графом. Такое АСД сохраняет древовидную структуру на уровне предложения, но ориентировано на последующее извлечение и отображение фактов в иерархические словари и онтологические шаблоны.

Пусть имеется упорядоченная последовательность лексем: $S = \langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$. Каждая лексема t_i – это кортеж из трёх элементов: c – тип лексемы; v – строковое значение лексемы; pos – позиция в исходном тексте. На основе последовательности S строится дерево $T = (V, E)$, где V – множество узлов, а E – связи между ними.

При обработке текста узлы дерева делятся на два непересекающихся множества: $V = V_{int} \cup V_{leaf}$. Внутренние узлы V_{int} – это узлы, у которых есть дочерние элементы. Они не существуют в исходном тексте. Это грамматические или логические конструкции, которые распознаны на основе правил. Листья V_{leaf} – это конечные узлы дерева. В АСД листья ссылаются на значимые лексемы из последовательности S , извлекая значение v .

АСД в ПрК – это результат функции редукции, которая удаляет синтаксический мусор. Синтаксический анализатор *фильтрует лексемы* и *иерархизирует остаток* (оставшиеся лексемы становятся листьями, подвешенными к узлам-концептам).

Схема предлагаемого синтаксического анализатора представлена на рисунке 3. На первом этапе загружается грамматика и задаются множество типов узлов дерева и интерпретационные правила, определяющие, какие узлы преобразуются в какие поля целевой записи. На втором этапе главный модуль анализатора загружает поток лексем, применяет грамматику и строит АСД, отражающее логическую структуру документа. На третьем этапе интерпретатор АСД проходит по дереву и превращает узлы в элементы структурированных данных: поля,

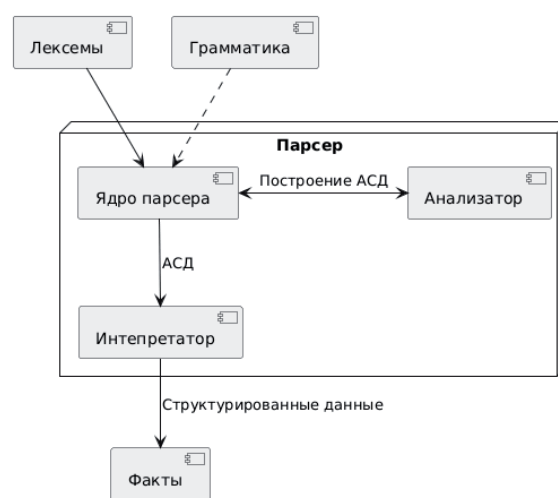


Рисунок 3 – Схема синтаксического анализатора

значения, записи и составные структуры. Четвёртый этап заключается в формировании итогового объекта структурированных данных. Для примера рассмотрен следующий документ³.

ПРЕДПИСАНИЕ О ПРЕКРАЩЕНИИ НАРУШЕНИЯ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ О РЕКЛАМЕ ПО ДЕЛУ № 076/05/18-364/2024	
29 мая 2024 года	город Ярославль
Комиссия Межрегионального управления Федеральной антимонопольной службы по Ярославской области и Костромской области по рассмотрению дел по признакам нарушения законодательства о рекламе в составе: председатель Комиссии – заместитель руководителя Управления Шушкова А. С., члены Комиссии – начальник отдела контроля органов власти и рекламы Семенюк А. В., главный специалист-эксперт отдела контроля органов власти и рекламы Солодяшкин С. Д., на основании своего решения от «29» мая 2024 г. по делу № 076/05/18-364/2024 о признании ненадлежащей рекламы услуг ООО «ВсеИнструменты.ру» с нарушением требований пунктов 4, 10 части 3 статьи 5, статьи 8, частей 1, 2 статьи 18 Федерального закона от 13.03.2006 г. № 38-ФЗ «О рекламе» (далее – Федеральный закон «О рекламе»), в соответствии с пунктом 2 части 1 статьи 33, частью 1 статьи 36 Федерального закона «О рекламе», пунктами 4, 30, 37-42, 44, 45, 48 Правил рассмотрения антимонопольным органом дел, возбужденных по признакам нарушения законодательства Российской Федерации о рекламе, ПРЕДПИСЫВАЕТ...	

Для рассматриваемого класса документов грамматика задаётся не для полного текста на ЕЯ, а для потока уже выделенных лексем, каждая из которых имеет тип, значение и позицию в документе. В этом случае синтаксический анализатор оперирует последовательностью терминалов вида *CASE_NUMBER*, *DATE*, *LOC*, *PER*, *ORG*, *LAW*, *PHONE*, *EMAIL*, *URL*. Для данного примера документа ФАС упрощённая грамматика может быть записана в *BNF*-нотации следующим образом:

```

<root> ::= <case> | <case> <root>
<case> ::= <case_number> <date> <city> <commission> <case_body>
<case_number> ::= "CASE_NUMBER"
<date> ::= "DATE"
<city> ::= "LOC"

<commission> ::= <chairman> <members_loop>
<chairman> ::= "PER"
<members_loop> ::= "PER" <members_loop> | <skip_to_law> <members_loop> | ε
<skip_to_law> ::= "CASE_NUMBER" | "DATE" | "LOC" | "ORG" | "TEL" | "EMAIL" | "URL" | "PUNISH"

<case_body> ::= <body_item> <case_body> | <skip_to_next_case> <case_body> | ε
<body_item> ::= <violation> | <address> | <phone> | <email> | <url> | <law> | <punish>
<skip_to_next_case> ::= "DATE" | "LOC" | "PER" | "ORG" | "TEL" | "EMAIL" | "URL" | "LAW" | "PUNISH"

<violation> ::= "ORG"
<address> ::= "LOC"
<phone> ::= "TEL"
<email> ::= "EMAIL"
<url> ::= "URL"
<law> ::= "LAW"
<punish> ::= "PUNISH"

```

<root> служит корнем словаря, от которого строится иерархия дел; <case> описывает отдельно взятое дело, внутри которого содержатся <commission>, описывающее состав комиссии, и <case_body>, содержащее информацию об участниках дела, нарушениях и т.д. В комиссию попадают только метки PER, остальные пропускаются с помощью <skip_to_law>. Метка LAW является началом описания дела, поэтому начинает работать <case_body>. С помощью

³Предписание №7159/24 076/05/18-364/2024 от 7 июня 2024 г. База решений и правовых актов. Федеральная Антимонопольная служба. <https://br.fas.gov.ru/to/yaroslavsko-kostromskoe-mufas-rossii/e2972484-96d6-4d38-ae21-8e88a9605e66/?query=%E2%84%96%20076/05/18-364/2024>.

<skip_to_next_case> в дело не попадут лишние метки. Работает правило до начала следующего дела, либо до конца документа.

Сформированные на этапе синтаксического анализа иерархические словари могут быть интерпретированы как прикладные *JSON*-структуры и как шаблоны онтологического описания документов. На этом уровне каждому ключевому блоку словаря сопоставляется класс ПрО, а вложенные структуры и массивы интерпретируются как связанные сущности, соединённые объектными свойствами. Схема такого отображения документов приведена на рисунке 4. Центральным элементом шаблона является класс Case, содержащий основные атрибуты дела и связываемый с экземплярами классов Commission, Organization, LegalNorm, Address и Contacts. Состав комиссии детализируется через сущности класса Person, а контактные данные представляются как связанные сущности Phone, Email и WebResource, что обеспечивает единообразное отображение результатов извлечения в *RDF/OWL*-представление. Такая схема позволяет сопоставить *JSON*-структуру и онтологический граф и может использоваться как шаблон при обработке других документов того же класса.

Структура документа представляется формальной грамматикой, которую можно записать в конфигурационный файл. Синтаксический анализатор загружает нужную конфигурацию и применяет её к текущему набору лексем. В такой записи нетерминалы верхнего уровня задают логические блоки документа, а терминальные символы соответствуют результатам этапа *NER*; тем самым связывание сущностей выполняется по их принадлежности к распознанному структурному контексту документа.

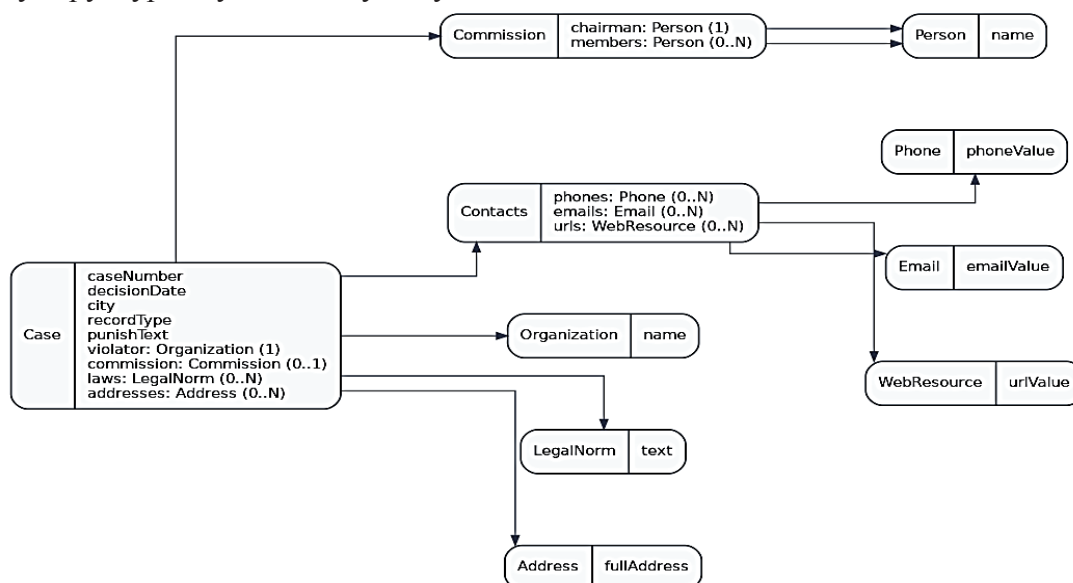


Рисунок 4 – Онтологический шаблон представления дела Федеральной антимонопольной службы

Далее документ обрабатывается лучшей моделью для извлечения именованных сущностей - дообученной *ru core news lg* с правилами. Получается следующий набор сущностей.

```
[
{"label": "CASE_NUMBER", "text": "№ 076/05/18-364/2024", "span": {"start": 92, "end": 112}},
{"label": "DATE", "text": "29 мая 2024 года", "span": {"start": 114, "end": 130}},
{"label": "LOC", "text": "город Ярославль", "span": {"start": 228, "end": 243}},
{"label": "PER", "text": "Шушкова А. С.", "span": {"start": 504, "end": 517}},
{"label": "PER", "text": "Семенюк А. В.", "span": {"start": 588, "end": 601}},
{"label": "PER", "text": "Солодяшкина С. Д.", "span": {"start": 671, "end": 688}},
{"label": "DATE", "text": "«29» мая 2024 г.", "span": {"start": 722, "end": 738}},
{"label": "CASE_NUMBER", "text": "№ 076/05/18-364/2024", "span": {"start": 747, "end": 767}},
{"label": "ORG", "text": "ООО «ВсеИнструменты.ру»", "span": {"start": 807, "end": 830}},
{"label": "LAW", "text": "части 3 статьи 5, статьи 8, частей 1, 2 статьи 18 Федерального закона от 13.03.2006 г. № 38-ФЗ «О рекламе»", "span": {"start": 869, "end": 975}},
]
```

```
{
  "label": "LAW", "text": "Федеральный закон «О рекламе»", "span": {"start": 985, "end": 1014}},
  {"label": "LAW", "text": "пунктом 2 части 1 статьи 33", "span": {"start": 1034, "end": 1061}},
  {"label": "LAW", "text": "частью 1 статьи 36 Федерального закона «О рекламе»", "span": {"start": 1063, "end": 1113}},
  {"label": "DATE", "text": "37-42", "span": {"start": 1131, "end": 1136}},
}
```

Этот набор лексем обрабатывается с помощью АСД:

```
[
  {
    "case_number": "№ 076/05/18-364/2024",
    "date": "29 мая 2024 года",
    "city": "город Ярославль",
    "commission": {
      "chairman": "Шушкова А. С.",
      "members": [
        "Семенюк А. В.",
        "Солодяшкина С. Д."
      ]
    },
    "laws": [
      "части 3 статьи 5, статьи 8, частей 1, 2 статьи 18 Федерального закона от 13.03.2006 г. № 38-ФЗ «О рекламе»",
      "Федеральный закон «О рекламе»",
      "пунктом 2 части 1 статьи 33",
      "частью 1 статьи 36 Федерального закона «О рекламе»",
      "пунктом 2.4 статьи 19.5 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях",
      "статьей 198 Арбитражного процессуального кодекса Российской Федерации"
    ],
    "violator": "ООО «ВсеИнструменты.ру»",
    "addresses": [
      "109451, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный округ Марьино, ул. Братиславская, д. 16, корп. 1"
    ],
    "phones": [],
    "emails": [],
    "urls": [],
    "punish": "наложить на граждан штраф в размере от трехсот до пятисот рублей, на должностных лиц",
    "type": "case"
  }
]
```

В результате из набора лексем получен факт в виде словаря связанных сущностей, где каждый ключ означает вид связи внутри обработанного документа. Грамматика является универсальной для обработки документов из набора данных и легко изменяемой в случаях изменения структуры текста в документе. Полученное АСД способно отделять разные дела, если они описаны в одном тексте.

4 Шаблон онтологии

После формирования структурированного *JSON*-объекта получается удобочитаемый формат представления данных, но необходимо привести его к онтологически интерпретируемому виду. В ПрК переход к представлениям на языках *RDF/OWL/Turtle* можно выполнить с помощью правил, связывающих поля *JSON* с классами, объектами и свойствами онтологической модели. Такой подход позволяет отделить задачу извлечения и нормализации данных из текста от задачи их формализации в виде онтологических конструкций, пригодных для последующего хранения в графовой базе знаний.

Алгоритм преобразования включает следующие шаги.

- 1) для корневого *JSON*-объекта определяется его онтологический тип, например *Case*, *Decision* или *Prescription* в зависимости от класса документа.
- 2) простые поля *JSON*, содержащие строковые, числовые и календарные значения (*case_number*, *date*, *city*, *type*), отображаются в свойствах соответствующего экземпляра.

- 3) вложенные объекты и массивы (*commission, members, laws, addresses*) интерпретируются как связанные экземпляры классов *Commission, Person, LegalNorm, Address* и соединяются с корневым объектом через свойства объекта.
- 4) выполняется нормализация значений: даты переводятся в стандартный формат, повторяющиеся адреса дедуплицируются, а текстовые ссылки на нормы права при необходимости разлагаются на составные элементы: закон, статья, часть, пункт.
- 5) из полученного графа фактов генерируется *RDF*-представление, которое может быть дополнено *OWL*-аксиомами, а также ограничениями целостности.

Для рассматриваемого документа итоговый *JSON*-объект может быть интерпретирован как экземпляр класса *Case*, связанный с экземпляром *Commission*, нарушителем класса *Organization*, набором сущностей класса *LegalNorm* и адресом класса *Address*. Фрагмент результата в формате *Turtle* может быть представлен следующим образом:

```
@prefix ex: <http://example.org/legal#>.
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>.

ex:case_076_05_18_364_2024 a ex:Case ;
  ex:hasCaseNumber "076/05/18-364/2024" ;
  ex:hasDecisionDate "2024-05-29"^^xsd:date ;
  ex:hasCity "Ярославль" ;
  ex:hasCommission ex:commission_076_05_18_364_2024 ;
  ex:hasViolator ex:org_vseinstrumenty ;
  ex:referencesLegalNorm ex:law_1 , ex:law_2 , ex:law_3 ;
  ex:hasAddress ex:address_1 ;
  ex:hasRecordType "case" .
ex:commission_076_05_18_364_2024 a ex:Commission ;
  ex:hasChairman ex:person_shushkova ;
  ex:hasMember ex:person_semenyuk , ex:person_solodyashkina .
ex:person_shushkova a ex:Person ;
  ex:hasName "Шушкова А. С." .
ex:person_semenyuk a ex:Person ;
  ex:hasName "Семенюк А. В." .
ex:person_solodyashkina a ex:Person ;
  ex:hasName "Солодяшкина С. Д." .
ex:org_vseinstrumenty a ex:Organization ;
  ex:hasName "ООО «ВсеИнструменты.ру»" .
ex:address_1 a ex:Address ;
  ex:hasFullAddress "109451, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный округ Марьино, ул. Братиславская, д. 16,
  корп. 1" .
ex:law_1 a ex:LegalNorm ;
  ex:hasText "части 3 статьи 5, статьи 8, частей 1, 2 статьи 18 Федерального закона от 13.03.2006 г. №
  38-ФЗ «О рекламе»" .
ex:law_2 a ex:LegalNorm ;
  ex:hasText "пунктом 2 части 1 статьи 33" .
ex:law_3 a ex:LegalNorm ;
  ex:hasText "частью 1 статьи 36 Федерального закона «О рекламе»" .
```

В таком представлении *JSON*-структура становится не только техническим форматом обмена данными, но и слоем онтологизации текста. Это позволяет рассматривать сформированный иерархический словарь как прикладной словарь полей документа и как шаблон онтологического описания, в котором выделены сущности ПрО, их атрибуты и отношения.

5 Сравнение программного конвейера с современными подходами

Исследования в области извлечения фактов из текстов на ЕЯ развиваются по нескольким направлениям. Первое направление составляют системы, основанные на правилах и формальных грамматиках [13]. Второе направление образуют обучаемые модели, ориентированные на совместное [14] или поэтапное [15] извлечение сущностей и отношений. Третье направление представлено нейросетевыми и нейросимвольными подходами [7, 16].

ПрК не относится полностью ни к одному из указанных классов. Место предлагаемого решения можно определить как специализированный гибридный конвейер, ориентирован-

ный на извлечение и связывание фактов в документах ограниченного класса с последующим формированием иерархического словаря и его отображением в онтологически интерпретируемое представление. Адаптация предложенного ПрК к другому набору данных выполняется поэтапно и не требует полной переработки, однако её трудоёмкость зависит от конкретной прикладной задачи:

- определяется новая схема целевых сущностей и их соответствие существующим меткам (*PER*, *ORG*, *DATE*, *LAW*, *PUNISH* и др.);
- корректируются или добавляются правила для формализуемых сущностей (номера дел, телефоны, адреса электронной почты, ссылки и правовые нормы);
- дообучается *NER*-модель на размеченной выборке;
- составляются грамматики синтаксического анализатора и интерпретационные правила, связывающие сущности в итоговую структуру *JSON*-представления;
- *JSON*-документ преобразуется в шаблон онтологии в формате *RDF/OWL/Turtle*.

Заключение

По результатам проведённого исследования сформулированы следующие выводы.

- Разработан ПрК, позволяющий осуществить сбор и нормализацию текстовых данных из различных электронных форматов, лексический анализ с извлечением именованных сущностей, синтаксический анализ с построением АСД и формирование машиночитаемого представления фактов в виде иерархических словарей.
- Показано, что формирование иерархических словарей в формате *JSON* на основе выделенных сущностей и отношений позволяет рассматривать полученные структуры как шаблоны онтологий ПрО, пригодные для интеграции в базы знаний и системы поиска.
- Оценка на специализированном наборе данных решений ФАС подтвердила работоспособность ПрК и показала возможность гибкой его конфигурации для решения задач извлечения и структурирования фактов из текстов на ЕЯ.

Список источников

- [1] *Массель Л.В.* Экосистема знаний как развитие и специализация цифровой экосистемы. *Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии–2023»*. Таганрог: Издатель Ступин С.А., 2023. С.155-164.
- [2] *Большакова Е.И., Воронцов К.В., Ефремова Н.Э., Клышинский Э.С., Лукашевич Н.В., Сапин А.С.* Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных М.: Изд-во НИУ ВШЭ. 2017. 269 с.
- [3] *van Ginneken B.* Fifty years of computer analysis in chest imaging: rule-based, machine learning, deep learning. *Radiological physics and technology*. 2017. V.10. No1. P.23-32. DOI: 10.1007/s12194-017-0394-5.
- [4] *Колмогорцев С.В., Сараев П.В.* Извлечение библиографии из текстов регулярными выражениями. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2017. №20. С.82-88.
- [5] *Богатырев М.Ю.* Извлечение фактов из текстов естественного языка с применением концептуальных графовых моделей. *Известия Тульского государственного университета*. 2016. Вып.7. Ч.1. С.198-207.
- [6] *Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж.* Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Вильямс. 2015. 528 с.
- [7] *Сидорова Е.А., Иванов А.И., Овчинникова К.А.* Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.114-129. DOI 10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.
- [8] *Ma X., Hovy E.* End-to-end sequence labeling via bi-directional lstm-cnns-crf. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*. 2016. P.1064-1074. DOI: 10.18653/v1/P16-1101.
- [9] *Moens M.F.* Information Extraction from Text and Beyond. *Cross-Disciplinary Advances in Applied Natural Language Processing: Issues and Approaches*. IGI Global Scientific Publishing, 2012. P.24-39. DOI: 10.4018/978-1-61350-447-5.ch003.

- [10] **Dong L., Lapata M.** Language to logical form with neural attention. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (Volume 1: Long Papers). 2016. P.33-43. DOI: 10.18653/v1/P16-1004.
- [11] **Yin P., Neubig G.** A syntactic neural model for general-purpose code generation. *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (Volume 1: Long Papers). 2017. P.440-450. DOI: 10.48550/arXiv.1704.01696.
- [12] **Falleri J.R., Morandat F., Blanc X., Martinez M., Monperrus M.** Fine-grained and accurate source code differencing. *Proceedings of the 29th ACM/IEEE international conference on Automated software engineering*. 2014. P.313-324. DOI: 10.1145/2642937.2642982.
- [13] **Chiticariu L., Li Y., Reiss F.** Rule-based information extraction is dead! Long live rule-based information extraction systems! *Proceedings of the 2013 conference on empirical methods in natural language processing*. Seattle, Washington, USA, 18-21 October 2013. P.827-832.
- [14] **Miwa M., Bansal M.** End-to-end relation extraction using lstms on sequences and tree structures. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (Volume 1: Long Papers). 2016. P.1105-1116. DOI: 10.18653/v1/P16-1105.
- [15] **Zhong Z., Chen D.** A frustratingly easy approach for entity and relation extraction. *Proceedings of the 2021 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies*. 2021. P.50-61. DOI: 10.18653/v1/2021.naacl-main.5.
- [16] **Saker M.K., Zhou L., Eberhart A., Hitzler P.** Neuro-symbolic artificial intelligence: Current trends. *Ai Communications*. 2022. V.34. No.3. P.197-209. DOI: 10.48550/arXiv.2105.05330.

Сведения об авторах

Федосин Сергей Алексеевич, 1955 г. рождения. Окончил МГУ им. Н.П. Огарёва в 1978 г., к.т.н. (1983). Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Института электроники и светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва. В списке трудов более 130 публикаций в области проектирования информационных систем. Author ID (Scopus): 57205160591; ORCID: 0000-0003-3481-4101; Author ID (РИНЦ): 101167. fedosinsa@mrsu.ru. ✉.



Ямашкин Станислав Анатольевич, 1990 г. рождения. Окончил МГУ им. Н.П. Огарёва в 2012 г., к.т.н. (2016). Доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Института электроники и светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва, заведующий лабораторией искусственного интеллекта МГУ им. Н.П. Огарёва. В списке трудов около 270 публикаций в области системного анализа. ORCID: 0000-0002-7574-0981; Author ID (РИНЦ): 730394; Author ID (Scopus): 9133286400; Researcher ID (WoS): N-2939-2018. yamashkinsa@mail.ru.



Сайгин Андрей Александрович, 1999 г. рождения. Окончил МГУ им. Н.П. Огарёва в 2023 г. Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Института электроники и светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва. В списке трудов более 10 публикаций в области интеллектуальной обработки данных. ORCID: 0009-0001-4635-6219; Author ID (РИНЦ): 1189605. andrexsai@mail.ru.

Поступила в редакцию 11.06.2026, после рецензирования 22.07.2026. Принята к публикации 7.08.2026.



Software pipeline for generating ontology templates from natural language texts

© 2026, S.A. Fedosin ✉, S.A. Yamashkin, A.A. Saygin

National Research Mordovia State University named after N. P. Ogarev, Saransk, Russia

Abstract

This paper examines the problem of extracting and linking facts from Russian-language legal texts and presents a pipeline-based approach to solving it for the construction of a knowledge base represented as a hierarchical dictionary serving as an ontology template for the subject domain. The proposed software pipeline comprises input data normalization, lexical analysis with named entity extraction, syntactic analysis with the construction of an abstract syntax tree, and mapping of the resulting dictionary to an RDF/OWL representation. The lexical analysis stage employs a hybrid entity extraction module that combines machine-learning-based models with rules defined by grammars and templates. The quality of the analysis was experimentally evaluated using a specialized corpus of decisions issued by regional divisions of the Federal Antimonopoly Service of Russia. The results demonstrate that augmenting the trained models with rule-based components improves the aggregate entity extraction metrics of approximately 5%. At the syntactic analysis stage, a configurable grammar is proposed that makes it possible to distinguish separate cases contained within a single legal document and link the extracted entities into a structured dictionary. Such a dictionary can be mapped to an ontological graph and used as an ontologization layer for storage in a graph-based knowledge and for comparison with approaches based on large language models.

Keywords: fact extraction, ontology template, natural language processing, entity extraction, relation extraction, machine learning, dictionary.

For citation: Fedosin SA, Yamashkin SA, Saygin AA. Software pipeline for generating ontology templates from natural language texts [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(3): 502-514. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-502-514.

Financial Support: The study was carried out within the framework of the R&D project “Establishment of an Artificial Intelligence Laboratory” under the Socio-Economic Development Program of the Republic of Mordovia for 2022-2026.

Authors' contributions: Fedosin S.A. – expert evaluation of the source data and results; Yamashkin S.A. – problem formulation, conceptualization, model formalization; Saigin A.A. – software development and text processing.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Software pipeline for text processing

Figure 2 – Named entity extraction pipeline

Figure 3 – Syntactic analyzer architecture

Figure 4 – Ontology template for representing a Federal Antimonopoly Service case

Table 1 – List of extracted entities

Table 2 – Model evaluation results

References

- [1] Massel LV. Knowledge ecosystem as development and specialization of digital ecosystem [In Russian]. Proceedings of the International Scientific and Technical Congress “Intellectual Systems and Information Technologies-2023”. Taganrog: Publisher Stupin S.A., 2023: 155-164.
- [2] Bolshakova EI, Voroncov KV, Efremova NJe, Klyshinskij JeS, Lukashevich NV, Sapin AS. Automatic natural language text processing and data analysis [In Russian]. Moscow: HSE Publishing House. 2017. p. 269.
- [3] van Ginneken, B. Fifty years of computer analysis in chest imaging: rule-based, machine learning, deep learning. *Radiol. Phys. Technol.* 2017, 10 (1), 23–32. DOI:10.1007/s12194-017-0394-5.

- [4] **Kolmogortsev SV, Sarayev PV.** Bibliography extraction from texts by regular expressions [In Russian]. New information technologies in automated systems. 2017; (20): 82-88.
 - [5] **Bogatyrev MY.** Fact extraction from natural language texts with conceptual graph models [In Russian]. New information technologies in automated systems. 2016; 7-1: 198-208.
 - [6] **Hopcroft JE, Motwani R, Ullman JD.** Introduction to Automata Theory, Languages and Computation [In Russian]. Moscow: Williams; 2015. 528 p.
 - [7] **Sidorova EA, Ivanov AI, Ovchinnikova KA.** Information extraction from texts based on ontology and large language models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 114-129. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.
 - [8] **Ma X, Hovy E.** End-to-end sequence labeling via bi-directional LSTM-CNNs-CRF. Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016; 1: 1064-1074. DOI:10.18653/v1/P16-1101.
 - [9] **Moens MF.** Information Extraction from Text and Beyond. Cross-Disciplinary Advances in Applied Natural Language Processing: Issues and Approaches. IGI Global Scientific Publishing. 2012; 24-39. DOI:10.4018/978-1-61350-447-5.ch003.
 - [10] **Dong L, Lapata M.** Language to logical form with neural attention. Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016; 1: 33-43. DOI:10.18653/v1/P16-1004.
 - [11] **Yin P, Neubig G.** A syntactic neural model for general-purpose code generation. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2017; 1: 440-450. DOI:10.48550/arXiv.1704.01696.
 - [12] **Falleri JR, Morandat F, Blanc X, Martinez M, Monperrus M.** Fine-grained and accurate source code differencing. Proceedings of the 29th ACM/IEEE international conference on Automated software engineering. 2014; 313-324. DOI:10.1145/2642937.2642982.
 - [13] **Chiticariu L., Li Y., Reiss F.** Rule-based information extraction is dead! Long live rule-based information extraction systems! Proceedings of the 2013 conference on empirical methods in natural language processing. 2013; 827-832.
 - [14] **Miwa M., Bansal M.** End-to-end relation extraction using LSTMs on sequences and tree structures. Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016; 1: 1105-1116. DOI:10.18653/v1/P16-1105.
 - [15] **Zhong Z., Chen D.** A frustratingly easy approach for entity and relation extraction. Proceedings of the 2021 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies. 2021; 50-61. DOI:10.18653/v1/2021.naacl-main.5.
 - [16] **Saker M. K., Zhou L., Eberhart A., Hitzler P.** Neuro-symbolic artificial intelligence: Current trends. *Ai Communications*. 2022; 34(3): 197-209. DOI:10.48550/arXiv.2105.05330.
-

About the authors

Sergey Alexeevich Fedosin (b. 1955) graduated from Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia) in 1978; Candidate of Technical Sciences (1983). Professor at the Department of Automated Information Processing and Control Systems, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University. The list of works includes more than 130 publications in the field of information systems design. Author ID (Scopus): 57205160591; ORCID: 0000-0003-3481-4101; Author ID (RSCI): 101167. fedosinsa@mrsu.ru. ✉.

Stanislav Anatolevich Yamashkin (b. 1990) graduated from Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia) in 2012, Candidate of Technical Sciences (2016). Associate Professor at the Department of Automated Information Processing and Control Systems, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University; Head of the Artificial Intelligence Laboratory at National Research Ogarev Mordovia State University. The list of works includes more about 270 publications in the field of systems analysis. ORCID: 0000-0002-7574-0981; Author ID (RSCI): 730394; Author ID (Scopus): 9133286400; Researcher ID (WoS): N-2939-2018. yamashkinsa@mail.ru.

Saygin Andrey Alexandrovich (b. 1999) graduated from Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia) in 2023. Postgraduate student at the Department of Automated Information Processing and Control Systems, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University. The list of works includes more than 10 publications in the field of intelligent data processing. ORCID: 0009-0001-4635-6219; Author ID (RSCI): 1189605. andrexai@mail.ru.

Received June 11, 2026. Revised July 22, 2025. Accepted August 7, 2025.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-515-527



Интервальное представление истинности при информационном и нативном противоречиях

© 2026, Л.В. Аршинский¹✉, В.Л. Аршинский², В.В. Тирских¹¹Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия²Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрННТУ), Иркутск, Россия

Аннотация

Рассмотрены вопросы интервального представления истинности при информационном и нативном противоречиях в логиках с векторной семантикой. Представлен расчёт интервальных значений для логических связей при обоих видах противоречия в этой семантике, обсуждены правила логического вывода *modus ponens* и *modus tollens*. Понятие нативного противоречия ориентировано скорее на физические, чем на информационные объекты, но формализм, разрабатываемый для нативного противоречия, может использоваться в системах поддержки принятия решений на основе знаний. Степени уверенности в истинности/ложности суждений в подобных системах часто задаются экспертно, поэтому для обработки интервальных значений истинности требуется соответствующий формализм. Дано интервальное представление истинности для трёх форм связей конъюнкции, дизъюнкции и двух форм связей отрицания. Обсуждаются особенности вывода с использованием правил *modus ponens* и *modus tollens* в интервальном представлении для информационного и нативного противоречий. Сделан вывод о пригодности предлагаемого формального аппарата для систем поддержки принятия решений, основанных на знаниях. В онтологическом моделировании формализм векторной семантики находит применение в условиях неполноты и противоречивости накопленной эмпирической информации.

Ключевые слова: логики с векторной семантикой, интервальная истинность, информационное противоречие, нативное противоречие, логические связи, логический вывод.

Цитирование: Аршинский Л.В., Аршинский В.Л., Тирских В.В. Интервальное представление истинности при информационном и нативном противоречиях. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.515-527. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-515-527.

Вклад авторов: Аршинский Л.В. – разработка концепции и формального аппарата; Аршинский В.Л. – подготовка расчётных примеров; Тирских В.В. – анализ и верификация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В [1] введены понятие нативного противоречия и основанные на нём третьи формы конъюнкции и дизъюнкции (*нативная конъюнкция* и *нативная дизъюнкция*) для векторных логик с семантикой, когда вектор истинности содержит два компонента – Истина и Ложь:

$$||a|| = \langle a^+; a^- \rangle, \quad (1)$$

где позитивный компонент a^+ характеризует степень истинности, а негативный a^- – ложности суждения; $a^+, a^- \in [0,1]$.

Выражение (1) предназначено для случаев, когда имеются взаимоисключающие свидетельства *за* и *против* суждения [2, 3]. Если нет оснований считать суждение безусловно истинным либо ложным, то комплекс свидетельств приводит к *информационному* противоре-

чению [1]. Построенный на его основе аппарат находит применение в онтологическом анализе (см., например, [4-7]). В [1] сделано предположение, что может существовать такой вид противоречия, когда представленный выражением (1) объект находится в двух взаимоисключающих состояниях в силу своей природы. Тогда утверждение о его пребывании в соответствующем состоянии истинно и ложно совместно, а противоречие имманентно объекту. Такое противоречие названо *нативным* и приведены примеры соответствующего объекта [8, 9].

На этой основе в [1] введены связки нативной конъюнкции и нативной дизъюнкции. Нативная конъюнкция:

$$\|a \&_n b\| = \langle a^+ \bullet b^+; a^+ \bullet b^- \oplus a^- \bullet b^+ \oplus a^- \bullet b^- \rangle; \quad (2)$$

нативная дизъюнкция:

$$\|a \vee_n b\| = \langle a^+ \bullet b^+ \oplus a^+ \bullet b^- \oplus a^- \bullet b^+; a^- \bullet b^- \rangle. \quad (3)$$

Здесь $\bullet$ и $\oplus$ – триангулированная норма (t -норма) и ко-норма (s -норма) в инфиксной записи, дополненные свойством: $1-x \bullet y = (1-x) \oplus (1-y)$, или, что аналогично: $1-x \oplus y = (1-x) \bullet (1-y)$, где $x, y \in [0, 1]$. Общий смысл обеих связок виден из (2) и (3), если $\bullet$ рассматривать как логическое умножение, а $\oplus$ как логическое сложение на отрезке $[0, 1]$. В онтологическом анализе используются нормы $x \bullet y = xy$ и $x \oplus y = \min(1, x+y)$ [4, 7].

Цель данной работы состоит в том, чтобы показать возможность и допустимость применения связок (2) и (3) для работы с информационным противоречием, используемым в онтологиях и системах логического вывода на основе продукций [4-7, 10].

1 Логический вывод при информационном противоречии

Векторные логики с семантикой предназначены для случаев, когда приходится принимать решения в условиях противоречия в поступающих данных. Частью процедуры принятия решения в этих условиях может быть логический вывод на основе одного из двух вариантов правила *modus ponens* (МР): *нестрогого* (Н-МР) и *содержательного* (С-МР) [2, 3]. Здесь рассматривается содержательный вариант МР, который позволяет рассчитывать истинность заключения на основе истинности посылок.

Выражения для расчёта истинности соответствующих логических связок при информационном противоречии имеют вид [2, 3]:

$\|a \& b\| = \langle a^+ \bullet b^+; a^- \oplus b^- \rangle$ (01-композиция); $\|a \vee b\| = \langle a^+ \oplus b^+; a^- \bullet b^- \rangle$ (10-композиция) – первые формы конъюнкции и дизъюнкции;

$\|a \&_2 b\| = \langle a^+ \bullet b^+; a^- \bullet b^- \rangle$ (00-композиция); $\|a \vee_2 b\| = \langle a^+ \oplus b^+; a^- \oplus b^- \rangle$ (11-композиция) – вторые формы конъюнкции и дизъюнкции;

$\| \neg a \| = \langle a^-; a^+ \rangle$ – первая форма отрицания (отрицание в форме перестановки);

$\| \sim a \| = \langle 1-a^+; 1-a^- \rangle$ – вторая форма отрицания (отрицание в форме дополнения).

Первые формы формализуют обычные естественно-языковые связки И, ИЛИ и НЕ. Вторые применяются, например, для объединения свидетельств [10] (типовая процедура в правдоподобном выводе [11]).

Представления связок, подобные первым формам, рассматриваются в нейтрософской логике [12, 13] и интуиционистских нечётких множествах [14, 15].

Вывод по правилу С-МР имеет вид:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \|a \& a \rightarrow b\| \div \| \mathbf{I} \|. \quad (4)$$

Через двоеточие указана схема расчёта истинности заключения на основе истинности посылок. Здесь $\mathbf{I}$ – *строгая истина* с вектором $\| \mathbf{I} \| = \langle 1; 0 \rangle$; $\|a \& a \rightarrow b\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle$, где $i \equiv a \rightarrow b$. Запись (4) означает, что истинность b принимает интервальное значение в том смысле, что его «+» (Истина) и «-» (Ложь) – компоненты, принадлежащие интервалам:

$$\|b\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle \div \langle 1; 0 \rangle = \langle [a^+ \bullet i^+, 1]; [0, a^- \oplus i^-] \rangle. \quad (5)$$

Символ « $\div$ » разделяет векторы, определяющие интервальные границы $\|b\|$ (левый верхний и правый нижний углы области $\|b\|$ соответственно, см. рисунок 1).

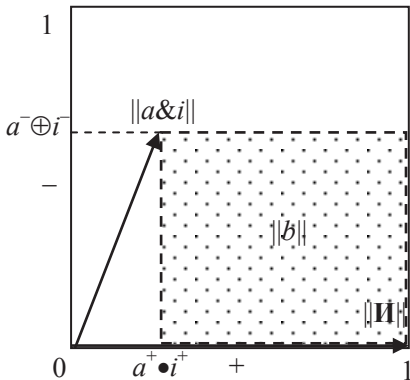


Рисунок 1 – Значение истинности заключения согласно (4)

Выражения (4) и (5) отражают тот факт, что b может быть следствием не только a , а потому вектор $\|a \& a \rightarrow b\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle$ – это своего рода наименьшая (в смысле отношения правдоподобия [2, 3]) гарантированная истинность b , которая может реализоваться и по другим причинам. Этот диапазон является достаточно широким, поэтому в [16] описан уточнённый вариант С-МР, названный С-МР2. Суженный диапазон значений в нём получается из тех соображений, что наименьшее гарантированное значение истинности отрицания $\neg b$ при наличии a можно принять равным $\| \neg b \| = \| a \& \neg i \|$ (a реализуется, но не влечёт b), тогда истинность b в смысле отношения правдоподобия не может превосходить $\|b\| = \| \neg a \vee i \|$. Таким образом:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \|a \& i\| \div \| \neg a \vee i \|. \quad (6)$$

Или, в интервальном представлении:

$$\|b\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle \div \langle a^- \oplus i^-; a^+ \bullet i^- \rangle = \langle [a^+ \bullet i^+, a^- \oplus i^+]; [a^+ \bullet i^-, a^- \oplus i^-] \rangle. \quad (7)$$

Вариант С-МР2 целесообразно использовать в системах поддержки принятия решений (СППР) при информационном противоречии.

Содержательный *modus tollens* (С-МТ) существует также в двух вариантах: С-МТ и С-МТ2, которые характеризуются интервальной истинностью заключения.

Учитывая, что вывод в СППР может быть многошаговым, интервальный характер истинности заключения включает вывод при интервальной истинности посылок. Обращение к интервальному представлению – известный приём при дефиците и/или противоречивости информации [17–19]. При этом для [17] обозначена проблема экспоненциально роста объёма вычислений с увеличением числа гипотез из т.н. «множества окружения», что ограничивает применимость метода. В интервальном вероятностном и интервальном нечётком выводах существует необходимость совместного учёта дефицита и противоречивости информации, что объясняется фундаментальной значимостью уравнения баланса истинности: $a^+ + a^- = 1$ ($p_a + p_{\neg a} = 1$ для вероятностей). Это не позволяет полноценно учитывать совместное влияние дефицита и противоречивости данных. Векторное представление истинности не имеет таких ограничений и в этом смысле привносит в формализацию новое качество.

2 Логический вывод при интервальных значениях истинности

Использование интервальной истинности включает вычисление соответствующих интервалов для сложных посылок со связками конъюнкции, дизъюнкции и отрицания, а также для заключения.

Пусть имеются два интервала $[x_1, x_2], [y_1, y_2] \subseteq [0, 1]$. Тогда произведением $\bullet$ этих интервалов является интервал:

$$[x_1, x_2] \bullet [y_1, y_2] = [x_1 \bullet y_1, x_2 \bullet y_2]; \quad (8)$$

суммой $\oplus$ интервалов является интервал:

$$[x_1, x_2] \oplus [y_1, y_2] = [x_1 \oplus y_1, x_2 \oplus y_2]. \quad (9)$$

Это позволяет определить интервальные значения для первой и второй форм конъюнкции и дизъюнкции. Так, если $\|a\| = \|a\|_1 \div \|a\|_2 = \langle [a_1^+, a_2^+]; [a_2^-, a_1^-] \rangle$ и $\|b\| = \|b\|_1 \div \|b\|_2 = \langle [b_1^+, b_2^+]; [b_2^-, b_1^-] \rangle$, то первая и вторая формы связок конъюнкции и дизъюнкции имеют вид [16]:

$$\|a \& b\| = \langle [a_1^+ \bullet b_1^+, a_2^+ \bullet b_2^+]; [a_2^- \oplus b_2^-, a_1^- \oplus b_1^-] \rangle; \quad (10)$$

$$\|a \vee b\| = \langle [a_1^+ \oplus b_1^+, a_2^+ \oplus b_2^+]; [a_2^- \bullet b_2^-, a_1^- \bullet b_1^-] \rangle; \quad (11)$$

$$\|a \&_2 b\| = \langle [a_1^+ \bullet b_1^+, a_2^+ \bullet b_2^+]; [a_2^- \bullet b_2^-, a_1^- \bullet b_1^-] \rangle; \quad (12)$$

$$\|a \vee_2 b\| = \langle [a_1^+ \oplus b_1^+, a_2^+ \oplus b_2^+]; [a_2^- \oplus b_2^-, a_1^- \oplus b_1^-] \rangle.$$

Здесь a_1^+ и a_2^- – левые, а a_2^+ и a_1^- – правые границы интервалов истинности позитивного и негативного компонентов для $\|a\|$, задаваемые векторами $\|a\|_1$ и $\|a\|_2$. Аналогично для $\|b\|$ (рисунок 2).

Интервальное представление отрицаний имеет вид [16]:

$$\| \neg a \| = \langle [a_2^-, a_1^-]; [a_1^+, a_2^+] \rangle; \quad (13)$$

$$\| \sim a \| = \langle [(1-a_2^+), (1-a_1^+)]; [(1-a_1^-), (1-a_2^-)] \rangle.$$

Это позволяет рассчитывать интервальные истинности сложных посылок, а также истинность заключения. Для определения истинности заключения сначала рассматривается более простой вариант правила С-МР. Пусть истинность малой посылки равна: $\|a\| = \langle [a_1^+, a_2^+]; [a_2^-, a_1^-] \rangle$, а истинность большой: $\|a \rightarrow b\| = \langle [i_1^+, i_2^+]; [i_2^-, i_1^-] \rangle$.

Тогда из (4) и (10) следует

$$\|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_2^- \oplus i_2^-, a_1^- \oplus i_1^-] \rangle \div \langle [1, 1]; [0, 0] \rangle.$$

Или (что то же самое) $\|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, 1]; [0, a_1^- \oplus i_1^-] \rangle$.

Учитывая (10), (11), (13), можно записать:

$$\|a \& i\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_2^- \oplus i_2^-, a_1^- \oplus i_1^-] \rangle;$$

$$\| \neg a \vee i \| = \langle [a_2^- \oplus i_1^+, a_1^- \oplus i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^-, a_2^+ \bullet i_1^-] \rangle.$$

В результате правило (6) примет вид:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: 0 \|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_2^- \oplus i_2^-, a_1^- \oplus i_1^-] \rangle \div \langle [a_2^- \oplus i_1^+, a_1^- \oplus i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^-, a_2^+ \bullet i_1^-] \rangle;$$

или:

$$\|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_1^- \oplus i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^-, a_1^- \oplus i_1^-] \rangle. \quad (14)$$

Границы интервалов для $\|b\|$ равны:

$$[b_1^+, b_2^+] = [\min(a_1^+ \bullet i_1^+, a_2^- \oplus i_1^+), \max(a_2^+ \bullet i_2^+, a_1^- \oplus i_2^+)] = [a_1^+ \bullet i_1^+, a_1^- \oplus i_2^+]; \quad (15)$$

$$[b_2^-, b_1^-] = [\min(a_2^- \oplus i_2^-, a_1^+ \bullet i_2^-), \max(a_1^- \oplus i_1^-, a_2^+ \bullet i_1^-)] = [a_1^+ \bullet i_2^-, a_1^- \oplus i_1^-]. \quad (16)$$

Здесь учтено известное обстоятельство:

$$x \bullet y \leq x \leq x \oplus y. \quad (17)$$

Интервальный вариант правила С-МТ для первой формы отрицания, как наиболее подходящей для моделирования связки НЕ при нативном противоречии, имеет вид:

$$\neg b, a \rightarrow b \vdash \neg a: \| \neg a \| = \| \neg b \& a \rightarrow b \| \div \langle 1; 0 \rangle = \langle [b^- \bullet i^+, 1]; [0, b^+ \oplus i^-] \rangle.$$

В виде С-МТ2:

$$\neg b, a \rightarrow b \vdash \neg a: \| \neg a \| = \| \neg b \& a \rightarrow b \| \div \| b \vee a \rightarrow b \| = \langle [b_2^- \bullet i_1^+, b_2^+ \oplus i_2^+]; [b_2^- \bullet i_2^-, b_2^+ \oplus i_1^-] \rangle. \quad (18)$$

Соответственно, с учётом (12): для С-МТ $\|a\| = \langle [0, b^+ \oplus i^-]; [b^- \bullet i^+, 1] \rangle$; и для С-МТ2

$$\|a\| = \langle [b_2^- \bullet i_2^-, b_2^+ \oplus i_1^-]; [b_2^- \bullet i_1^+, b_2^+ \oplus i_2^+] \rangle. \quad (19)$$

3 Логический вывод при нативном противоречии

Интервалы истинности для $a \&_n b$ и $a \vee_n b$ определяются соответствующими интервалами для a и b . Левая граница интервалов для $\&_n$ и $\vee_n$ при этом формируется левыми границами интервалов a и b , а правая – правыми. Принимая во внимание (8) и (9), для третьей формы конъюнкции получается:

$$\|a \&_n b\| = \langle [a_1^+ \bullet b_1^+, a_2^+ \bullet b_2^+]; [a_1^+ \bullet b_2^- \oplus a_2^- \bullet b_1^+ \oplus a_2^- \bullet b_2^-, a_2^+ \bullet b_1^- \oplus a_1^- \bullet b_2^+ \oplus a_1^- \bullet b_1^-] \rangle. \quad (20)$$

Для третьей формы дизъюнкции:

$$\|a \vee_n b\| = \langle [a_1^+ \bullet b_1^+ \oplus a_1^+ \bullet b_2^- \oplus a_2^- \bullet b_1^+, a_2^+ \bullet b_2^+ \oplus a_2^+ \bullet b_1^- \oplus a_1^- \bullet b_2^+]; [a_2^- \bullet b_2^-, a_1^- \bullet b_1^-] \rangle. \quad (21)$$

Эти выражения определяют интервальные значения истинности связок $\&_n$ и $\vee_n$ при нативном противоречии.

Правило С-МР. Интервальная истинность заключения для нативного противоречия при интервальных значениях истинности малой и большой посылки выводится следующим образом. По аналогии с (4) можно записать: $a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \|a \&_n a \rightarrow b\| \div \|I\|$.

Полагая $\|a \rightarrow b\| = \langle [i_1^+, i_2^+]; [i_2^-, i_1^-] \rangle$ и принимая во внимание (8) и (9), можно записать:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^- \oplus a_2^- \bullet i_1^+ \oplus a_2^- \bullet i_2^-, a_2^+ \bullet i_1^- \oplus a_1^- \bullet i_2^+ \oplus a_1^- \bullet i_1^-] \rangle \div \langle 1; 0 \rangle;$$

или: $\|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, 1]; [0, a_2^+ \bullet i_1^- \oplus a_1^- \bullet i_2^+ \oplus a_1^- \bullet i_1^-] \rangle$.

Правило С-МР2. Истинность заключения для этого случая получается так.

1) заменяются первые формы конъюнкции и дизъюнкции в (6) на третьи:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \|a \&_n i\| \div \|a \vee_n i\|.$$

2) учитывая (13), (20) и (21), истинность b запишется как:

$$\|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^- \oplus a_2^- \bullet i_1^+ \oplus a_2^- \bullet i_2^-, a_2^+ \bullet i_1^- \oplus a_1^- \bullet i_2^+ \oplus a_1^- \bullet i_1^-] \rangle \div \langle [a_2^- \bullet i_1^+ \oplus a_2^- \bullet i_2^- \oplus a_1^+ \bullet i_1^+, a_1^- \bullet i_2^+ \oplus a_1^- \bullet i_1^- \oplus a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^-, a_2^+ \bullet i_1^-] \rangle.$$

3) аналогично (15), (16) и принимая во внимание (17), получается:

$$\|b\| = \langle [a_1^+ \bullet i_1^+, a_1^- \bullet i_2^+ \oplus a_1^- \bullet i_1^- \oplus a_2^+ \bullet i_2^+]; [a_1^+ \bullet i_2^-, a_2^+ \bullet i_1^- \oplus a_1^- \bullet i_2^+ \oplus a_1^- \bullet i_1^-] \rangle. \quad (22)$$

Правило С-МТ. В [16] истинность заключения $\neg a$ при интервальных значениях истинности посылок представлена выражением: $\neg b, a \rightarrow b \vdash \neg a: \|\neg a\| = \|\neg b \&_n a \rightarrow b\| \div \langle 1; 0 \rangle$;

или (что то же самое): $\neg b, a \rightarrow b \vdash \neg a: \|\neg a\| = \langle [b_2^- \bullet i_1^+, 1]; [0, b_2^+ \oplus i_1^-] \rangle$.

С учётом (13) это означает, что истинность a , как заключения, в этом случае равна:

$$\|a\| = \langle [0, b_2^+ \oplus i_1^-], [b_2^- \bullet i_1^+, 1] \rangle.$$

Как и в случае С-МР, расчёт интервальной истинности заключения $\neg a$ следует из интервальных значений истинности малой и большой посылок. Значение $\|a\|$ после этого получается перестановкой позитивного и негативного компонентов согласно (13).

Правило С-МТ2. Чтобы определить интервальную истинность заключения по правилу С-МТ2 для нативных конъюнкции и дизъюнкции при интервальных значениях истинности посылок, можно записать (18) следующим образом:

$$\neg b, a \rightarrow b \vdash \neg a: \|\neg a\| = \|\neg b \&_n a \rightarrow b\| \div \|b \vee_n a \rightarrow b\|.$$

Принимая во внимание (13), (20) и (21), получается:

$$\|\neg a\| = \langle [b_2^- \bullet i_1^+, b_1^- \bullet i_2^+]; [b_2^- \bullet i_2^- \oplus b_1^+ \bullet i_1^+ \oplus b_1^+ \bullet i_2^-, b_1^- \bullet i_1^- \oplus b_2^+ \bullet i_2^+ \oplus b_2^+ \bullet i_1^-] \rangle \div \langle [b_1^+ \bullet i_1^+ \oplus b_1^+ \bullet i_2^- \oplus b_2^+ \bullet i_1^+, b_2^+ \bullet i_2^+ \oplus b_2^+ \bullet i_1^- \oplus b_1^- \bullet i_2^+]; [b_2^- \bullet i_2^-, b_1^- \bullet i_1^-] \rangle;$$

или $\|\neg a\| = \langle [b_2^- \bullet i_1^+, b_2^+ \bullet i_2^+ \oplus b_2^+ \bullet i_1^- \oplus b_1^- \bullet i_2^+]; [b_2^- \bullet i_2^-, b_1^- \bullet i_1^- \oplus b_2^+ \bullet i_2^+ \oplus b_2^+ \bullet i_1^-] \rangle$.

Отсюда, учитывая (13), окончательно получается:

$$\|a\| = \langle [b_2^- \bullet i_2^-, b_1^- \bullet i_1^- \oplus b_2^+ \bullet i_2^+ \oplus b_2^+ \bullet i_1^-]; [b_2^- \bullet i_1^+, b_2^+ \bullet i_2^+ \oplus b_2^+ \bullet i_1^- \oplus b_1^- \bullet i_2^+] \rangle. \quad (23)$$

4 Примеры расчёта

Результаты расчёта истинности заключения приведены для первой и третьей форм конъюнкции и дизъюнкции. В качестве правил вывода использованы С-МР2 и С-МТ2. Интервальные значения истинности малой и большой посылок определены в характерных областях вблизи точек $\mathbf{Л} = \langle 0; 1 \rangle$ (строгая ложь), $\mathbf{И} = \langle 1; 0 \rangle$ (строгая истина), $\mathbf{Н} = \langle 0; 0 \rangle$ (неопределённость), $\mathbf{П} = \langle 1; 1 \rangle$ (полное противоречие): $\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ (Л), $\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ (И), $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ (Н) и $\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ (П). Для С-МР2 получены таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Интервальная истинность заключения по правилу С-МР2 для первой и третьей форм конъюнкции/дизъюнкции при $x \bullet y = \min(x, y)$ и $x \oplus y = \max(x, y)$ (значения над и под чертой, соответственно)

$a \backslash a \rightarrow b$	$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ Л	$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ И	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ Н	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ П
$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ Л	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$
$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ И	$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$
$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ Н	$\langle [0, 0.5]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$
$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ П	$\langle [0, 1]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0.5, 1] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$

Таблица 2 – Интервальная истинность заключения по правилу С-МР2 для первой и третьей форм конъюнкции/дизъюнкции при $x \bullet y = xy$ и $x \oplus y = x + y - xy$ (значения над и под чертой, соответственно)

$a \backslash a \rightarrow b$	$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ Л	$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ И	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ Н	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ П
$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ Л	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 81]; [0, 81] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$
$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ И	$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$
$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ Н	$\langle [0, 0.5]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$
$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ П	$\langle [0, 1]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0.5, 1] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ $\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$

Для С-МТ2 сформированы аналогичные таблицы 3 и 4.

Из таблиц видно, что обе формы связок (первая и третья) дают совпадающие или близкие результаты почти во всех случаях, кроме части области неопределённости Н в малой или большой посылках (фрагменты таблиц выделены). Особенностью третьих форм является то, что ослабление свидетельств за и против любой из посылок (приближение их к состоянию неопределённости $\langle 0; 0 \rangle$), ведёт к неопределённости заключения. Для практики это предпочтительно, поскольку нет необходимости отклонять слабо определённые (недостаточно аргументированные) посылки, что приходится делать при выводе на основе первых форм.

Изменения границ интервалов показали, что первая и третья формы начинают приводить к существенным различиям в результатах только для посылок, близких к неопределённости. Третьи формы, предложенные для нативного противоречия, *можно рекомендовать для работы и с противоречием информационным!* Например, для СППР, основанных на продукционной модели знаний, в условиях дефицита и противоречивости информации.

Таблица 3 – Интервальная истинность заключения по правилу С-МТ2 для первой и третьей форм конъюнкции/ дизъюнкции при $x \bullet y = \min(x, y)$ и $x \oplus y = \max(x, y)$ (значения над и под чертой, соответственно)

$b \backslash a \rightarrow b$	$\langle [0,0.5]; [0.5,1] \rangle$ Л	$\langle [0.5,1]; [0,0.5] \rangle$ И	$\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$ Н	$\langle [0.5,1]; [0.5,1] \rangle$ П
$\langle [0,0.5]; [0.5,1] \rangle$ Л	$\langle [0.5,1]; [0,0.5] \rangle$ $\langle [0.5,1]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0,0.5]; [0.5,1] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0.5,1] \rangle$	$\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0.5,1]; [0.5,1] \rangle$ $\langle [0.5,1]; [0.5,1] \rangle$
$\langle [0.5,1]; [0,0.5] \rangle$ И	$\langle [0,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,1]; [0,1] \rangle$	$\langle [0,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,1]; [0,1] \rangle$	$\langle [0,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,1]; [0,1] \rangle$
$\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$ Н	$\langle [0,1]; [0,0.5] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0,0.5]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$
$\langle [0.5,1]; [0.5,1] \rangle$ П	$\langle [0.5,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0.5,1]; [0,1] \rangle$	$\langle [0,1]; [0.5,1] \rangle$ $\langle [0,1]; [0.5,1] \rangle$	$\langle [0,1]; [0,1] \rangle$ $\langle [0,0.5]; [0,0.5] \rangle$	$\langle [0.5,1]; [0.5,1] \rangle$ $\langle [0.5,1]; [0.5,1] \rangle$

Таблица 4 – Интервальная истинность заключения по правилу С-МТ2 для первой и третьей форм конъюнкции/ дизъюнкции при $x \bullet y = xy$ и $x \oplus y = x+y-xy$ (значения над и под чертой, соответственно)

$b \backslash a \rightarrow b$	$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ Л	$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ И	$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ Н	$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ П
$\langle [0, 0.5]; [0.5, 1] \rangle$ Л	$\langle [0.25, 1]; [0, 0.75] \rangle$ $\langle [0.25, 1]; [0, 0.81] \rangle$	$\langle [0, 0.75]; [0.25, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.81]; [0.25, 1] \rangle$	$\langle [0, 0.75]; [0, 0.75] \rangle$ $\langle [0, 0.72]; [0, 0.72] \rangle$	$\langle [0.25, 1]; [0.25, 1] \rangle$ $\langle [0.25, 1]; [0.25, 1] \rangle$
$\langle [0.5, 1]; [0, 0.5] \rangle$ И	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.81]; [0, 0.81] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$
$\langle [0, 0.5]; [0, 0.5] \rangle$ Н	$\langle [0, 1]; [0, 0.75] \rangle$ $\langle [0, 0.81]; [0, 0.72] \rangle$	$\langle [0, 0.75]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.72]; [0, 0.81] \rangle$	$\langle [0, 0.75]; [0, 0.75] \rangle$ $\langle [0, 0.58]; [0, 0.58] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.88]; [0, 0.88] \rangle$
$\langle [0.5, 1]; [0.5, 1] \rangle$ П	$\langle [0.25, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0.25, 1]; [0, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0.25, 1] \rangle$ $\langle [0, 1]; [0.25, 1] \rangle$	$\langle [0, 1]; [0, 1] \rangle$ $\langle [0, 0.88]; [0, 0.88] \rangle$	$\langle [0.25, 1]; [0.25, 1] \rangle$ $\langle [0.25, 1]; [0.25, 1] \rangle$

5 Реализация

Особенностью работы с продукционными системами знаний является рост объема рассуждений в ходе диалога [20]. Для интервального присоединённого вывода это приводит к росту количества интервальных значений истинности, которые приходится обрабатывать. Для преодоления такого роста были предложены алгоритмы [20, 21], архитектура миварных баз знаний (БЗ) [22-24], принцип причинно-следственного упорядочения продукций в БЗ [10]. БЗ может быть представлена как ориентированный двухдольный граф с двумя типами вершин: вершины-факты V_F и вершины-правила V_R ; двумя типами дуг: дуги C_{FR} , связывающие факты, входящие в антецедент правила, с соответствующим правилом; дуги C_{RF} , связывающие правило с фактами, формирующими его консеквент. Подобная БЗ – это двойка вида $O = \{V, C\}$, где $V = V_F \cup V_R$, $C = \{C_{FR}, C_{RF}\}$. Для вершин V_F входящая дуга всегда имеет тип C_{RF} , выходящая – тип C_{FR} . Для вершин V_R , наоборот, входящая дуга всегда относится к типу C_{FR} , выходящая – к типу C_{RF} (см. рисунок 3). Всякая вершина V_R всегда имеет входящие и выходящие дуги, а вершины V_F делятся на три класса:

- 1) вершины только с выходящими дугами C_{FR} (на рисунке 3 это S_1-S_7);
- 2) вершины только с входящими дугами C_{RF} (на рисунке 3 это T_1-T_3);
- 3) вершины с входящими и выходящими дугами C_{RF} и C_{FR} (на рисунке 3 это I_1-I_5).

Вершины первого типа – утверждения о фактах, истинность которых выясняется в диалоге с пользователем (стартовые факты). Вершины второго типа – факты-гипотезы, их истинность вычисляется в ходе вывода. Вершины третьего типа – промежуточные факты, связывающие стартовые факты с фактами-гипотезами при многошаговом выводе. Факты антецедента могут образовывать сложные выражения, включающие связки конъюнкции, дизъюнкции, отрицания и скобки. Консеквент может содержать конъюнкцию и отрицание.

Истинность антецедента и консеквента вычисляется согласно изложенному для каждого правила, в т.ч. с использованием процедуры объединения свидетельств (на рисунке 3 это вершины I_2 , I_4). Объединение свидетельств при необходимости выполняется и для терминальных фактов-гипотез (на рисунке 3 это факт T_3).

Для упорядочения требуется специальная процедура. Алгоритм упорядочения основан на назначении вершинам из V_F и V_R рангов, начиная с некоторого минимального:

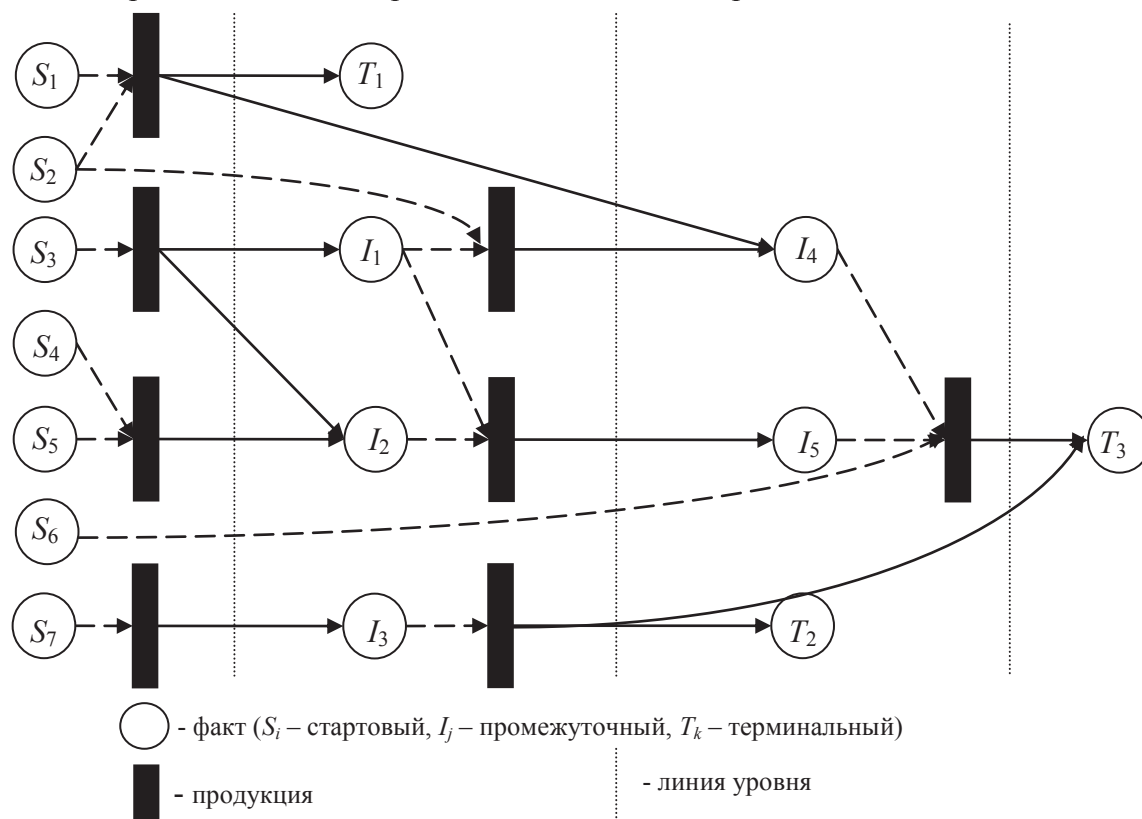


Рисунок 3 – Продукционная база знаний при причинно-следственном упорядочении

- 1) определяются минимальный (например, 0) и максимальный ранги.
- 2) вершинам-стартовым фактам назначается минимальный ранг $r(F) = 0$, ранги остальных вершин не определены. Считается, что в БЗ стартовые факты всегда имеются.
- 3) рассматриваются все продукционные правила и, если всем фактам антецедента некоторого правила R назначены ранги, правилу присваивается ранг $r(R)$, равный максимальному рангу: $r(R) = \max \{r(F_1), \dots, r(F_{n(R)})\}$, где $F_1, \dots, F_{n(R)}$ – факты антецедента R .
- 4) если правило R имеет ранг $r(R)$, то фактам его консеквента присваивается ранг $r(R)+1$.
- 5) процедура выполняется циклически до прекращения переранжирования или до достижения каким-то из правил предельного ранга (в этом случае БЗ перепроектируется).

Правила упорядочиваются на уровни или «слои», согласно причинно-следственным приоритетам. Высшим приоритетом обладают стартовые продукции, имеющие на входе только стартовые факты. Далее следуют продукции, содержащие в антецеденте промежуточные факты, входящие в консеквенты стартовых продукций. Третий слой образуют продукции, содержащие в антецеденте промежуточные факты, выведенные на втором шаге. Число уровней определяется длиной самой протяжённой цепочки вывода, возможной в данной БЗ.

Как и в случае миварных БЗ, причинно-следственное упорядочение обеспечивает линейную сложность вывода $O(n)$, где n – количество правил. Это устраняет экспоненциальный

рост объёма вычислений при увеличении числа правил. При прямом выводе расчёт истинности заключения на каждом шаге состоит из следующих этапов.

- 1) расчёт истинности малой посылки согласно (10) и (11), либо (20) и (21) в зависимости от того, какой формой конъюнкции/дизъюнкции моделируются связки И/ИЛИ. Связка НЕ моделируется первой формой отрицания (13).
- 2) расчёт истинности заключения на основе истинности малой и большой посылок. Истинность большой посылки задаётся разработчиками БЗ. Истинность малой посылки определяется ответами пользователя и промежуточными шагами вывода.
- 3) если истинность факта b получена ранее, и на очередном шаге вывода она вычислена повторно из других посылок, то происходит объединение значений истинности (объединение свидетельств). Например, по второй форме дизъюнкции (12).

Для векторного представления истинности могут быть вычислены скалярные меры достоверности, определённости, точности, противоречивости, избыточности и др. [16]. Если из имеющихся фактов выведено несколько гипотез, пользователь информируется о векторе истинности гипотезы и связанных с ним значениях мер. Это позволяет выбрать предпочтительную из гипотез.

Заключение

Рассмотрены вопросы интервального представления истинности при информационном и нативном противоречиях. Представлен расчёт интервальных значений для логических связок при двух видах противоречия, обсуждены правила логического вывода для С-МР и С-МТ.

Формализм, разрабатываемый для нативного противоречия, может использоваться в СППР, в которых степени уверенности в истинности/ложности суждений задаются экспертно. Впервые представлены результаты третьих форм конъюнкции и дизъюнкции для информационного противоречия. Даны интервальные формы этих связок и приведены особенности вывода с использованием правил *modus ponens* и *modus tollens*. Показано, что результаты вывода с использованием обеих форм связок взаимно близки, а третьи формы могут использоваться в знаниевых системах, в том числе в интервальном варианте.

Список источников

- [1] **Аршинский, Л.В.** О третьих формах конъюнкции и дизъюнкции в логиках с векторной семантикой. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №2(56). С.262-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-262-269.
- [2] **Аршинский Л.В.** Методы обработки нестрогих высказываний. Иркутск: Изд-во Восточно-Сибирского института МВД России, 1998. 40 с.
- [3] **Аршинский Л.В.** Многозначные логики с векторной семантикой / ВСИ МВД России. Иркутск, 2003. 46 с.: Рус. Деп. в ВИНТИ 13.02.2003. № 281-В2003.
- [4] **Самойлов Д.Е., Семенова В.А., Смирнов С.В.** Анализ неполных данных в задачах построения формальных онтологий. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6. №3(21). С.317-339. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-317-339.
- [5] **Семенова В.А., Смирнов С.В.** Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13. №4(50). С.531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547.
- [6] **Смирнов С.В.** Онтологический анализ данных: гибридная методика с использованием многозначной логики и многокритериальной оптимизации. *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте* (ИММВ-2024). Смоленск, 2024. С. 126-134
- [7] **Семенова В.А. Смирнов С.В.** Функциональное наполнение и архитектура программной лаборатории для онтологического анализа данных. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. Т. 31, №2. С.85-100.
- [8] **Feinman R.P.** Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*. 1982. v.21, No6,7. P.467-488.

- [9] **Торгаев С.Н., Шульга И.Д., Юрченко Е.А., Громов М.Л.** Основы квантовых вычислений: учебное пособие. Томск: Издательство STT, 2020. 88 с.
- [10] **Аришинский Л.В.** Особенности работы машины вывода системы моделирования правдоподобных рассуждений «Гераклит». *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2016. №2. С.18-29.
- [11] **Хачатрян А.Р.** Анализ классических методов объединения свидетельств в экспертных системах. *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика*. 1987. №5. С.67-73.
- [12] **Smarandache F.** Neutrosophy: Neutrosophic Probability, Set and Logic. American Research Press, Rehoboth, 1998. 105 p.
- [13] **Smarandache F.** An Introduction to Neutrosophy, Neutrosophic Logic, Neutrosophic Set, and Neutrosophic Probability and Statistics. *Proceedings of the First International Conference on Neutrosophy, Neutrosophic Logic, Neutrosophic Set, Neutrosophic Probability and Statistics*. University of New Mexico-Gallup, 1-3 December 2001. Phoenix: Xiquan, 2001. P.5-21.
- [14] **Atanassov K.T.** Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 1986. Vol.20(1). P.87-96.
- [15] **Atanassov K.T.** New operations defined over the intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 1994. Vol.61(2). P.137-142.
- [16] **Аришинский Л.В.** Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Иркут. гос. ун-т. 2007, 228 с.
- [17] **Shafer G.** A Mathematical Theory of Evidence. Princeton and London: Princeton University Press, 1976. 297 p.
- [18] **Quinlan J.R.** INFERNO: a causations approach to uncertain inference. *The Computer Journal*. 1983. Vol.26. No3. P.255-269.
- [19] **Левин В.И.** Дифференциальное исчисление интервальных элементарных функций и принятие решений. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №3(21). С.340-354. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-340-354.
- [20] **Forgy Ch.** Rete: a fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. *Artificial Intelligence*. 1982. Vol.19(1). P.17-37. DOI: 10.1016/0004-3702(82)90020-0.
- [21] **Wright I, Marshall J.** The execution kernel of RC++: RETE, a faster RETE with TREAT as a special case. <http://www.cs.bris.ac.uk/Publications/Papers/2000091.pdf>.
- [22] **Варламов О.О.** Создание Больших Знаний и расширение областей применения миварных технологий логического искусственного интеллекта. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2023. №4(32). С.30-41. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.003.
- [23] **Потапова А.В.** Применение миварного подхода при создании систем поддержки принятия решений для сферы государственных услуг. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.245-262. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-245-262.
- [24] **Чувиков Д.А.** Об экспертной системе «Анализ ДТП», основанной на концепции миварного подхода. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2017. №2(5). С.78-88.

Сведения об авторах



Аришинский Леонид Вадимович, 1957 г. рождения. Окончил Иркутский государственный университет в 1979 г., д.т.н. (2008). Профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» ИргУПС. В списке научных трудов более 270 работ в области оптимизации, искусственного интеллекта, системного анализа и др. Член-корреспондент Российской академии естественных наук и Российской инженерной академии, член Российской ассоциации искусственного интеллекта. AuthorID (RSCI): 520252; Author ID (Scopus): 57193195356; Researcher ID (WoS): C-3869-2013; ORCID 0000-0001-5135-7921. larsh@mail.ru ✉.

Аришинский Вадим Леонидович, 1984 г. рождения. Окончил Иркутский государственный технический университет в 2006 г., к.т.н. (2010). Руководитель центра программной инженерии Института информационных технологий и анализа данных ИрННТУ. В списке научных трудов



более 30 работ в области энергетики, системного анализа, искусственного интеллекта. AuthorID (RSCI): 520305; Researcher ID (WoS): G-9580-2012; ORCID 0000-0001-7832-1582. arshinskyv@istu.edu.

Тирских Владимир Викторович, 1963 года рождения. Окончил Иркутский государственный университет в 1984 г., к.ф.-м.н. (2000). Доцент кафедры «Информационные системы и защита информации» ИргУПС. В списке научных трудов более 70 работ в области информационных систем, оптимизации и др. AuthorID (RSCI): 119571. tirskih_vv@irgups.ru.



Поступила в редакцию 11.04.2026, после рецензирования 18.05.2026. Принята к публикации 10.06.2026.



Interval representation of truth under informational and native contradictions

© 2026, L.V. Arshinskiy¹✉, V.L. Arshinsky², V.V. Tirskikh¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract

This article examines the interval representation of truth under informational and native contradictions in logics with vector semantics. Calculations of truth-value intervals for logical connectives are presented for both types of contradiction in this semantic framework, and the inference rules, modus ponens and modus tollens, are discussed. The concept of native contradiction is primarily associated with physical rather than informational objects; however, the formalism developed for native contradiction can also be applied in knowledge-based decision support systems. In such systems, degrees of confidence in the truth or falsity of propositions are often specified by experts; therefore, an appropriate formalism is required for processing interval truth values. An interval truth representation is provided for three forms of connectives: conjunction, disjunction, and two forms of negation. The specific features of inference using the modus ponens and modus tollens rules under interval representation are discussed for informational and native contradictions. It is concluded that the proposed formal framework is suitable for knowledge-based decision support systems. In ontological modeling, the vector semantics formalism can be applied under conditions of incomplete and contradictory accumulated empirical information.

Keywords: logics with vector semantics, interval representation of truth, information contradiction, native contradiction, logical connectives, logical inference.

For citation: Arshinskiy L.V., Arshinsky V.L. Tirskikh V.V. Interval representation of truth under informational and native contradictions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(61): 515-527. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-515-527.

Authors' contribution: Arshinsky L.V. – conceptualization and development of the formal framework; Arshinsky V.L. – preparation of calculation examples; Tirskikh V.V. – analysis and verification of the results.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Truth value of the truth of the conclusion according to (4)

Figure 2 – Interval representation of truth for vectors $\|a\| = \|a\|1 \div \|a\|2$ and $\|b\| = \|b\|1 \div \|b\|2$.

Figure 3 – Production-rule knowledge base with causal ordering

Table 1 – Truth-value interval for the conclusion derived using the C-MP2 rule (content-based modus ponens) for the first and third forms of conjunction/disjunction, with $x \bullet y = \min(x, y)$ и $x \oplus y = \max(x, y)$ (values above and below the line, respectively)

Table 2 – Truth-value interval for the conclusion derived using the C-MP2 rule for the first and third forms of conjunction/disjunction with $x \bullet y = xy$ и $x \oplus y = x + y - xy$ (above and below the line, respectively)

Table 3 – Truth-value interval for the conclusion derived using the C-MT2 rule (content-based modus tollens) for the first and third forms of conjunction/disjunction with $x \bullet y = \min(x, y)$ и $x \oplus y = \max(x, y)$ (above and below the line, respectively)

Table 4 – Truth-value interval for the conclusion derived using the C-MT2 rule for the first and third forms of conjunction/disjunction for $x \bullet y = xy$ и $x \oplus y = x + y - xy$ (values above and below the line, respectively)

References

- [1] Arshinskiy L.V. On the third forms of conjunction and disjunction in logic with vector semantics [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 262-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-262-269.

- [2] **Arshinskiy LV.** Methods for processing of non-strict statements [in Russian]. Irkutsk: East-Siberian Institute of MIA of Russia; 1998. 40 p.
- [3] **Arshinskiy LV.** Multivalued logics with vector semantics [in Russian]. East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Irkutsk. 2003. 46 p.: Rus. Dep. in VINITI 13.02.03, No. 281-V2003.
- [4] **Samoilov DE., Semenova VA, Smirnov SV.** Incomplete data analysis for building formal ontologies [in Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(3): 317-339. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-317-339.
- [5] **Semenova VA, Smirnov SV.** Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547.
- [6] **Smirnov SV.** Ontological data analysis: a hybrid technique using multivalued logic and multi-criteria optimization [In Russian]. *Integrated models and soft computing in artificial intelligence*. Smolensk. 2024: 126-134.
- [7] **Semenova V.A. Smirnov S.V.** Functional content and architecture of software laboratory for ontological data analysis [In Russian]. *Bulletin of Samara State Technical University. Series "Engineering Sciences"*. 2023; 31(2): 85-100.
- [8] **Feinman RP.** Simulating Physics with Computers // *International Journal of Theoretical Physics*. 1982; 21(6,7): 467-488.
- [9] **Torgaev SN, Shulga ID, Yurchenko EA, Gromov ML.** Fundamentals of quantum computing [in Russian]. Tomsk: STT; 2020. 88 p.
- [10] **Arshinsky LV.** Features of the inference engine of the plausible reasoning modeling system "Heraclitus" [In Russian]. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2016; 2: 18-29.
- [11] **Khachatryan AR.** Analysis of classical methods of combining evidence in expert systems [In Russian]. *Izvestiya AN SSSR. Tech. Cybernetics*; 1987: 5: 67-73.
- [12] **Smarandache F.** Neutrosophy: Neutrosophic Probability, Set and Logic. American Research Press, Rehoboth; 1998. 105 p.
- [13] **Smarandache F.** An Introduction to Neutrosophy, Neutrosophic Logic, Neutrosophic Set, and Neutrosophic Probability and Statistics. *Proceedings of the First International Conference on Neutrosophy, Neutrosophic Logic, Neutrosophic Set, Neutrosophic Probability and Statistics*. University of New Mexico-Gallup, 1-3 December 2001. Phoenix: Xiquan; 2001: 5-21.
- [14] **Atanassov KT.** Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 1986; 20(1): 87-96.
- [15] **Atanassov KT.** New operations defined over the intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 1994; 61(2): 137-142.
- [16] **Arshinskiy LV.** Vector logics: foundations, concepts, models [in Russian]. Irkutsk: Irkutsk state university; 2007. 228 p.
- [17] **Shafer G.** A Mathematical Theory of Evidence. Princeton and London: Princeton University Press; 1976. 297 p.
- [18] **Quinlan JR.** INFERNO: a causations approach to uncertain inference. *The Computer Journal*. 1983; 26(3): 255-269.
- [19] **Levin VI.** Differential calculus of interval elementary functions and decision-making [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(21): 340-354. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-340-354.
- [20] **Forgy Ch.** Rete: a fast algorithm for the many pattern/multiple object pattern match problem. *Artificial Intelligence*. 1982; 19(1): 17-37. DOI: 10.1016/0004-3702(82)90020-0.
- [21] **Wright I, Marshall J.** The execution kernel of RC++: RETE*, a faster RETE with TREAT as a special case. <http://www.cs.bris.ac.uk/Publications/Papers/2000091.pdf>.
- [22] **Varlamov OO.** Creating Big Knowledge and expanding the applications of mivar technologies of logical artificial intelligence [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2023; 4(32): 30-41. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.003.
- [23] **Potapova AV.** Application of the mivar approach in creation of decision support systems for public services [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(2): 245-262. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-245-262.
- [24] **Chuvikov DA.** About the expert system «Analysis MVA », based on the concept of the mivar approach [In Russian]. *Problems of Artificial Intelligence*. 2017; 2 (5): 78-88.

About the Authors

Leonid Vadimovich Arshinskiy (b.1957) graduated from Irkutsk State University in 1979, Doctor of Technical Sciences (2008). Professor at the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University. Corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences and the Russian Academy of Engineering; member of the Russian Association of Artificial Intelligence. He is the author of more than 270 scientific articles and abstracts in the fields of optimization, artificial intelligence, systems analysis, and information security. AuthorID

(RSCI): 520252; Author ID (Scopus): 57193195356; Researcher ID (WoS): C-3869-2013; ORCID 0000-0001-5135-7921. *larsh@mail.ru*.

Vadim Leonidovich Arshinsky (b. 1984) graduated from Irkutsk State Technical University in 2006, Candidate of Technical Sciences (2010). Head of the Software Engineering Center, School of Information Technology and Data Science, Irkutsk National Research Technical University. The list of scientific papers includes more than 30 works in the fields of energy, systems analysis, and artificial intelligence. AuthorID (RSCI): 520305; Researcher ID (WoS): G-9580-2012; ORCID 0000-0001-7832-1582. *arshinskyv@istu.edu*.

Vladimir Viktorovich Tirskikh (b. 1963) graduated from Irkutsk State University in 1984, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (2000). Associate Professor at the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University. The list of scientific publications includes more than 70 papers in the fields of optimization, information systems, and related areas. AuthorID (RSCI): 119571. *tirskih_vv@irgups.ru*.

Received April 11, 2026. Revised May 18, 2026. Accepted June 10, 2026.



Рациональное проектирование нагруженных изгибающим моментом конструкций с учётом требований прочности и устойчивости

© 2026, А.В. Болдырев, Д.В. Золотов ✉

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Предлагается методика проектирования нагруженных изгибающим моментом конструкций минимальной массы с учётом ограничений на напряжения и критические усилия потери устойчивости. Переменными проектирования являются параметры силовой схемы, размеры и форма сечений конструктивных элементов. На первом этапе в заданной проектной области выполняется проектирование силовой схемы конструкции по условиям прочности с использованием континуальной модели – пластины переменной толщины. На втором этапе определяется граница выреза в конструкции стохастическим методом дифференциальной эволюции при выполнении условий прочности. На третьем этапе разрабатывается конструкция переменного сечения с учётом требований прочности и устойчивости. Обсуждаются ситуации, возникающие при проектировании рассматриваемой конструкции, требующие принятия решений на основе анализа чувствительности ограничений по устойчивости. Выявлена проектная ситуация, в которой удаление из конструкции элементов с высокими значениями энергии деформации по критической форме потери устойчивости приводит к снижению массы конструкции. На примере показана возможность получить конструкцию с переменной строительной высотой, удовлетворяющую условиям прочности и устойчивости, при снижении массы на 17% по сравнению с конструкцией с постоянной строительной высотой.

Ключевые слова: проектирование, конструкция, оптимизация, изгибающий момент, требование прочности, требования устойчивости, коэффициенты чувствительности, принятие решений.

Цитирование: Болдырев А.В., Золотов Д.В. Рациональное проектирование нагруженных изгибающим моментом конструкций с учётом требований прочности и устойчивости. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.528-538. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-528-538.

Вклад авторов: Болдырев А.В. – разработка структуры статьи, анализ проектных ситуаций; Золотов Д.В. – разработка методики проектирования, расчёты и анализ результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В качестве объектов проектирования рассматриваются конструкции, предназначенные для уравнивания изгибающего момента. Такие конструкции широко используются в строительстве, судостроении, железнодорожном транспорте, аэрокосмической технике и других предметных областях. Традиционным решением для восприятия изгибающего момента является балка с постоянной строительной высотой двутаврового сечения. В работе [1] при проектировании силовой схемы балочной конструкции показано, что распределение материала в равнопрочной пластине переменной толщины соответствует балке переменного сечения. Полученное распределение материала отражает возможные геометрические области рационального расположения элементов конструкции – поясов и стенки балки.

В работе [2] предлагается метод оптимизации тонкостенных балок. Особенностью метода является параметризация сечения в виде набора связанных линейных сегментов, что позволяет использовать алгоритмы, предназначенные для оптимизации ферм. Для линейно-упругого анализа применяется метод конечных полос, который снижает вычислительные за-

траты по сравнению с подходом [3]. В статье [4] предлагается развитие метода топологической оптимизации [3], где рассматриваются ограничения по прочности и жёсткости балки, анализ чувствительности выполняется с использованием метода сопряжённых уравнений.

В исследовании [5] представлены результаты экспериментальных испытаний двутавровых балок с линейно изменяющейся строительной высотой на устойчивость конструкции.

В работе [6] используется безразмерный критерий весовой эффективности конструкций, нагруженных изгибающим моментом. В качестве характерной нагрузки принимается эквивалентная моменту пара сил. Определена область отношений длины к строительной высоте балки переменного сечения, при которых возможны конструктивные решения с большей весовой эффективностью, чем балка с постоянной строительной высотой. В статье [7] такой подход применён для проектирования центроплана магистрального самолета, включающего балки переменной строительной высоты. В работах [6, 7] используется критерий «силовой фактор» [8, 9].

1 Постановка задачи

Геометрические характеристики проектной области представлены на рисунке 1. Нагружение конструкции – пластины постоянной толщины – осуществляется изгибающим моментом, заданным двумя парами сил P . Целевой функцией является масса конструкции m_k .

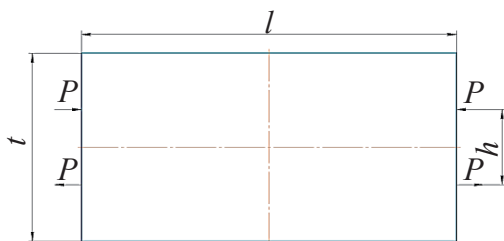


Рисунок 1 – Геометрические характеристики проектной области

Определяются следующие характеристики: количество и тип конструктивных элементов, их расположение и типы соединения между собой; форма и размеры сечений конструктивных элементов. В качестве функциональных ограничений учитываются условия прочности в каждом элементе; условия местной и общей устойчивости конструкции.

На начальной стадии проектирования применяется континуальная модель, непрерывно заполняющая заданную проектную область [10]. Для поиска рациональной силовой схемы конструкции применяется подход, заключающийся в минимизации в проектной области силового фактора G [9]:

$$G = \int_V \sigma^{\text{экв}} dV, \quad (1)$$

где $\sigma^{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения, действующие в конструкции; V – объём конструкции.

Эквивалентные напряжения по условию текучести Генки-Губера-Мизеса для пластинчатых элементов определяются:

$$\sigma^{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}, \quad (2)$$

где σ_1, σ_2 – главные напряжения.

Масса конструкции на этом этапе прогнозируется по формуле [9]:

$$m_k = \varphi \rho \frac{G}{\sigma}, \quad (3)$$

где φ – коэффициент полной массы, определяемый как отношение массы конструкции к теоретически необходимой массе силового материала; ρ и σ – плотность и допускаемое напряжение конструкционного материала.

Коэффициент φ определяет долю массы конструкции, которая не известна на начальных этапах проектирования конструкции и не учитывается в модели. Эту дополнительную массу могут составлять элементы, обусловленные технологическими особенностями производства,

несиловые, поддерживающие и крепёжные детали. Для агрегатов авиационных конструкций коэффициент φ , как правило, принимает значение около $\varphi = 2$ [11, 12]. Для балочной конструкции прирост дополнительной массы могут дать подкрепляющие элементы, обеспечивающие её устойчивость.

На ранних стадиях проектирования для оценки массы конструкции удобно использовать безразмерный коэффициент силового фактора C_k [13]:

$$C_k = \frac{G}{RL}, \quad (4)$$

где R и L – характерная нагрузка и характерный размер конструкции.

В работах [6, 7] для балочной конструкции в качестве характерной нагрузки R принимается пара сил $2P$, за характерный размер L – длина передачи изгибающего момента l (рисунок 1). Показано, что для балки с постоянной строительной высотой $C_k = 1$; для балки переменной строительной высотой при условии $C_k < 1$ возможно существование технического решения с массой конструкции меньшей, чем у балки с постоянной строительной высотой.

Учёт устойчивости конструкции на более поздних этапах проектирования производится путём решения задачи о собственных значениях [14]:

$$([K] - \eta_j [K_G])\{W_j\} = \{0\}, \quad (5)$$

где $[K]$ – матрица жёсткости конструкции; $[K_G]$ – матрица геометрической жёсткости, зависящая от формы упругой системы и распределения в ней внутренних усилий при действии нагрузки $\{P\}$; $\{W_j\}$ – собственный вектор формы потери устойчивости, связанный с j -м собственным значением η_j .

Задачу (5) можно представить в виде:

$$\eta_j = \frac{\{W_j\}^T [K] \{W_j\}}{\{W_j\}^T [K_G] \{W_j\}}, \quad (6)$$

Значение критической нагрузки потери устойчивости конструкции по вектору $\{W_j\}$ можно выразить как:

$$\{P_j\} = \eta_j \{P\}. \quad (7)$$

Критическим является наименьшее (первое) собственное значение η_1 .

2 Методика решения

Предлагаемый подход основывается на применении континуальной пластины переменной толщины [1] с последующей параметрической оптимизацией элементов конструкции. Декомпозиция задачи проектирования позволяет выделить следующие этапы.

- 1) *определяется конструктивно-силовая схема*. Разрабатывается конечно-элементная модель (КЭМ-1) проектной области (см. рисунок 1). Оптимизация распределения материала в КЭМ-1 по условиям прочности без учёта требований устойчивости и технологических требований позволяет сформировать теоретически оптимальную конструкцию (ТОК). Оптимизация выполняется по алгоритму [1] с использованием [15]. На основе анализа силовой работы ТОК определяется количество и тип силовых элементов.
- 2) *разрабатывается КЭМ-2*, которая представляется как комбинированная упругая система, состоящая из стенки, моделируемой мембранными элементами, работающими в плоском напряжённом состоянии, и поясов – стержневых элементов, воспринимающих осевые усилия. Определяется граница выреза в стенке по условиям прочности.
- 3) *разрабатывается КЭМ-3*, состоящая из объёмных элементов и двухмерных изгибно-мембранных элементов [16]. Определяются: граница выреза в стенке по условиям проч-

ности и устойчивости; параметры стыковых и подкрепляющих элементов; размеры и форма сечений конструктивных элементов.

2.1. Определение конструктивно-силовой схемы

Целевой функцией является силовой фактор G , определяемый по соотношениям (1), (2).

В качестве проектных переменных принимаются толщины в конечных элементах пластины δ_i ($i = 1, 2, \dots, n_1$), где n_1 – количество элементов в КЭМ-1.

Для анализа силовой работы ТОК используются картины потоков главных усилий (ПГУ) [1, 11]. В результате принимается решение по выбору параметров силовой схемы конструкции. В ТОК элементы с большими значениями толщины пластины, в которых материал работает в одноосном напряжённом состоянии, могут трактоваться как пояса балки; элементы ТОК с меньшими значениями толщин пластины, испытывающие двухосное напряжённое состояние, – как стенка балки.

2.2. Определение границы выреза в стенке по условиям прочности

Внутри проектируемой конструкции в зонах с исчезающе малой толщиной элементов возможен вырез. В КЭМ-2 принимается начальная граница выреза, по которой из конструктивных соображений располагаются стержневые элементы. Граница выреза корректируется с использованием стохастического метода дифференциальной эволюции [17].

Целевой функцией является силовой фактор G .

В качестве проектных переменных принимаются координаты узлов на границе выреза y_i ($i = 1, 2, \dots, n_2$), где n_2 – количество узлов на границе выреза в КЭМ-2.

2.3. Разработка конструкции с учётом требований прочности и устойчивости

В качестве проектных переменных используются толщины в изгибно-мембранных элементах $\delta_i^{(e)}$ ($i = 1, 2, \dots, n_3$), где n_3 – количество изгибно-мембранных элементов в КЭМ-3.

Для учёта технологических требований используется приём представления конструкции в виде совокупности подконструкций. Объединение в подконструкции осуществляется на основе линейных связей:

$$\{\delta\} = [H]\{\delta_i^{(e)}\}, \quad \{\delta\} = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n_4}\}, \quad n_4 < n_3 \quad (8)$$

где $[H]$ – булева матрица связи; n_4 – количество подконструкций.

В каждую подконструкцию включаются элементы с примерно одинаковой толщиной $\delta_i^{(e)}$, и это условие сохраняется в процессе оптимизации. Границы варьирования проектных переменных задаются следующими условиями:

$$\delta_i^{(min)} \leq \delta_i^{(e)} \leq \delta_i^{(max)}, \quad (i = 1, 2, \dots, n_3), \quad (9)$$

где $\delta_i^{(min)}$ и $\delta_i^{(max)}$ – минимальные и максимальные значения i -ой проектной переменной, обусловленные конструктивно-технологическими требованиями.

Целевая функция – масса конструкции:

$$m_k(\delta) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Функциональные ограничения $g_j(X)$ представляются так:

$$g_j(\delta) = \sigma_j^{\text{экв}} - \sigma \leq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n_3), \quad (11)$$

$$g_j(\delta) = \bar{\eta} - \eta_1 \leq 0, \quad (j = n_3 + 1), \quad (12)$$

где $\bar{\eta}$ – допускаемое значение величины η_1 (обычно $\bar{\eta} = 1$).

Для решения задачи (8)–(12) используется подход, предложенный в [14] на основе концепции равнопрочности и анализа коэффициентов чувствительности $\partial\eta_j/\partial\delta_i$, учитывающих энергию деформации по соответствующей форме потери устойчивости.

2.4. Валидация конечно-элементного моделирования

Рассматривается задача анализа устойчивости центрально сжатой балки длиной $l_6=1000$ мм с двутавровым поперечным сечением (см. рисунок 2). Характеристики конструкционного материала: модуль упругости $E=70,000$ Мпа, коэффициент Пуассона $\nu_a=0,33$, плотность $\rho=2700$ кг/м³, допускаемое напряжение $\sigma=340$ Мпа.

Критическая сжимающая нагрузка для балки определяется по формуле Эйлера [18] и используется как эталон для оценки достоверности КЭМ:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 E_a J_{min}}{(\mu l_6)^2} = \frac{\pi^2 \times 70 \times 10^9 \times 2,1341 \times 10^{-8}}{(2 \times 1)^2} = 3686 \text{ Н}, \quad (13)$$

где $\mu=2$ – коэффициент приведения длины для заделки;

$$J_{min} = \frac{96 \times 1^3}{12} + 2 \times \left(\frac{2 \times 40^3}{12} \right) = 21341 \text{ мм}^4 \text{ – минимальный момент инерции балки.}$$

Результаты вычислительного эксперимента сеточной сходимости КЭМ балки приведены на рисунке 3, где n_3 – число конечных элементов вдоль длины балки. Вдоль высоты балки в моделях используется $n_3/10$ конечных элементов. Погрешность определения η_1 для балки с помощью МКЭ составляет менее 1%, что подтверждает достоверность моделирования.



Рисунок 2 – Поперечное сечение балки

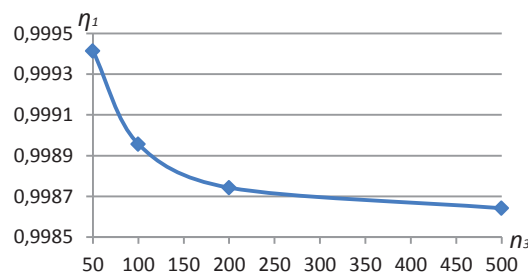


Рисунок 3 – Сеточная сходимость КЭМ

3 Пример

Конечно-элементное моделирование конструкции осуществлялось в программной среде *Femap* [16]. Для оптимизации распределения материала в пластинах, оболочках и стержнях использована программа [15]. В качестве критерия останковки итераций использована сходимость вычислительного процесса по значениям проектных переменных. Вычислительный процесс прекращался, когда изменение толщин всех элементов КЭМ на следующей итерации относительно предыдущей составляло менее 1%.

Принятые значения параметров проектной области (см. рисунок 1): $l=4000$ мм, $h=800$ мм, $P=250$ кН. Характеристики конструкционного материала приведены в разделе 2.4.

Результаты оптимизации распределения материала после 15 итераций по алгоритму [1] в континуальной модели приведены на рисунке 4.

Картина ПГУ, показанная на рисунке 5, согласуется с результатами, полученными в работе [1], и указывает на возможность снижения массы конструкции за счёт перехода от балки с постоянной строительной высотой к балке с переменной строительной высотой. Анализ распределения одноосных потоков усилий в проектной области позволяет идентифицировать наличие и расположение в силовой схеме конструкции внешних, внутренних и боковых поясов (см. рисунок 6).

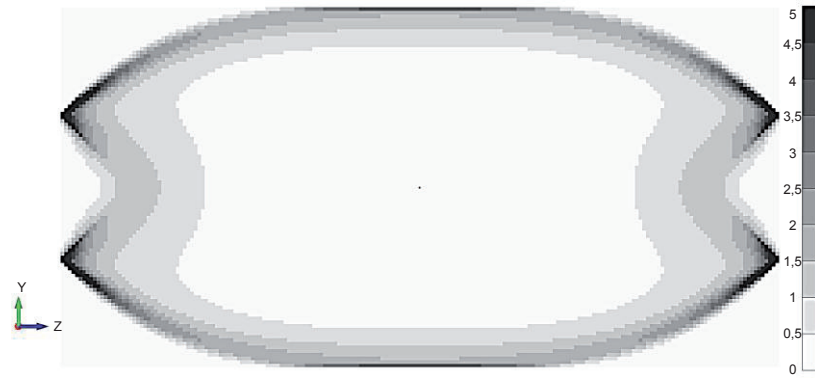


Рисунок 4 – Распределение толщин [мм] в континуальной модели

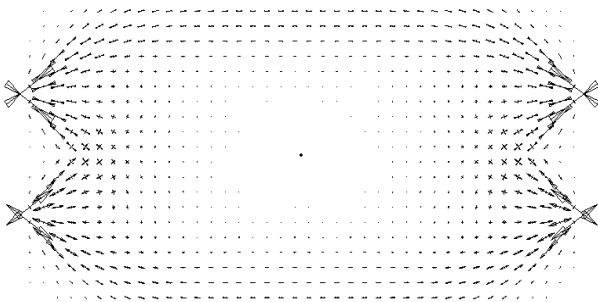


Рисунок 5 – Картина ПГУ в ТОК

Получена ТОК с коэффициентом силового фактора $C_k=0,832$, массой $m_k=13,219$ кг, силовым фактором $G=1,663 \times 10^6$ кН*мм.

Граница выреза, определённая с помощью метода дифференциальной эволюции, представлена на рисунке 6. Для оптимизации формы контура выреза в КЭМ-2 потребовалось 483 итерации. Длительность расчёта составила около 1 часа (для шестиядерного двенадцатипоточного процессора с базовой частотой 3,5 ГГц); использованная оперативная память объёмом 1,8 ГБ (эффективная частота 2,7 ГГц).

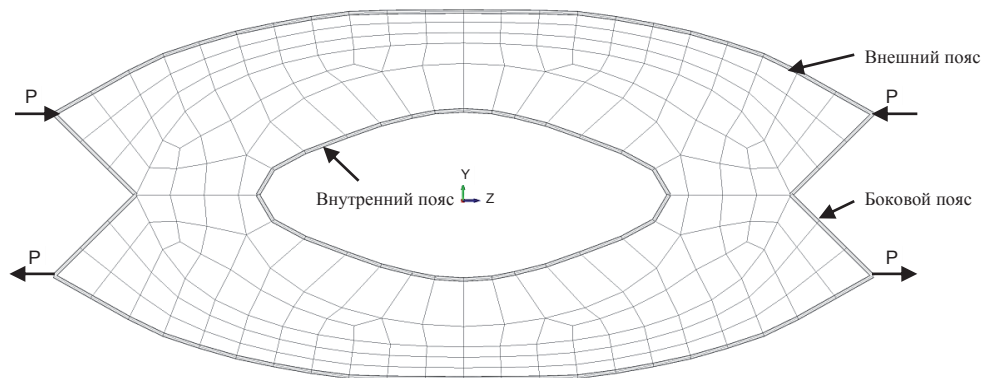


Рисунок 6 – КЭМ-2 после оптимизации

КЭМ-3 показана на рисунке 7. Моделирование внешних, внутренних, боковых поясов и стенки конструкции производилось изгибно-мембранными конечными элементами, моделирование кронштейнов (см. элемент А на рисунке 7) – объёмными конечными элементами. Для оптимизации распределения материала в элементах конструкции по условиям прочности и устойчивости потребовалось 70 итераций алгоритма [14], длительность расчёта составила 2,5 часа (для шестиядерного двенадцатипоточного процессора с базовой частотой 3,5 ГГц) при использовании 8 ГБ оперативной памяти с эффективной частотой 2,7 ГГц. Полученная в результате оптимизации силовая схема конструкции показана на рисунке 8. Весовая сводка спроектированной конструкции представлена в таблице 1.

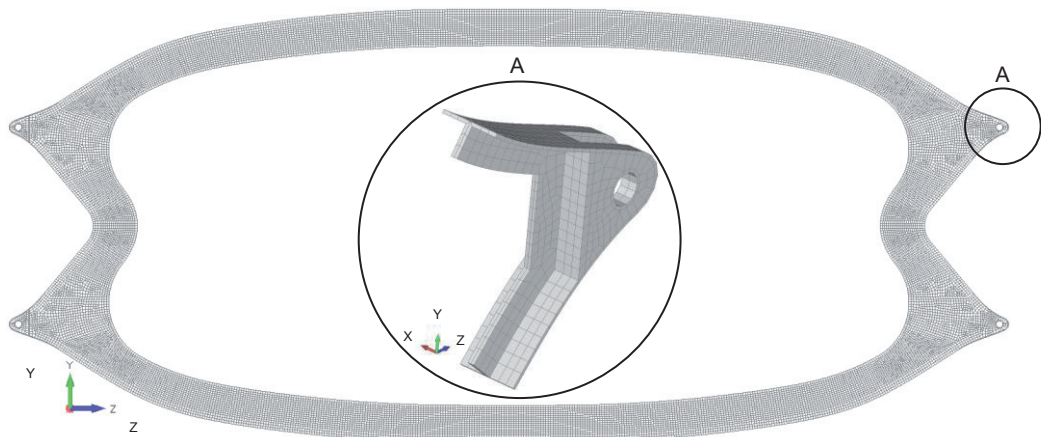


Рисунок 7 – КЭМ-3 и КЭМ кронштейна

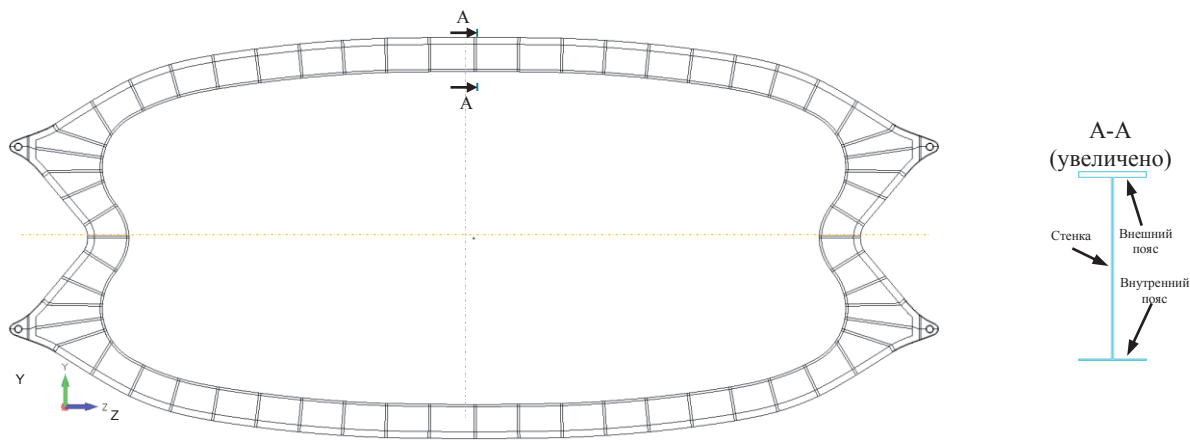


Рисунок 8 – Итоговая схема конструкции

Анализ результатов проектирования конструкции показывает, что значение коэффициента $C_k = 0,832$ меньше чем у балки с прямолинейными поясами на 17%.

4 Анализ чувствительности решения

Важным этапом проектирования конструкций является анализ чувствительности функциональных ограничений [19]. Коэффициенты чувствительности позволяют наметить пути совершенствования конструкции с учётом функциональных ограничений.

В ходе решения задачи обнаружено, что добавление материала в зоны стенки с высокими значениями коэффициентов чувствительности ограничений по устойчивости не приводило к повышению критической нагрузки потери устойчивости. В работе [20] подобное явление выявлено при проектировании конструкций по условиям прочности: удаление из конструкции некоторых наиболее нагруженных элементов приводит к более выгодному перераспределению напряжений в ней при сохранении несущей способности и снижении массы. Удаление наиболее нагруженных элементов может быть полезным при проектировании конструкции с учётом требований устойчивости. Удаление этих элементов в статически неопределимых конструкциях повлечёт перераспределение усилий, поэтому данный приём не гарантирует успех во всех проектных ситуациях.

Таблица 1 – Весовая сводка спроектированной конструкции

Элементы конструкции	Масса, кг
Внешние пояса	4,78
Боковые пояса	0,56
Внутренний пояс	2,90
Стенка	10,84
Подкрепляющие стойки	3,88
Кронштейны	3,13
Всего	26,1

Рассматривается ситуация, возникшая при выполнении анализа КЭМ-3. Коэффициенты чувствительности ограничения по устойчивости балки, нормированные относительно максимального значения, представлены на рисунке 9. По результатам анализа принято решение увеличить размер выреза в стенке за счёт удаления группы конечных элементов стенки с высокими значениями коэффициентов чувствительности по устойчивости. Схема и результаты принятия решения показаны на рисунке 10. Дальнейшая оптимизация распределения материала в элементах конструкции по [17] позволила снизить на 24% массу конструкции при повышении её устойчивости к критической нагрузке. Получено значение $\eta_1=1,02$.

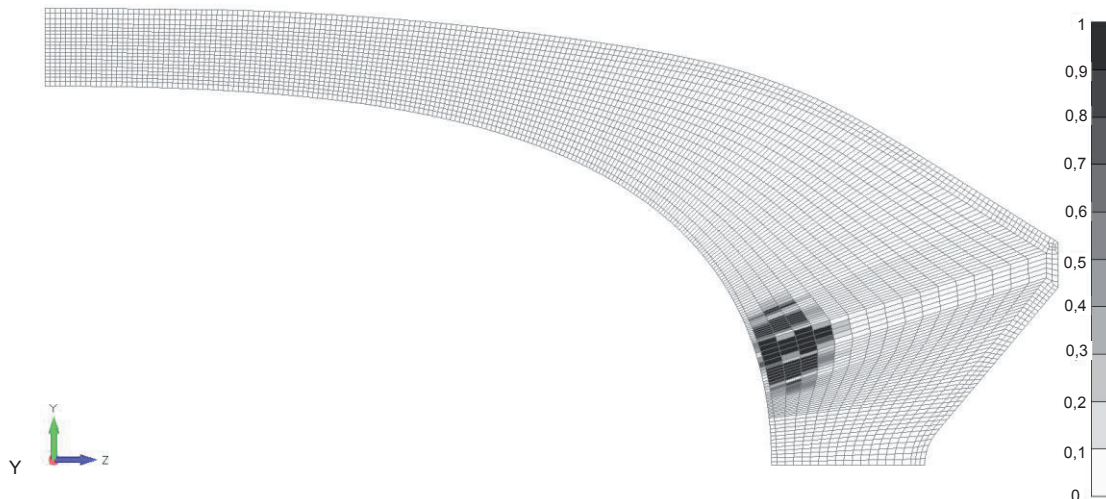


Рисунок 9 – Коэффициенты чувствительности устойчивости конструкции (показаны элементы стенки для четверти КЭМ-3)

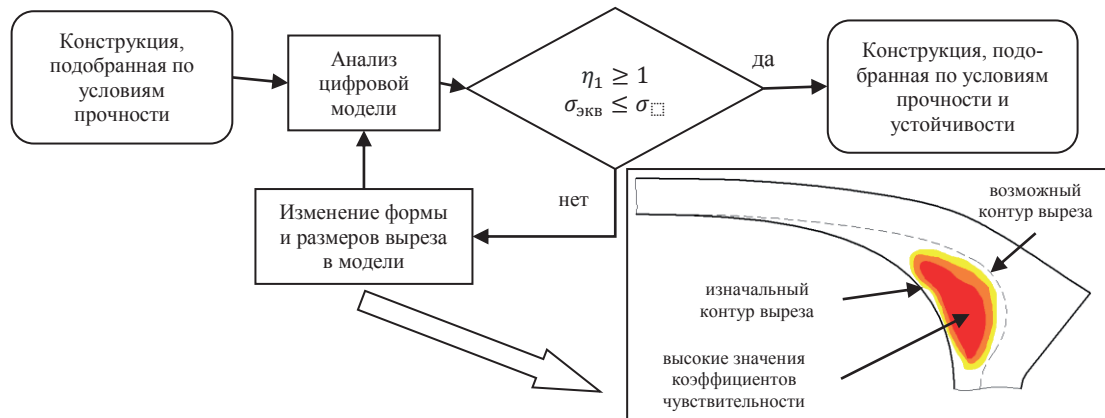


Рисунок 10 – Схема принятия решения при определении границы выреза в конструкции

Заключение

Предложена методика проектирования нагруженных изгибающим моментом конструкций переменной строительной высоты с учётом требований прочности, устойчивости и технологических ограничений.

Применение разработанной методики в рассмотренном примере позволило получить конструкцию, удовлетворяющую условиям прочности и устойчивости, при выигрыше в весовой эффективности около 17%. Выявлена проектная ситуация, в которой удаление из конструкции элементов с высокими значениями коэффициентов чувствительности ограничений по устойчивости позволяет снизить массу конструкции на 24%.

Список источников

- [1] **Комаров В.А.** Проектирование силовых схем авиационных конструкций. *Актуальные проблемы авиационной науки и техники*. 1984. М.: Машиностроение. С.114-129.
- [2] **Marzok A.** Simultaneous sizing and topology optimization of extruded elastic thin-walled beams. *Computers & Structures*. 2025. V.311. No.1. DOI: 10.1016/j.compstruc.2025.107689.
- [3] **Lógó J., Ismail H.** Milestones in the 150-year history of topology optimization: A review. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*. 2020. V.27. No.2-3. P.97-132. DOI: 10.24423/comes.296.
- [4] **Lin Z., Morandini M.** Topology optimization of isotropic beam cross section accounting for stiffness and strength constraints: Topology optimization of isotropic beam cross section. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2025. V.68. No.245. 24 p. DOI: 10.1007/s00158-025-04185-7.
- [5] **Guo X., Feng H., Hou J. et al.** Geometric Nonlinear Analysis of Timoshenko Beams with Variable Cross-Section Using Co-rotational Formulation. *Wind Energy Science Discussions*. 2025. 18 p. DOI: 10.5194/wes-2025-180.
- [6] **Одинцова С.А.** Исследование безразмерного критерия оценки весовой эффективности конструкций силовых шпангоутов. *Труды МАИ*. 2016. Вып. 85. С.1-18.
- [7] **Болдырев А.В., Золотов Д.В.** Оценка весовой эффективности центроплана магистрального самолёта. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2025. Т.24, №1. С.7-18. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-7-18.
- [8] **Комаров В.А.** Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы. *Полёт*. 2000. №1. С.31–39.
- [9] **Комаров В.А.** Точное проектирование. *Онтология проектирования*. 2012. №3(5). С.8–23.
- [10] **Болдырев А.В., Комаров В.А.** Применение модели переменной плотности на ранних стадиях проектирования крыльев. *Ученые записки ЦАГИ*. 2011. Т.42. №1. С.94-104.
- [11] **Семёнов В.Н.** Конструкции самолётов замкнутой и изменяемой схем М.: ЦАГИ. 2006. 229 с.
- [12] **Козлов Д.М., Комаров В.А., Майнсков В.Н. и др.** Моделирование конструкции планера самолета для весовых расчетов на ранних стадиях проектирования. *Техника воздушного флота*. 1999. №4-5. С.31-37.
- [13] **Комаров В.А.** Безразмерный критерий силового совершенства конструкций. *Известия РАН. Механика твёрдого тела*. 2018. Т.53. №4. С.34–47.
- [14] **Болдырев А.В.** Структурная оптимизация силовых конструкций с учетом требований устойчивости. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2012. №1. С.132-140.
- [15] **Болдырев А.В., Золотов Д.В., Кишов Е.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025612034 Российская Федерация. Программа для получения равнопрочного распределения материала в комбинированных упругих системах: заявл. 23.12.2024; опубл. 24.01.2025 / заявитель Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева.
- [16] **Рычков С.П.** Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
- [17] **Storn R., Price K.** Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997. T11. №4. С.341-359. DOI: 10.1023/A:1008202821328.
- [18] **Wei D., Sarria A., Elgindi M.** Critical Buckling Loads of the Perfect Hollomon's Power-law Columns. *Mechanics Research Communications*. 2013. V.47. No.4. P.69-76. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2012.09.004.
- [19] **Хог Э., Чой К., Комков В.** Анализ чувствительности при проектировании конструкций. М.: Мир. 1988. 428 с.
- [20] **Комаров В.А.** Рациональное проектирование силовых авиационных конструкций: диссертация ... доктора технических наук: 05.07.02. Куйбышев, 1974. 328 с.

Сведения об авторах



Болдырев Андрей Вячеславович, 1963 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт им. С.П. Королёва (КуАИ) в 1986 г., д.т.н. (2012). Заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарского университета), профессор Передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского университета. В списке научных трудов более 90 работ в области проектирования летательных аппаратов. ORCID: 0009-0004-6126-3020. boldirev.av@ssau.ru.

Золотов Дмитрий Викторович, 1998 г. рождения. Окончил магистратуру Самарского университета (2022). Ассистент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского университета. ORCID: 0009-0005-7649-0880. zolotov.dv@ssau.ru. ✉.



Поступила в редакцию 03.06.2026, после рецензирования 29.06.2026. Принята к публикации 10.07.2026.



Rational design of structures subjected to bending moment with strength and stability constraints

© 2026, A.V. Boldyrev, D.V. Zolotov ✉

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

A methodology is proposed for the minimum-mass design of structures subjected to bending moments, with constraints imposed on stresses and critical buckling loads. The design variables include the parameters of the load-bearing configuration as well as the dimensions and cross-sectional shapes of the structural members. At the first stage, the load-bearing configuration of the structure within a prescribed design domain is determined subject to strength constraints using a continuum model represented by a variable-thickness plate. At the second stage, the boundary of a cutout in the structure is determined using the stochastic differential evolution method while satisfying the strength constraints. At the third stage, a variable-cross-section structure is developed with due consideration of strength and stability requirements. Design situations arising during the development of the structure under consideration are discussed, in which decisions must be made on the basis of sensitivity analysis of the stability constraints. A design situation is identified in which removing structural elements characterized by high strain energy values in the critical buckling mode results in a reduction in structural mass. An illustrative example demonstrates the possibility of obtaining a structure with variable structural depth that satisfies both strength and stability requirements while achieving a 17% mass reduction compared with a structure of constant structural depth.

Keywords: design, structure, optimization, bending moment, strength constraints, stability constraints, sensitivity coefficients, decision-making.

For citation: Boldyrev AV, Zolotov DV. Rational design of structures subjected to bending moment with strength and stability constraints [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026. 16(3). 528-538. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-528-538.

Authors' contribution: Boldyrev A.V. – development of the article structure, analysis of design situations; Zolotov D.V. – development of the design methodology, calculations, and analysis of results.

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

List of figures and table

- Figure 1 – Geometric characteristics of the design domain
- Figure 2 – Beam cross-section
- Figure 3 – Mesh convergence of the finite element model (FEM)
- Figure 4 – Thickness distribution [mm] in the continuum model
- Figure 5 – Strain energy density distribution in the theoretically optimal structure (TOS)
- Figure 6 – FEM-2 after optimization
- Figure 7 – FEM-3 and the finite element model of the bracket
- Figure 8 – Final structural configuration
- Figure 9 – Structural stability sensitivity coefficients (wall elements for one quarter of FEM-3 are shown)
- Figure 10 – Decision-making scheme for determining the cutout boundary in the structure
- Table 1 – Weight summary of the designed structure

References

- [1] Komarov VA. Designing of aircraft structures structural layouts [In Russian]. *Actual problems of aviation science and technology*. Moscow: Mashinostroenie Publishers, 1984: 114-129.
- [2] Marzok A. Simultaneous sizing and topology optimization of extruded elastic thin-walled beams. *Computers & Structures*. 2025; 311(1): 38. DOI: 10.1016/j.compstruc.2025.107689.

- [3] **Lógó J, Ismail H.** Milestones in the 150-year history of topology optimization: A review. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*. 2020; 27(2-3): 97-132. DOI: 10.24423/comes.296.
 - [4] **Lin Z, Morandini M.** Topology optimization of isotropic beam cross section accounting for stiffness and strength constraints: Topology optimization of isotropic beam cross section. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2025; 68(245): 24 p. DOI: 10.1007/s00158-025-04185-7.
 - [5] **Guo X, Feng H, Hou J. et al.** Geometric Nonlinear Analysis of Timoshenko Beams with Variable Cross-Section Using Co-rotational Formulation. *Wind Energy Science Discussions*. 2025; 18 p. DOI: 10.5194/wes-2025-180.
 - [6] **Odintsova S.A.** Investigation of a dimensionless criterion for evaluating the weight efficiency of strong frame structures. *Trudy MAI*. 2016; 85: 1-18.
 - [7] **Boldyrev AV, Zolotov DV.** Evaluation of mainline aircraft center section weight efficiency. *Vestnik of Samara university aerospace and mechanical engineering*. 2025; 24(1): 7-18. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-7-18.
 - [8] **Komarov V.A.** Weight analysis of aircraft structures: theoretical foundations. *Scientific and technical journal "Polyot" ("Flight")*. 2000; 1: 31-39.
 - [9] **Komarov V.A.** Concurrent design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2012; 3(5): 8-23.
 - [10] **Boldyrev AV, Komarov V.A.** Application of the variable density model in the early stages of wing design [In Russian]. *Uchenye zapiski TSAGI*. 2011; 42(1): 94-104.
 - [11] **Semenov V.N.** Aircraft designs of closed and variable aerodynamic designs [In Russian]. Moscow: TSAGI publishing department, 2006: 229 p.
 - [12] **Kozlov DM, Komarov V.A, Maynskov V.N. et al.** Modeling of the airframe structure for weight calculations in the early stages of design [In Russian]. *Tekhnika vozdushnogo flota*. 1999; 4-5: 31-37.
 - [13] **Komarov V.A.** Dimensionless Criterion of Power Perfection of a Structure [In Russian]. *Mechanics of Solids*. 2018; 4: 34-47.
 - [14] **Boldyrev AV.** Structural optimization of power structures with stability constraints [In Russian]. *Mechanics of Solids*. 2012; 1: 132-140.
 - [15] **Boldyrev AV, Zolotov DV, Kishov E.A.** Certificate of State registration of the computer program No. 2025612034 Russian Federation. A program for obtaining an equally strong material distribution in combined elastic systems; application filed by Samara National Research University named after academician S.P. Korolev 23.12.2024; published 24.01.2025.
 - [16] **Rychkov S.P.** Structural modeling in the Femap environment with NX Nastran [In Russian]. Moscow: DMK Press, 2013: 784 p.
 - [17] **Storn R, Price K.** Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997; 11: 341-359. DOI: 10.1023/A:1008202821328.
 - [18] **Wei D, Sarria A, Elgindi M.** Critical Buckling Loads of the Perfect Hollomon's Power-law Columns. *Mechanics Research Communications*. 2013; 47(4): 69-76. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2012.09.004.
 - [19] **Khog E, Choy K, Komkov V.** Sensitivity analysis in structural design [In Russian]. Moscow, Mir Publishers, 1988: 428 p.
 - [20] **Komarov V.A.** Rational design of aircraft load-carrying structures [In Russian]. Doctor of Technical Sciences dissertation. Kuybyshev, 1974: 328 p.
-

About the authors

Andrey Vyacheslavovich Boldyrev (b. 1963) graduated from the S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, USSR) in 1986. Doctor of Technical Sciences (2012). Head of the Department of Aircraft Construction and Design at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University); Professor at the Advanced Aerospace Engineering School of Samara University. He is the author and a co-author of about 90 scientific publications in the field of aircraft design. ORCID: 0009-0004-6126-3020boldirev.av@ssau.ru.

Dmitriy Viktorovich Zolotov (b. 1998) received his Master's degree from Samara University in 2022. Assistant at the Department of Aircraft Construction and Design, Samara University. ORCID: 0009-0005-7649-0880. zolotov.dv@ssau.ru. ✉.

Received June 3, 2026. Revised June 29, 2026. Accepted July 10, 2026.

Индекс 29151

LXI *exitus*
magazine

**“ ONTOLOGISTS
AND DESIGNERS
OF ALL COUNTRIES
AND SUBJECT AREAS,
JOIN US! ”**



<https://www.ontology-of-designing.ru/>