

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

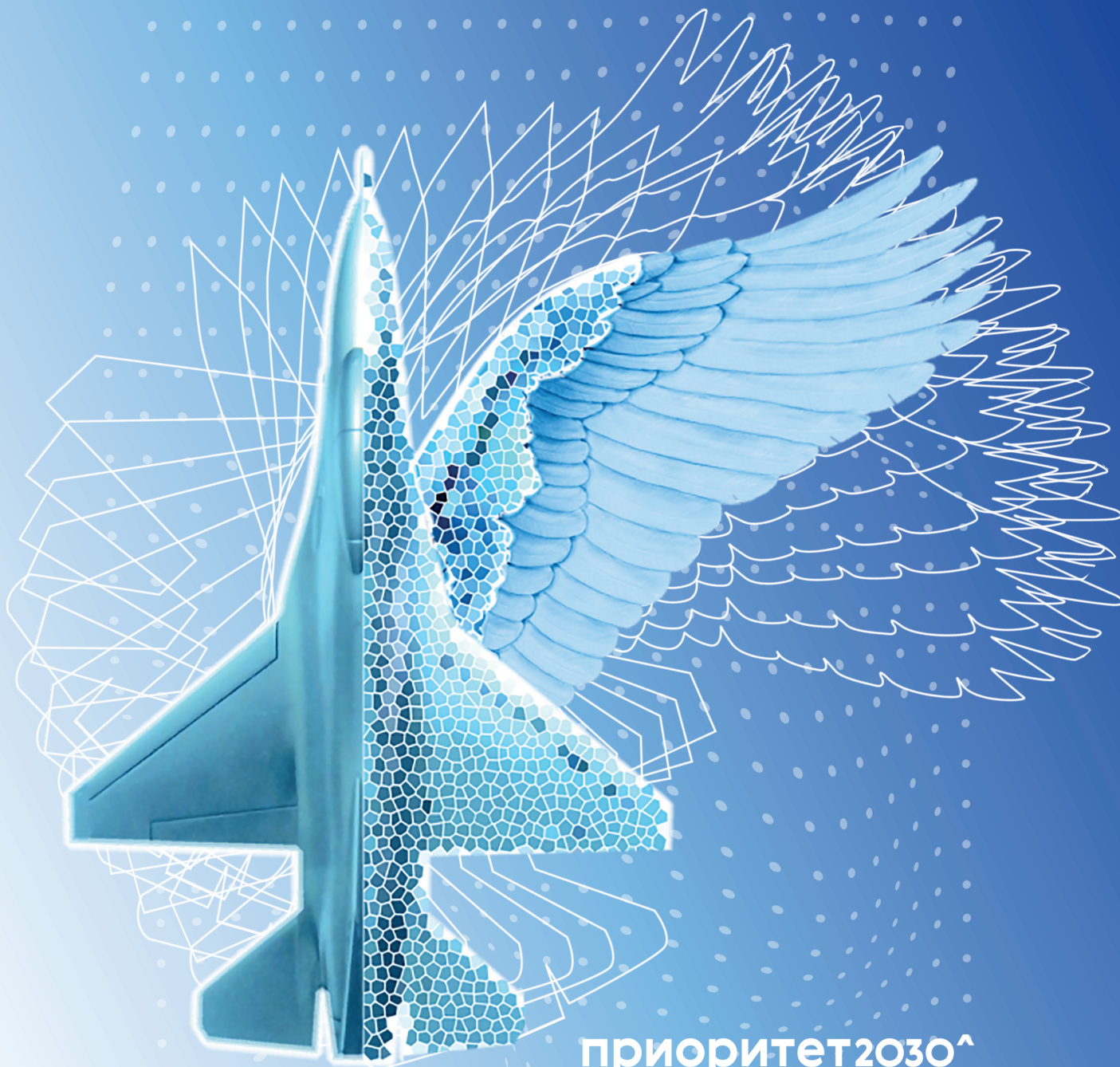
ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

Vol 15
2025
№4

Научный журнал -
Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



приоритет2030⁺

лидерами становятся

Передовые
инженерные
школы



Национальный
Фонд
Искусственного
Интеллекта

Scientific journal

Volume 15

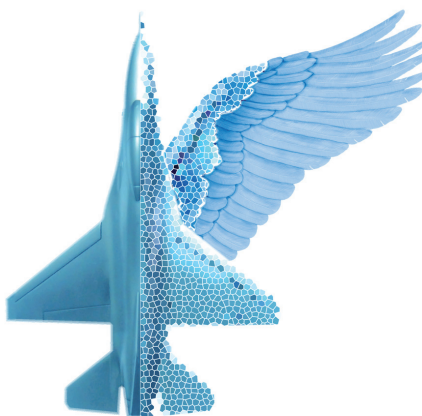
N 4

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 15

№ 4



2025

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 «EVRKA», St. Petersburg, Russia
 Valeriya V. **Gribova***, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, IAPU of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia
 Yury A. **Zagorulko***, Ph.D., Senior Researcher, ISI of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia
 Valery A. **Komarov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Vladik **Kreinovich**, Ph.D., Professor, University of Texas at El Paso, El Paso, USA
 Venedikt S. **Kuzmichev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry V. **Lande***, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, IPRI NASU, Kiev, Ukraine
 Paulo **Leitao**, Professor at Polytechnic Institute of Bragança, Bragança, Portugal
 Vladimir **Marik**, Professor, Scientific Director of the CIIRC of the Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic
 Lyudmila V. **Massel***, Doctor of Technical Sciences, Professor, ISEM of the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia
 Aleksandr Yu. **Nesterov**, Doctor of Philosophy, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry A. **Novikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Alexander V. **Palagin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the NASU, Ins. of Cybernetics, Kiev, Ukraine
 Yury M. **Reznik**, Doctor of Philosophy, Professor, Institute of Philosophy of RAS, Moscow
 George **Rzevski**, Professor, Open University, London, UK
 Peter O. **Skobelev***, Doctor of Technical Sciences, SamSC of RAS, Samara, Russia
 Sergey V. **Smirnov***, Doctor of Technical Sciences, PSUTI, member of 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
Крейнович 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 **1,298** (2024).

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

«Хулиганы» в науке и кантовская деонтология 465-470

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е.В. Орлова 471-485

Проектирование цифрового двойника работника предприятия

Д.В. Купцова, А.Я. Дмитриев, И.С. Новиков 486-496

Онтологические аспекты стандартизации

К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова 497-508

Коллективное проектирование и прототипирование робототехнических систем на основе нейрокогнитивного подхода

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.В. Грибова, Е.А. Шалфеева, Д.Б. Окунь, О.Н. Шевченко 509-522

Онтологический комплекс представления знаний для реабилитации травматолого-ортопедических пациентов

А.В. Толок, Н.Б. Толок 523-534

Проекционный принцип построения функционально-воксельных моделей

И.Н. Фомин 535-551

Онтологии в проектировании промышленных цифровых платформ

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

В.В. Миронов, К. В. Миронов 552-565

МП-целостность при проектировании реляционных моделей баз данных

А.Н. Ивутин, П.А. Савенков, А.Г. Волошко 566-577

Автоматизированный сентимент-анализ коротких текстов

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Д.А. Губанов, Л.Ю. Жиликова, О.П. Кузнецов, А.Г. Чхартишвили 578-597

Методы и модели анализа научной деятельности

О.М. Агаева, Н.П. Тучкова, А.Г. Дегтев 598-613

Рекомендательная система на основе обобщённого указателя журналов

А.В. Рипецкий, Е.А. Пелих, В.А. Брыкин, А.А. Колтаков 614-628

Топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели

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. Бопрест Н.М. borgest@yandex.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 01.11.2025. Тираж 100 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

- «Hooligans» in Science and Kantian Deontology 465-470

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

- E.V. Orlova** 471-485
Designing a digital twin of an employee
- D.V. Kuptsova, A.Ya. Dmitriev, I.S. Novikov** 486-496
Ontological aspects of standardization
- K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova** 497-508
Collaborative design and prototyping of robotic systems based on a neurocognitive approach

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

- V.V. Gribova, E.A. Shalfeeva, D.B. Okun, O.N. Shevchenko** 509-522
Ontological knowledge representation framework for rehabilitation of traumatology and orthopedic patients
- A.V. Tolok, N.B. Tolok** 523-534
Projection principle for constructing functional voxel models
- I.N. Fomin** 535-551
Ontologies in designing industrial digital platforms

ONTOLOGY ENGINEERING

- V.V. Mironov, K.V. Mironov** 552-565
AM-integrity in designing relational database models
- A.N. Ivutin, P.A. Savenkov, A.G. Voloshko** 566-577
Automated sentiment analysis of short texts

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

- D.A. Gubanov, L.Yu. Zhilyakova, O.P. Kuznetsov, A.G. Chkhartishvili** 578-597
Methods and models for the analysis of scientific activity
- O.M. Ataeva, N.P. Tuchkova, A.G. Degtev** 598-613
Recommendation system based on a generalized journal index
- A.V. Ripetskiy, E.A. Pelikh, V.A. Brykin, A.A. Koltakov** 614-628
Topology optimization of components using an implicit geometric model representation

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@yandex.ru

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

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



ОТ РЕДАКЦИИ

"Хулиганы" в науке и кантовская деонтология "Hooligans" in Science and Kantian Deontology

«...Горит на небе новая Звезда, её зажгли, конечно, хулиганы»
Валентин Гафт «Хулиганы»

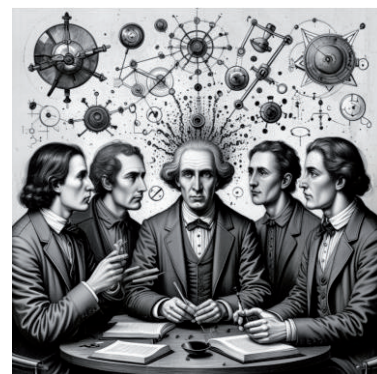
«Принципы нужно иногда нарушать, иначе от них никакой радости»
Эрих Мария Ремарк «Три товарища»

«Делай, что должно, и свершится, чему суждено»
Марк Аврелий «Любовь к судьбе»

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

Присущая нашему журналу *интерсубъективность*, включённость человека в процесс проектирования со всеми его свойствами предполагает необходимость исследования качеств² субъекта проектирования будущего. Того обобщённого и/или вполне конкретного субъекта³, который создаёт артефакт⁴, участвует или влияет на процесс его создания в рассматриваемой предметной области (ПрО) и, наконец, выстраивает будущее цивилизации. В данном обращении внимание сосредоточено на *позитивных качествах* субъектов, которые не боятся выходить за рамки сложившихся представлений в науке, в искусстве и в жизни в целом. Проникновенный стих Валентина Гафта о героях, о воинах и строителях, о поэтах и деятелях искусства в который раз говорит нам о сложной и порой трагической судьбе тех, кто не может жить в границах старых догм, устоев и неработающих деклараций. Живая человеческая ткань прорывается и ищет свою реализацию, своё воплощение в новых формах, создаёт новые принципы, устремляется в иные миры.

Закавыченные «хулиганы» – это, с одной стороны, проявление девиантного поведения человека, но именно в *созидательной форме*, итогом которого является признание результатов этой деятельности как общественно значимое. С другой стороны, это то же поведение, но на ранних этапах взросления индивидов, которое в дальнейшем позволило им смело преодолевать границы, устои и догмы в других областях человеческой деятельности, внося в них новые знания, открывая новые законы, развивая науку и технологии. Со времён Марка Аврелия афоризм «Делай, что должно, и будь, что будет» распространился по всему миру. Его



Одна из шуточных версий обращений к Гигачату с вопросом: «Нарисуй картину на тему: «Хулиганы» в науке и кантовская деонтология»¹

¹ Адрес размещения картины. 14.08.25. <https://giga.chat/gigachat/files/public/generated/2d878be4-9366-408d-8121-cb768644c1f8>.

² Эти *качества человека* изучаются в специальных науках (социальных, психологических, биологических, экономических, медицинских и др.), исследующих его внутренний мир и внешнее проявление, его структуру и поведение. Эти качества проявляются в его творческих и когнитивных способностях, его моральных и культурных ценностях, в его слабостях и пороках, непознанных и не всегда объяснимых умыслах, намерениях, целях и желаниях.

³ *Субъект* в современном понимании трактуется широко и может включать конкретного человека, обобщённого представителя класса специалистов с некой корпоративной потребностью или виртуальных агентов (автономных роботов и ботов), наделённых определёнными свойствами и качествами.

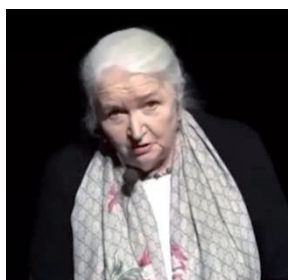
⁴ *Артефакт*, как искусственный объект, понимается в широком смысле от любых создаваемых *субъектами* материальных объектов и систем до виртуальных объектов и процессов.

использовали масоны, о нём говорил Кант, его любил повторять Лев Толстой, а тысячи и миллионы простых людей благодаря этому афоризму что-то изменили в своей жизни.

«Делай, что должно...» – это внутреннее проявление творчества, способности создавать новое, которое не вписывается в сложившиеся представления. Поэтому в разных сферах творческой деятельности можно встретить многократно повторяющиеся позиции, что **«творчество – это, по сути, бунт»**⁵, что **«фантазия – это творчество, а творчество – это бунт»**⁶, что **«творчество – это бунт»**⁷, что **«творчество – это бунт, вызов, риск!»**⁸...

Не редки случаи, когда учёные, деятели искусств и других творческих профессий, ставшие впоследствии великими, не проявляли таланты в разные периоды своей жизни, и далеко не всё им давалось легко, и не во всём они были так успешны, как в том, что сделало их действительно выдающимися.

Так, создатель таблицы химических элементов Дмитрий Менделеев никак не мог сладить с латынью в школе. Математик Николай Лобачевский откровенно хулиганил, на спор перепрыгивал через голову профессора, заезжал во двор университета на корове. Основоположник космонавтики Константин Циолковский стал учёным-самоучкой, потому что из школы его выгнали⁹. Сергей Королев, один из самых талантливых конструкторов в мире, в детстве не подавал родителям никаких надежд и еле вытягивал на тройки основные предметы¹⁰.



Ограниченность слуха Циолковского и глухота Бетховена, возможно, способствовали развитию иных способностей этих гениальных личностей. В одном из интервью профессор и популяризатор науки *Татьяна Черниговская* предположила: «Извините за хулиганство, но от потери слуха Бетховену, как композитору, стало даже лучше – ему не мешали внешние звуки»¹¹. Стоит отметить, что «хулиганские» высказывания и вопросы часто сопровождают выступления нами любимого профессора. В лекции¹², посвящённой моделям нового мира и современным наукам, изучающим будущее, *Татьяна Черниговская*, работая в междисциплинарной области когнитивной науки на пересечении лингвистики, психологии и нейронаук, отметила, что «язык плох для коммуникации, он хорош для мышления». Говоря о турбулентности сегодняшнего этапа, она справедливо заключила: «В таком мире человечество ещё не жило... Планета спятила, ей нужен психиатр!»

Ключевое в хулиганстве – это испытание на прочность норм и границ, которые могут быть изменены. Хулиганство предполагает не делать то, что от тебя ждёт общество, а исследовать грани дозволенного. Хулиганы далеко не идеал, их не следует возводить в примеры, но их стоит воспринимать во всей их многосложности. В годы, когда границы переписываются на глазах, хулиганы снова могут оказаться нужными. Сложнее всего в эпоху потрясений людям, которые делают то, что от них ждут. Когда завтра нормы общества и государств снова перекроются, изначально проигравшие хулиганы, возможно, ненадолго совпадут с генеральной линией, чтобы потом её перечеркнуть. Потому что выживут только хулиганы¹³.

Многие считают, что гениальным людям можно простить некоторые недостатки в поведении. И есть утверждения, что интеллект должен быть «определяющим фактором» при принятии решения о допустимом поведении. Но логическая ошибка в том, что приравнивается интеллектуальность и человеческая порядочность, в то время как это два разных качества. Это можно назвать эффектом Раскольников, героя романа Достоевского «Преступление и наказание», который оправдывал преступления тем, что они позволили бы ему реализовать

Многие считают, что гениальным людям можно простить некоторые недостатки в поведении. И есть утверждения, что интеллект должен быть «определяющим фактором» при принятии решения о допустимом поведении. Но логическая ошибка в том, что приравнивается интеллектуальность и человеческая порядочность, в то время как это два разных качества. Это можно назвать эффектом Раскольников, героя романа Достоевского «Преступление и наказание», который оправдывал преступления тем, что они позволили бы ему реализовать

⁵ Николай Куракин (2011). <https://proza.ru/2011/06/14/20>.

⁶ Елена Котова в книге «Акционерное общество женщин» (2012). <https://www.livelib.ru/quote/382404-aktsionernoe-obschestvo-zhenschin-elena-kotova>.

⁷ Михаил Эйбус: «Творчество – это бунт» (2017). https://vladnews.ru/ev/vl/4246/116678/mihail_eybus.

⁸ Тамара Кислицына. «Творчество – это бунт, вызов, риск!». <https://kkmi.ru/tvorchestvo-eto-bunt-vyzov-risk/>.

⁹ Татьяна Григорьева. 5 российских учёных, которые были двоечниками и хулиганами.

<https://www.culture.ru/materials/255390/5-rossiiskikh-uchenykh-kotorye-byli-dvochnikami-i-khuliganami>.

¹⁰ Elena Vladimirovna. 24 великих двоечника: гениальные двоечники и хулиганы от древности до современности. HeaClub. <https://heaclub.ru/24-velikih-dvochnika-genialnye-dvochniki-i-huligany-ot-drevnosti-do-sovremennosti>.

¹¹ Университет в СМИ. 10 марта 2025. <https://spbu.ru/news-events/universitet-v-smi/tatyana-chernigovskaya-izvinite-zakhuliganstvo-no-ot-poteri-slukha>.

¹² НОВЫЙ МИР - Как быть готовым начать управлять жизнью. 2025. https://vkvideo.ru/video-149124379_456246038.

¹³ Выживут только хулиганы: почему мы так любим плохих парней, рок-звёзд и других возмутителей спокойствия. «Правила жизни» 25.06.2025. <https://www.pravilamag.ru/articles/750851-vyjivut-tolko-huligany-pochemu-my-tak-lyubim-plohih-parnei-rok-zvezd-i-drugih-vozmutelei-sпокойствия/>.

свой исключительный интеллектуальный потенциал. Есть данные, что такого рода психологическое насилие в науке также имеет место быть¹⁴.

В список хулиганов попал и нынешний президент США Дональд Трамп, который также не может похвастаться безупречной историей восхождения к вершине. Учителям Трамп дерзил, не интересовался ни одним из предметов и доставлял много хлопот своим родителям. Не выдержав подобного поведения сына, отец перевел его в школу-интернат при военной академии. На оценки это не особо повлияло, но будущий президент сумел проявить себя в спорте и исправить своё поведение¹⁰.

Люди, которые проявляли агрессию в школьные годы, явно не придерживаясь этических норм, а порой и демонстративно нарушая их, порой зарабатывают больше тех, кто в детстве вел себя спокойно. К таким выводам пришли учёные из Института социальных и экономических исследований при Университете Эссекса¹⁵.

Нобель - шНобель

Или невероятные исследования, которые сначала заставляют людей СМЕЯТЬСЯ, а потом ДУМАТЬ¹⁶.

18 сентября 2025 года состоялась 35-я ежегодная церемония вручения Шнобелевской премии за самые нелепые открытия. Лауреатами стали авторы исследований положительного влияния алкоголя на беглость речи на иностранном языке, динамики роста ногтей на руке, целесообразности окрашивания коров в зебр и многих др. (см. интерпретацию результатов этих необычных исследований на рисунке). Следует отметить, что это были темы реальных исследований, в которые были вложены немалые средства.



В 2025 году лауреатами Шнобелевской премии, которую вручали в Бостонском университете¹⁷, стали 10 самых странных и необычных научных работ с забавными названиями и неочевидным практическим применением. Номинации этой премии в чём-то напоминали известные номинации другой более престижной премии и были таковыми по: вкладу в дело мира, физике, биологии, педиатрии, авиации, здоровому питанию ящериц, психологии, литературе, инженерному дизайну, химии. Здесь приведены некоторых из этих номинаций.

Премия в области авиации касалась исследований эхолокации летучих мышей. «Подвыпивших» мышей выпускали в полёт по длинному коридору наперегонки с трезвыми мышами. Трезвые мыши летели к цели быстрее и эхолокация у них работала лучше.

В области психологии обнаружили: если человеку сообщить, что он «выше среднего» по интеллекту, то на короткое время у него растёт самовосприятие интеллекта и проявляется грандиозный нарциссизм.

В области инженерного дизайна проанализировали проблему и подходы к дезодорации, предложив «солярий для обуви», в котором её облучают ультрафиолетом.

К подобной футуристически-хулиганской стратегии исследований можно было бы отнести и работу в области концептуального проектирования самолёта на основе искусственного интеллекта (ИИ)¹⁸, в частности на основе машинного обучения, представленную на КИИ-2025¹⁹. Ожидаемые в ней результаты подтвердили гипотезу-аксиому о том, что проектирова-

¹⁴ Naomi Oreskes. It's Time for Science to Take Down Bullies in Its Own Ranks. Scientific American. May 1, 2022. <https://www.scientificamerican.com/article/its-time-for-science-to-take-down-bullies-in-its-own-ranks/>.

¹⁵ Из хулиганов часто вырастают преуспевающие люди. 1.04.2024. Forbes Education. Новости. <https://www.forbes.ru/education/509380-iz-huliganov-casto-vyrastaut-preuspevausie-ludi>.

¹⁶ Improbable Research. Research that makes people LAUGH, then THINK. <https://improbable.com/the-35th-first-annual-ig-nobel-prize-ceremony/>.

¹⁷ The 2025 Ig Nobel Prize Winners. <https://improbable.com/ig/winners/#ig2025>.

¹⁸ Адигов Э.О., Борест Н.М. Использование машинного обучения при концептуальном проектировании самолета // Двадцать вторая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2025 (Санкт-Петербург, 6-10 октября 2025 г.). Труды конференции. В 3-х томах. Т. 3. – СПб: Изд-во СПб ФИЦ РАН, 2025. – 461 с. doi: 10.15622/rcai.2025.064.

¹⁹ Национальная конференция по ИИ в Санкт-Петербурге. <https://ssau.ru/news/24834-natsionalnaya-konferentsiya-po-ii-v-sankt-peterburge>

ние сложных артефактов возможно лишь на моделях, которые построены на физических законах и экспертных знаниях. Машинное обучение, нейросетевой подход, большие языковые модели, не имеющие семантической связи с физическим миром, пока не нашли своё место в инженерном проектировании. В некоторых узких сферах²⁰, где имеется значительный набор данных, такой вид ИИ имеет перспективу, особенно при попытке увязки с онтологией Про²¹.

Онтология – деонтология

Композиция – декомпозиция, интеграция – дезинтеграция, мобилизация – демобилизация, онтология – деонтология... Противопоставление понятий – важный элемент познания действительности, когда в формируемом представлении о каком-либо понятии важно отметить наличие в той или степени его противоположности, другой его стороны, его отличие от исходного понятия. И здесь приставка «де-» (или «дез-» перед гласной) легко справляется с этим, наделяя противоположным смыслом и содержанием исходное понятие, оставляя сам термин неизменным. Читателю нашего журнала понятие *онтология*, как модель мира, как модель Про, как основа создаваемых информационных систем, хорошо знакомо.

Есть мнение, что в отличие от гигантского скачка науки и техники наша этика этого не сделала. Напротив, философия морали сделала ряд шагов назад, начиная с эпохи Просвещения, с развития универсалистских подходов, таких как кантовская деонтология и утилитаризм Бентама-Милля²², и отказа от этики добродетели.

Кантовская деонтология (греч., от *deon, deontos* - необходимое) – это этическая теория Иммануила Канта, основанная на идее, что люди должны действовать в соответствии с универсальными моральными принципами, независимо от последствий своих действий.

Некоторые положения кантовской деонтологии:

- поступок имеет моральную ценность только в том случае, если он совершён с правильным намерением или мотивом (проявлением «доброй воли»);
- не последствия действий делают их правильными или неправильными, а мотивы человека, который совершает это действие;
- люди должны относиться к другим как к целям, а не как к средствам;
- действие морально допустимо, только если его максима или правило можно применить повсеместно без противоречия; если максима или правило действия приводит к противоречию при применении повсеместно, то действие морально недопустимо.

Онтология в информатике, как и онтология проектирования, включает субъекта со всеми его качествами в модель Про. По крайней мере, *стремится это сделать*, чтобы решения, генерируемые информационными системами и ИИ, соответствовали гуманистическим принципам, включали этические нормы!!!

Белая книга – Белый список – «...Вот как, вот как, серенький козлик»

Стремление раскрасить нашу жизнь в радужный цвет, тем самым как бы «обелить» её, мотивирует творческих личностей на поиски идеалов в этике, в науке и в жизни в целом. Бурный расцвет ИИ сподвиг на подготовку Белой книги²³ и Кодекса этики в сфере ИИ²⁴, которые активно продвигает Альянс в сфере ИИ²⁵, объединяющий ведущие технологические компании для совместного развития их компетенций и ускоренного внедрения ИИ в образовании, научных исследованиях и в практической деятельности бизнеса. Не менее авторитетная Межведомственная рабочая группа Минобрнауки Российской Федерации работает над Белым списком научных изданий²⁶. Формирование этических норм и правил, объективных и адекватных оценок в том и другом документах даётся их разработчикам с большим трудом в силу ряда причин: сложности классификации научного

²⁰ Ramahi, O. (no date) "Machine Learning for UAV Classification Employing Mechanical Control Information." Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi: 10.36227/TECHRXIV.21257082.V1.

²¹ J. Lu, J. Ma, X. Zheng, G. Wang, H. Li and D. Kiritsis, "Design Ontology Supporting Model-Based Systems Engineering Formalisms," in IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 4, pp. 5465-5476, Dec. 2022. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3106195.

²² Сушенцова М.С. Утилитаризм И. Бентама и Дж. С. Милля: от добродетели к рациональности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2017. №1.

²³ Белая книга этики в сфере искусственного интеллекта / под ред. А. В. Незнамова. М.: Nova Creative Group, 2024. 200 с.

²⁴ Кодекс этики в сфере ИИ. 10 с. https://ethics.a-ai.ru/assets/ethics_files/2025/05/23/Кодекс_этики_20_10_1_yKu2UtZ.pdf.

²⁵ Альянс в сфере искусственного интеллекта. <https://a-ai.ru/>.

²⁶ Единый государственный перечень научных изданий – «Белый список». <https://journalrank.rcsi.science/ru/>.

знания, консенсуса в этических нормах и принципах; трудности в объективизации бюрократических процедур в категорировании и администрировании всех «белых» процессов, ведущих к достижению поставленных целей. Избежать «серых» схем и не получить «серенького козлика» – нелёгкая задача, стоящая перед разработчиками «белого движения» к справедливому миру.

Электронный журнал «*Artificial Ignorance*» («Искусственное невежество» или более мягкий перевод «Искусственная неосведомлённость» – <https://www.ignorance.ai/>) позиционируется как информационный бюллетень для инженеров-программистов, разработчиков продуктов, основателей стартапов и других специалистов в области информационных технологий с целью показать практические способы использования и создания приложений на основе ИИ. Легко заметить, что аббревиатура журнала *AI*, возможно в насмешку, имеет точное совпадение с аббревиатурой ИИ.

Влияние ИИ на то, как преобразуется текст в работах, и какова доля генерируемых ИИ текстов в формируемых людьми текстах, рассмотрено в практическом руководстве²⁷. Констатация того, что уже почти половина текстов пишется ИИ, говорит о том, что этим активно пользуются, благодаря повышению производительности. При этом мало что можно сказать о качестве этого письма с точки зрения какой-либо возможности передачи авторской идеи, его замысла, семантической связанности материала и указания на используемые источники, подтверждающие справедливость или достоверность текста.

21 декабря 2024 года в Самарском университете состоялся семинар «Онтология проектирования»²⁸, на котором подводились итоги года, обсуждались вышедшие номера журнала, его место в научном пространстве, планы и портфель журнала на 2025 год, отмечали готовность 55-ого юбилейного номера уже 15 тома. Формула семинара $15 + 55 = 70$ знаменовала и юбилей выпускающего редактора, основателя и идеолога журнала Н.М. Боргеста, которому заместитель главного редактора и его друг С.В. Смирнов в шутилом «хулиганском» стиле, подражая В.В. Маяковскому, посвятил и зачитал стих. Без купюр он приводится здесь для того, чтобы можно было в который раз убедиться, что в каждом из нас, кто занят научным поиском, есть частичка творческого, созидательного хулигана. Именно эта частичка даёт нам новые, неожиданные идеи и решения, иной взгляд на принятые теории и законы, она ломает наши представления и стереотипы, позволяя совершать открытия и строить иную картину мира, которая раздвигает горизонты наших знаний и представлений о нём.

P.S. – или П(опытайтесь) С(равнить)

Современные студенты, как, впрочем, и иные творческие люди, активно используют технологии, помогающие оперативно составить текст на заданную тему. В журнале иногда нам приходится также сталкиваться с фрагментами работ, написанными с помощью ИИ. Думается, что в этом случае в состав авторов надлежит включать и подобных «субъектов», указывая в разделе «Вклад авторов» соответствующую часть творческих работ, которые ими были выполнены. Здесь же, продолжая озорную тему «хулиганы» в науке, размещён текст, написанный *giga.chat*, для того, чтобы читатель оценил – насколько близки или нет творческие потуги вполне конкретного человека (текст обращения, как и прежде, писал Н.М. Боргест на базе ограниченного набора данных, выбранного им контекста, своего видения и целеполагания) и некой обобщённой искусственной копии, вобравшей в себя миллиарды текстов, недоступных в таком объёме одному человеку для анализа.

Запрос к Гигачату был таким: «Напиши текст редакционной статьи для научного журнала «Онтология проектирования» на тему: «Хулиганы» в науке и кантовская деонтология». Ответ, который приводится целиком без каких-либо правок и дополнений, неплохо добавляет то, о чём автор оригинального текста не писал и на чём не планировал делать акцент.

15 + 55

Боргест! Николай Михайлович! Слушай!
Сегодня твой день - поджарь небеса!
Жизнь есть борьба. Не бей баклуши!
Крути, направляя судьбы колеса!

Рок у порога - отпор давай.
Мир покоряй, возглавь штурмгруппу!
Пятнадцатый том в этот мир вживляй,
И пусть две пятёрки взорвут скорлупы!

Под гром оваций - заслуженная награда!
Храни успех - твой вечный наряд.
И солнце, что греет, не зная прогара,
Твой дерзостный путь озарит камрад!

С.В. Смирнов

Шутиловое, почти хулиганское, подражание Маяковскому на семинаре 21.12.24, посвящённому 15-ому тому журнала

²⁷ Charlie Guo. The Field Guide to AI Slop. And what it's doing to human writing. *Artificial Ignorance*. Oct 22, 2025.

²⁸ В Самарском университете им. С.П. Королёва состоится семинар "Онтология проектирования". 17.12.2024 . <https://ssau.ru/news/23719-v-samarskom-universitete-im-sp-koroleva-sostoitsya-seminar-ontologiya-proektirovaniya>.

«Хулиганы» в науке и кантовская деонтология²⁹



Гигачат: «Получилась такая картина на тему: созидательные «хулиганы» в науке и кантовская деонтология»³⁰.

Современная наука развивается стремительно и многогранно, порождая множество дискуссий вокруг этических аспектов исследовательской деятельности. Среди множества проблем выделяется тема поведения ученых, которые иногда демонстрируют неприемлемые формы взаимодействия с коллегами и результатами исследований. Подобные действия нередко именуются термином «хулиганство», отражающим грубость и пренебрежительное отношение к установленным нормам профессиональной среды.

Подобные проявления представляют собой серьёзную проблему, поскольку они негативно влияют на репутацию науки, дискредитируют исследователей и нарушают принципы честности и открытости. Важно рассмотреть данную ситуацию сквозь призму философских учений, таких как кантовская деонтология, которая предлагает строгие критерии оценки моральных действий индивидов.

Иммануил Кант разработал систему нравственных принципов, основанную на идее долга и категорического императива. Согласно Канту, моральное действие должно быть универсальным и справедливым, подчинённым общим законам разума.

Применяя этот принцип к современной науке, мы видим, что поведение, называемое «хулиганством», нарушает требования объективности и справедливости, провозглашённые наукой.

Так, случаи некорректного цитирования работ коллег, искажения результатов экспериментов ради достижения желаемого вывода или распространение заведомо ложной информации наносят вред всей научной среде. Эти поступки являются примерами нарушения кантовского требования поступать таким образом, чтобы максима нашего действия могла стать всеобщим законом. Ведь такая деятельность создаёт атмосферу недоверия среди учёных, препятствует развитию истинного знания и угрожает целостности науки как института познания истины.

Необходимо отметить, что кантовские нормы предполагают ответственность каждого исследователя перед обществом и самой наукой. Учёный обязан следовать высоким стандартам профессионализма и честности, уважительно относиться к труду коллег и результатам чужих исследований. Нарушение этих норм ведёт к разрушению доверия между учёными и снижает авторитет науки в глазах общества.

Таким образом, изучение проблемы «хулиганства» в науке с точки зрения философии Канта позволяет глубже осознать важность соблюдения профессиональных стандартов и требований. Наука должна оставаться местом интеллектуального обмена и творческого созидания, свободным от манипуляций и недобросовестных практик. Только тогда её вклад в развитие человечества станет поистине значимым и эффективным.

В этом номере – всё серьёзно!

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» рассмотрены: проектирование цифрового двойника работника предприятия (**Уфа**); онтологические аспекты стандартизации (**Самара**); коллективное проектирование и прототипирование робототехнических систем на основе нейрокогнитивного подхода (**Нальчик**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: онтологический комплекс представления знаний для реабилитации травматолого-ортопедических пациентов (**Владивосток**); проекционный принцип построения функционально-воксельных моделей (**Москва**); онтологии в проектировании промышленных цифровых платформ (**Саратов**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» рассмотрены: МП-целостность при проектировании реляционных моделей баз данных (**Уфа**); автоматизированный сентимент-анализ коротких текстов (**Тула**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» рассмотрены: методы и модели анализа научной деятельности (**Москва, ИПУ РАН**); рекомендательная система на основе обобщённого указателя журналов (**Москва, ФИЦ ИУ РАН**); топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели (**Москва, МАИ**).

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 Адрес размещения ответа. 16.08.25. <https://giga.chat/gigachat/tools/neuro-editor/f6ff762c-f626-4465-8bba-65f284bf31be>.

³⁰ Адрес размещения картины. 14.08.25. <https://giga.chat/gigachat/files/public/generated/0d357fcb-c00c-45cd-9daf-77f450044a69>.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.942

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-471-485



Проектирование цифрового двойника работника предприятия

© 2025, Е.В. Орлова

Уфимский университет науки и технологий (УУНТ), Уфа, Россия

Аннотация

Целью создания цифрового двойника работника является минимизация рисков: непредсказуемого нежелательного поведения, профессионального выгорания, снижения вовлечённости в рабочие процессы, снижения производительности, возникновения деструктивных конфликтов. Описаны подходы к проектированию цифровых двойников. Предложено организационно-методическое обеспечение разработки цифровых двойников как социально-экономических систем, обладающих свойствами целеполагания, динамичности, рефлексии и ограниченной рациональности. Прототип цифрового двойника работника основан на гибридной модели, объединяющей математические модели, обеспечивающие компьютерное моделирование физических процессов, и основанные на данных модели, включающие методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения с подкреплением и позволяющие обнаружить в данных закономерности, полезные для принятия решений. Такой цифровой двойник работника с интеллектуальным управлением совмещает оба класса моделей и связан с концепцией индивидуального человеческого капитала, т.е. совокупностью его профессиональных, интеллектуальных и социальных ресурсов, которые определяют производительность работника и его доход. Цифровой двойник включает модель оценки человеческого капитала работника и модель управления, обеспечивающую формирование индивидуальной траектории профессионального развития работника. В модели управления используются алгоритмы машинного обучения с подкреплением, формируется оптимальный режим управления и представляется набор мероприятий (управленческих решений), направленных на развитие работника с учётом изменяющихся его индивидуальных характеристик (здоровья, уровня профессиональных и иных компетенций, мотивации и др.). Практическую значимость имеют результаты внедрения цифрового двойника работника, позволяющие уменьшить влияние возможных рисков, улучшить производительность работников и эффективность предприятия в целом.

Ключевые слова: цифровой двойник работника, человеческий капитал, проектирование цифрового двойника, интеллектуальное управление, машинное обучение с подкреплением.

Цитирование: Орлова Е.В. Проектирование цифрового двойника работника предприятия. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.471-485. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-471-485.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие предприятий в современной экономике связано с технологией «цифровой двойник» (ЦД), который представляет собой виртуальный прототип реальных процессов и изделий. В нормативно-технической документации, регламентирующей процессы разработки ЦД изделий [1], не учитывается согласование задач по описанию объекта моделирования и управления. Такое согласование может быть достигнуто применением системного подхода и проектированием объекта (процесса), учитывая назначение, выполняемые функции, уровень сложности, этапы жизненного цикла (ЖЦ) и др.

ЦД технических объектов являются достаточно проработанными [2-8], а проектирование ЦД организационных, социальных систем является новой и актуальной задачей [9]. ЦД работника предприятия представляет собой цифровую модель (ЦМ), характеризующую профессиональный профиль и включает его личностные, социальные и поведенческие характеристики при выполнении рабочих задач.

Технологической компанией *Merlynn*¹ предложен обучаемый ЦД человека на основе искусственного интеллекта (ИИ), который позволяет создавать и обучать ЦД. ЦД может выполнять повторяющиеся, рутинные задачи (участие в совещаниях, ведение заметок, ответы на вопросы и др.). ЦД может обобщить все проделанные операции и представить отчёт, дополняя, а не заменяя работника. ПАО «Газпромнефть» в рамках проекта «Цифровой двойник месторождения»² тестирует сценарии, в которых виртуальные работники помогают анализировать данные и принимать решения. В ПАО «Сбер» создана платформа³, на которой работники могут обучаться через интерактивные сценарии с ИИ-ассистентами, имитирующими коллег и клиентов. АО «Навигатор»⁴ использует ЦД для оптимизации работы команд и создания персонализированных стратегий развития сотрудников. В ИТМО разработан прототип ЦД рабочего на производстве⁵, обеспечивающего в режиме реального времени сбор данных о работе персонала на производстве с целью предотвращения травм рабочих и поломок техники. Создан цифровой профиль рабочего и единицы техники на производстве. Разработанная система поддержки принятия решений (СППР) ведёт автоматический учёт рабочего времени, уведомляет рабочих о потенциально опасных зонах.

Указанные разработки не включают подробный анализ особенностей человека как объекта моделирования и управления: целеполагание; целенаправленность поведения; возможность сознательного искажения информации; динамичность; рефлексия; ограниченная рациональность. Необходим подход, в котором учитываются особенности работника, отражаются условия цифровой экономики и обеспечивается синтез эффективных управленческих решений, направленных на улучшение производительности работников и эффективности предприятия в целом.

1 Подходы и методы проектирования цифрового двойника

Можно выделить три группы подходов и методов проектирования ЦД (см. таблицу 1):

- методы моделирования ЦД, основанные на математическом моделировании физических процессов (структурные модели объекта) [10-13];
- методы моделирования ЦД, основанные на данных [14-16];
- гибридные методы [17-20].

Математическое моделирование обеспечивает отражение в модели физических свойств объекта / процесса. Построение таких моделей на практике связано с применением методов математического программирования [20], имитационного моделирования на основе разных парадигм и подходов – системно-динамического, дискретно-событийного или агентного моделирования [21]. Для создания моделей ЦД используются результаты численных расчётов, выполненных с применением междисциплинарных систем автоматизированного анализа. В зависимости от степени определённости исходной информации и учёта временного фактора, могут использоваться методы линейного, нелинейного, стохастического программирования, теоретико-игровые методы, методы нечёткой логики.

¹ *Merlynn Intelligence Corporation. Digital Twin.* <https://www.merlynn-ai.com/>.

² ПАО Газпром нефть. https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/gazprom_neft_sozdala_tsifrovoy_dvoynik_mestorozhdeniya_imeni_aleksandra_zhagrina/ (дата обращения 14.07.2025)

³ Медиа-портал для предпринимателей <https://sberbusiness.live/publications/iskusstvennii-intellekt-v-prodazhah-kak-ai-sdelal-rabotu-s-produktami-sbera-esche-udobnee> (дата обращения 14.07.2025)

⁴ АО «Навигатор». Консалтинг и разработка в сфере ИИ. <https://navigat.ru/>.

⁵ Институт искусственного интеллекта ИТМО. <https://iai.itmo.ru/>.

Таблица 1 – Характеристики подходов к моделированию цифрового двойника

Характеристика	Подход к моделированию		
	Математическое моделирование	Моделирование, основанное на данных	Гибридное моделирование
Способ описания системы	Описывает законы функционирования объекта (процесса) и его связи с внешней средой	Строится на основании эмпирических данных с применением инструментов машинного обучения	Строится на основе законов функционирования и настраивается с учётом эмпирических данных
Принцип моделирования	Модель «белого ящика», моделирование причинно-следственных связей	Модель «чёрного ящика», моделирование корреляций	Модель «серого ящика»
Направление моделирования	Сверху вниз	Снизу вверх	Сверху вниз, снизу вверх
Описание и степень определённости информации	Неопределённость информации контролируется входными данными и точностью моделирования.	Вероятностное описание информации на основе распределений данных в обучающих выборках	Детерминированное, вероятностное
Методы моделирования	Численные методы, методы исследования операций, методы имитационного и ситуационного моделирования	Статистические методы, методы экстраполяции, методы машинного обучения, методы аналитики больших данных	Междисциплинарные модели
Прогностическая способность	Прогнозирование в широких интервалах значений параметров, описываемых моделью	Трудность в предсказании редких событий, а также в условиях неполных данных и зашумлённой информации, а также за пределами обучающих выборок	Высокая прогностическая способность в пределах штатных / внештатных ситуаций
Приоритетный подход к принятию решений и управлению	Принятие решений основано на анализе совокупной производительности (эффективности) системы. Формирование управленческих решений на основе решения обратных задач	Принятие решений основано на анализе данных мониторинга, диагностики. Формирование управленческих решений на основе прогнозирования и решения прямых задач	Решение как прямых, так и обратных задач управления
Тип системы управления	Управление по отклонению, управление с адаптацией	Управление по отклонению, управление с адаптацией	Управление по отклонению с учётом слабых сигналов среды; рефлексивное управление
Этап жизненного цикла системы	Все стадии	Эксплуатация	Стадии роста, стабильности
Схема работы	Численное моделирование + датчики → сбор данных → IIoT (Industrial Internet of Things) - платформа	Датчики + IIoT-платформа → сбор данных → аналитика данных	Математическое моделирование + датчики → сбор данных → IIoT-платформа → аналитика
Инструментальные средства	Matlab Simulink, ANSYS, AnyLogic, Ithink и др.	R, Python, Statistica, GPSS и др.	Междисциплинарные платформы

Особенностью систем имитационного моделирования является возможность интеграции разрабатываемых моделей с базами и хранилищами данных, а также с внешними программными модулями. Имитационные модели можно объединять с генетическими оптимизационными алгоритмами по целевым функционалам, что даёт возможность оптимизации характеристик моделируемого объекта в режиме реального времени [22].

Моделирование, основанное на данных, включает методы интеллектуального анализа данных, ИИ, анализ больших данных и др. Модели на основе интеллектуального анализа данных применяются для обнаружения в данных ранее неизвестных практически полезных и пригодных к интерпретации знаний, необходимых для принятия решений. ИИ и машинное обучение эффективно используются в задачах прогнозирования в ЦД.

Математическое моделирование объектов (процессов) в сочетании с моделями, основанными на данных, даёт больше возможностей, чем модели, основанные только на базе машинного обучения. Моделирование, основанное на данных, как правило, ограничено этапом эксплуатации продукта. Гибридные модели могут использоваться в неповторяющихся ситуациях, когда нет достаточных данных для применения статистических методов. На базе дополнительной информации, полученной на этапе эксплуатации, повышается уровень адекватности гибридной модели, т.е. ЦД обучается и позволяет в дальнейшем прогнозировать уровень возможных отклонений от штатных условий или оценить его остаточный ресурс [19].

На этапе разработки ЦД нет полноты информации об объекте, поскольку данные о нём могут быть получены только на основе моделирования процессов, определяющих его функционирование. По мере накопления данных об объекте, они могут использоваться для построения аналитических моделей.

2 Организационно-методическое обеспечение проектирования цифрового двойника

Следуя [23] и разделяя типы поведения реальной системы на прогнозируемое желательное, прогнозируемое нежелательное, непрогнозируемое желательное и непрогнозируемое нежелательное, проектируется прототип ЦД. Он содержит необходимые компоненты для описания и создания физической версии, которая является двойником виртуальной версии. Рассматривается стадия «разработка и инжиниринг» (концептуализация и проектирование) ЖЦ системы. На стадии создания ЖЦ системы важно предвидеть её возможные состояния и разработать СППР для нейтрализации последствий нежелательных событий.

Прототип ЦД может помочь выявить и устранить непрогнозируемые нежелательные состояния. Эта задача решается на основе изменения параметров моделирования в возможном диапазоне и исследования множества поведенческих моделей системы. Такое моделирование позволит проектировать физический объект с множеством возможностей и снизить последствия непрогнозируемых нежелательных состояний. Процесс построения ЦД является многостадийным и состоит из: концептуализации, проектирования, цифрового моделирования и испытаний.

ЦД определяется как система, состоящая из ЦМ физического объекта и двусторонних информационных связей с физическим объектом или его компонентами. В основе ЦД лежит ЦМ в виде математических и компьютерных моделей, а также документов, описывающих структуру, функциональные возможности и поведение объекта на разных этапах его ЖЦ. По результатам испытаний проводится оценка соответствия ЦМ определённым требованиям. Содержание и функциональность ЦМ зависят от стадии ЖЦ физического объекта. Оценка ЦМ физического объекта включает процедуру её валидации.

Разработанная технология обеспечивает организационно-методическую поддержку процесса разработки и эксплуатации ЦД объекта (см. таблицу 2) и объединяет этапы проектирования, методы и модели. Предлагаемая технология учитывает специфику объекта – работника предприятия как сложной системы, особенностями которой являются:

- самостоятельное целеполагание и целенаправленность поведения, в результате чего может возникнуть сознательное искажение информации, невыполнение требуемых обязательств;
- рефлексия и прогнозирование поведения субъекта управления;
- ограниченная рациональность, в результате чего обеспечивается принятие решений в условиях неопределённости и ограничений на объём обрабатываемой информации.

Предложенный подход позволит: осуществлять системный анализ объекта моделирования и управления с учётом неопределённости внешней среды на базе разнородных инструментальных средств качественного и количественного анализа; сформировать адекватную

математическую модель объекта с учётом результатов этапа концептуализации; создать компьютерную модель и осуществить её испытания. Этот подход используется для построения ЦД объекта и формирования СППР.

Таблица 2 – Технология разработки цифрового двойника объекта (организационной системы)

Стадия	Этап и задача этапа	Содержание этапа	Результаты этапа
1. Концептуализация	1.1. Выявление противоречий	1.1.1. Анализ противоречий между текущим и желаемым состоянием объекта	Противоречия, проблемы
	1.2. Определение целей и выбор критериев	1.1.2. Формулировка целей развития объекта	Цели и критерии эффективности функционирования объекта
2. Проектирование	2.1. Декомпозиция объекта	2.1.1. Сбор исходной информации об объекте моделирования	Статистическая информация. Обзор литературы
		2.1.2. Статистический анализ состояния и динамики развития объекта моделирования	Основные тренды и факторы влияния
		2.1.3. Функциональная, структурная, информационная декомпозиция объекта, декомпозиция по жизненному циклу	Функциональная модель Организационная модель Информационная модель Модель жизненного цикла
	2.2. Анализ окружения объекта	2.2.1. Анализ факторов внешней и внутренней среды, оказывающих влияние на функционирование объекта	Ранжирование факторов по степени важности
		2.2.2. Определение возможных перспектив развития объекта	Прогнозные оценки результатов, сроков и мероприятий поддержки внедрения новых разработок Выбор важнейших направлений исследований
		2.2.3. Построение событийных карт	Определение возможных событий, которые могут изменить вероятный ход событий
		2.2.4. Выявление участников внутренней и внешней среды объекта и построение дорожной карты	Матрицы участников, дорожная карта для среднесрочного развития объекта
	2.3. Синтез альтернативных решений проблем (на качественном уровне)	2.3.1. Описание результатов проекта в терминах существующих сильных и слабых сторон и будущих возможностей и угроз на базе стратегического планирования	Альтернативы решения проблем
		2.3.2. Определение альтернативных путей достижения целей на основе сценарного анализа	Описание представления объекта в будущем
3. Цифровое моделирование	3.1. Выбор средств математического и компьютерного моделирования и защиты данных	3.1.1. Обоснование выбора математических методов и моделей формализации объекта	Математические методы формализации объекта
		3.1.2. Обоснование выбора программного обеспечения	Программное обеспечение
	3.2. Построение математической модели (моделирование, оценка и оптимизация)	3.2.1. Построение математической модели объекта, валидация и оценка адекватности	Математическая модель объекта
		3.2.2. Синтез оптимальных решений. Исследование устойчивости и адекватности решений	Оптимальные решения
	3.3. Построение компьютерной модели	3.3.1. Написание исходного кода программы	Первичный программный код
		3.3.2. Отладка, тестирование, верификация кода на исходных данных	Компьютерная модель объекта
	3.4. Построение системы поддержки принятия решений	3.4.1. Бесшовная интеграция блока управления в цифровую модель цифрового двойника	Система поддержки принятия решений
4. Испытания	4.1. Проведение тестовых экспериментов	4.1.1. Формирование тестовой выборки	Организация проведения эксперимента
		4.1.2. Проведение экспериментов	Количественные и качественные характеристики объекта в результате экспериментов

При рассмотрении физического объекта на стадии его ЖЦ «разработка», необходим прототип ЦД, содержащий компоненты для описания и создания физической версии объекта. На этом этапе задача состоит в том, чтобы предвидеть возможные состояния объекта и разработать СППР для нейтрализации последствий нежелательных событий.

Задача выявления и устранения нежелательных состояний решается на основе изменения параметров моделирования в возможных пределах и исследования множества различных ситуаций и разнообразных шаблонов поведения, которые могут привести к проблемам.

3 Предлагаемый подход и концептуальная схема моделирования

Концептуальная схема моделирования ЦД работника представлена на рисунке 1.

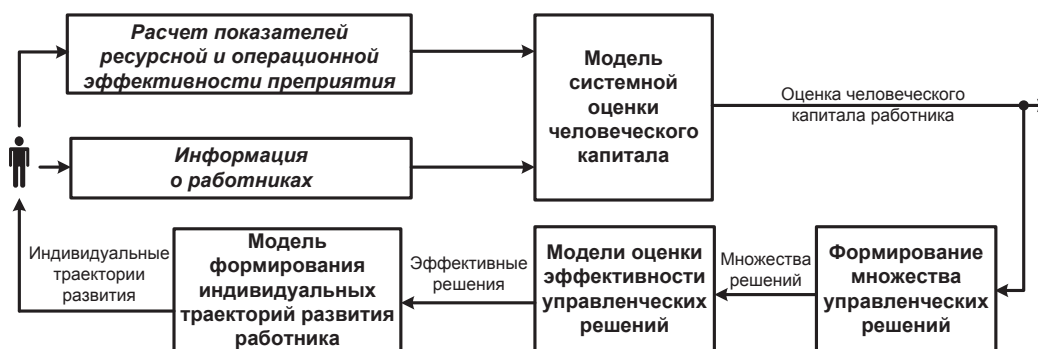


Рисунок 1 – Концептуальная схема моделирования цифрового двойника работника

Каждый работник обладает определённым человеческим капиталом (ЧК). Технология построения ЦД работника для решения задачи управления ЧК основана на модели оценки ЧК [24] и модели управления ЧК [25].

Модель оценки ЧК базируется на всестороннем учёте свойств ЧК, проявляющихся в цифровой экономике, и учитывает традиционные характеристики – возраст, образование, профессиональный опыт и компетенции, а также дополнительные характеристики – социальный капитал, уровень здоровья, надпрофессиональные компетенции, мотивацию и вовлечённость. Модель управления ЧК предназначена для формирования индивидуальных траекторий профессионального роста и развития работников (ИТР), выработка которых основана на полученной из модели оценки ЧК результатов и на использовании методов машинного обучения с подкреплением (МОП). Проектирование модели управления рассматривается как последовательное решение задачи принятия решений, которая вписывается в структуру МОП. Правила принятия решений эквивалентны политикам в МОП, а результаты управления выражаются функциями вознаграждения. Входными данными является совокупность данных о работниках: знания, умения, уровень здоровья, социальный капитал, инновационность, социально-демографические факторы и др. Выходные данные формируются в виде управленческих решений для каждого этапа (как состояния в МОП). Применение методов МОП для решения задачи управления ЧК и формирования ИТР позволяет:

- принимать наилучшее решение во времени для каждого работника в каждый момент времени с учётом его характеристик;
- улучшить долгосрочные результаты с учётом распределения во времени и отсроченного эффекта от воздействия (решения);
- проектировать функцию вознаграждения, которая является адаптивной и основывается на экспертных знаниях в данной предметной области;
- проводить оптимизацию по критериям эффективности и риска (например, для предприятия – потерять конкурентного работника, который может уйти к другому работодателю).

В основе модели управления лежит последовательность правил принятия решений для формирования действий в соответствии с текущими показателями деятельности работника и предшествующими воздействиями на него. Политика разработки ИТР может использоваться для выбора эффективных инструментов управления ЧК на предприятии. Эта политика представляет собой набор правил для определения мероприятий и программ в зависимости от ха-

рактических работников, а также показателей эффективности воздействия выполненных программ. Оптимальный режим воздействия (управления), как последовательный набор программ, позволяет максимизировать средний ожидаемый доход за весь период реализации программ (управленческих решений).

Объектом управления является ЧК работников предприятия, оценка которого по отдельным работникам основана на методике [24], в которой каждый работник имеет определённую численную оценку его ЧК. Оценка производится по пяти группам показателей (блокам оценки): уровень здоровья, основные компетенции, надпрофессиональные компетенции, мотивация, вовлечённость; а также по поведенческим навыкам и социальному капиталу. В зависимости от итогового значения ЧК работник попадает в одну из пяти групп по каждому блоку оценки (каждый блок имеет пять градаций своих значений).

Оценка ЧК является основанием для формирования управленческих решений, направленных на развитие потенциала работников и качества ЧК. Управленческие решения носят персональный характер, зависят от существующего уровня ЧК, реализованы на основе динамического режима и формируют ИТР. Разработан перечень решений по каждому блоку оценки ЧК в зависимости от балла, набранного работником. ИТР определяется композицией управленческих решений из каждого блока.

Модель формирования ИТР работников основана на МОП, в ходе которого субъект управления (агент) обучается, взаимодействуя с объектом управления (средой). МОП реализует цикл управления с обратной связью (см. рисунок 2), где агент и среда обмениваются сигналами, при этом агент стремится максимизировать целевую функцию. Обе стороны взаимодействуют непрерывно: агент выбирает действия, а среда реагирует на эти действия и предлагает агенту новые ситуации. Среда генерирует вознаграждения – числовые значения, которые агент стремится максимизировать посредством выбора действий.



Рисунок 2 – Цикл управления в модели на основе МОП

Среда задаётся как марковский процесс принятия решений (MDP) [26]: $M = \{S, A, P, R, \gamma\}$, где S – пространство состояний, в котором определены состояния среды (работников предприятия) $s_t \in S$; A – пространство действий, в котором определены действия агента (центра принятия решений предприятия) $a_t \in A$; P – переходные вероятности MDP, на каждом временном шаге t следующее состояние s_{t+1} берётся из распределения вероятностей $P: p(s_{t+1}|s_t, a_t) \in P$; R – функция вознаграждения, на каждом временном шаге t агент получает награду, зависящую от действия a_t , реализованного для состояния s_t и нового состояния s_{t+1} : $r_t(s_t, a_t, s_{t+1}) \in R$; γ – коэффициент дисконтирования, используемый для суммирования наград, $\gamma \in [0, 1]$. Далее равнозначно используются обозначения для состояний $s_t = s$, $s_{t+1} = s'$, для действий $a_t = a$ и наград $r_t = r$.

Сеть MDP состоит из множества вершин, соответствующих разным уровням качества ЧК. Состояния заданы в пятимерном пространстве по количеству показателей оценки ЧК. Изменение состояния происходит под действием 25 различных решений (по пять решений для каждого из пяти показателей оценки качества ЧК). Введено предположение, что для каждого работника в единицу времени возможна реализация решения (действия) из одного блока $\{A1, A2, A3, A4, A5\} \in A$. Поэтому движение работника по его траектории при реализации определённого решения возможно на один уровень вперёд по определённому показателю (т.е. значение этого показателя ЧК растёт), назад по этому показателю (т.е. значение этого показателя снижается), неизменность показателя ЧК. Если в результате реализации дей-

ствия a_t у работника увеличивается показатель ЧК, на улучшение которого направлено это действие, то агенту предоставляется награда $r_t(a_t)$. В каждом блоке показателей оценки ЧК для каждого из пяти уровней интегрального показателя в блоке имеется определённое управленческое решение по наращиванию уровня ЧК.

Взаимодействие со средой длится в течение T шагов. Процесс делится на эпизоды, в конце каждого из них среда переводится в начальное состояние, и взаимодействие начинается снова. Вознаграждения рассматриваются как компоненты аддитивного разложения функции полезности. В задаче с бесконечным горизонтом количество решений не ограничено и вводится коэффициент дисконтирования $\gamma \in [0,1]$. Полезность (доход) определяется выражением

$\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t$, которое характеризует дисконтированную сумму вознаграждения, а коэффициент дисконтирования определяет известный подход: вознаграждение в настоящий момент стоит больше, чем вознаграждение в будущем.

Отдача $R(\tau)$ из эпизода $\tau = (s_0, a_0, r_0), \dots, (s_T, a_T, r_T)$ имеет вид: $R(\tau) = \sum_{t=0}^T \gamma^t r_t$. Тогда целевая функция агента $J(\tau)$ представляется как математическое ожидание отдачи по нескольким траекториям: $J(\tau) = E_{\tau}[R(\tau)] = E_{\tau}\left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t\right]$, где $R(\tau)$ - отдача как сумма дисконтированных вознаграждений за временные шаги $t=0, \dots, T$, целевая функция $J(\tau)$ - это отдача, усреднённая по нескольким эпизодам (повторным прогонам). Задача формирования оптимальной ИТР рассматривается как стационарный MDP, в котором вероятностная модель перехода из состояния в состояние при определённом действии и вероятностная модель вознаграждений не изменяются со временем.

Функция ценности $Q^{\pi}(s, a)$ действия a в состоянии s при стратегии π определяет ожидаемый доход, когда агент начинает работу из состояния s , предпринимает действие a и затем следует стратегии π : $Q^{\pi}(s, a) = E_{t_0=s, a_0=a, \tau \approx \pi}\left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t\right]$. Оптимальную стратегию можно найти, используя метод динамического программирования [27].

Уравнения оптимальности Беллмана для $Q^{\pi}(s, a)$ имеют вид: $Q^*(s, a) = E\left[R_{t+1} + \gamma \max_{\pi} Q^*(s_{t+1}, a) \middle| s_t = s, a_t = a\right] = \max_{\pi} \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma Q^*(s', a)]$. Уравнения Беллмана представляют собой систему уравнений, записанных по одному для каждого состояния. Если имеется n состояний и n неизвестных, то система имеет единственное решение.

Целью МОП является поиск стратегии π^* , которая максимизирует математическое ожидание суммарного ожидаемого дохода (т.е. достигается максимальная ожидаемая полезность, что согласуется с принципом принятия решения рациональным агентом при неполной информации о среде) для всех состояний s : $\pi^*(s) = \max_{\pi} Q^*(s, a)$. Алгоритм МОП представляет собой последовательность процедур, соответствующих изменению состояния системы. Стратегия построения ИТР, разработанная на основе МОП, изменяться с течением времени по мере накопления наблюдений от работников. Для этого используется алгоритм, основанный на оценках полезности, с помощью которого агент настраивает функцию ценности $Q^{\pi}(s, a)$ действия a в состоянии s при стратегии π (Q -функцию). Настроенная функция ценности используется для оценки пар (s, a) и порождения стратегии агента, а обучение на основе алгоритма МОП называется Q -обучением. Для решения задачи обучения агента тестируются ал-

горитмы, основанные на ценности (на глубоких Q -сетях – DQN и $SARSA$, двойных глубоких Q -сетях – $DDQN$), и комбинированные алгоритмы (PRO) [28, 29].

4 Результаты моделирования

Моделирование выполнено в программе *Matlab2021b*⁶ и включает три процесса: создание агента Q -обучения; обучение агента; тестирование. Обучение нейросети проводится в 200 эпизодов, каждый из которых включает 50 испытаний (шагов). Эксперименты проведены на данных крупного нефтеперерабатывающего предприятия. Имеются данные об оценке ЧК по пяти показателям и производительности труда работников. Обобщённые значения количественных показателей работников по выборке представлены в таблице 3. Сформирован комплекс управленческих решений по воздействию на элементы ЧК.

Таблица 3 – Статистические характеристики показателей в экспериментальной выборке из 70 работников

Показатель	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение
Возраст работников, лет	41	5
Уровень здоровья, баллы. Максимально возможный балл 1000	564	61
Уровень профессиональных компетенций, баллы. Максимально возможный балл 1000	625	43
Уровень надпрофессиональных компетенций, баллы. Максимально возможный балл 1000	469	34
Уровень мотивации и вовлечённости, баллы. Максимально возможный балл 1000	692	51
Уровень социального капитала. Максимально возможный балл 1000	721	20
Индивидуальная производительность труда, руб./(чел. x час)	543	62

Рассматриваются два показателя, формирующих ЧК, – уровень здоровья работника и уровень его профессиональных компетенций. Принято, что каждый из приведённых показателей имеет пять уровней. Задача решается на двумерной сетке 5×5 , где по строкам отражаются уровни здоровья работника (показатель 1), по столбцам – уровни компетенций (показатель 2), а нумерация ячеек в сетке строится от верхнего левого угла сетки (см. рисунок 3).

По результатам оценки ЧК, выполненной по методике [25], каждый работник получает по каждому из показателей балл от 1 до 1000, попадает в одну из пяти групп по каждому из показателей и на сетке представляется в виде кружка.

На рисунке 3 в качестве примера представлены результаты оценки работника, отмеченные в ячейке (3,2), – это начальное состояние его ЧК. При определении цели, т.е. уровня потенциально возможного ЧК для конкретного работника, учитывается ряд ограничений, связанных с его особенностями. На рисунке показана область ограничений в виде ячеек, залитых чёрным цветом. Показано, что для этого работника существует возможность движения в сторону улучшения ЧК – цели, ячейка (5,5). Если для работника с учётом его текущего уровня образования и характеристик здоровья невозможно достичь максимально уровня (ячейка 5,5), то для него определяется другая цель. По совокупности факторов здоровья этому работ-

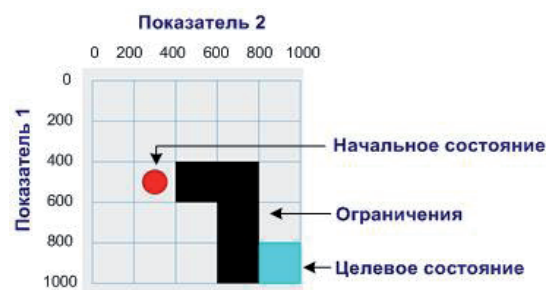


Рисунок 3 – Представление задачи в виде сетки 5×5

⁶ <https://www.mathworks.com/>.

нику не удастся добиться повышения уровня профессионализма в данной области (с учётом низких значений уровня здоровья). Т.е. условия профессии таковы, что достижение уровней 3 и 4 профессионального развития невозможно для работника с низкими показателя здоровья, ячейки (3,3), (3,4). При высоких показателях уровня здоровья работника ему доступен переход на высший уровень компетентности, т.е. быстрый переход на уровень 5 по показателю 2, ячейки (4,5), (5,5).

Работник представлен как среда, в которой заданы ограничения достижимости цели, начальное и конечное состояния, функции переходов состояний, награды за переходы. Возможны переходы вправо и вниз, что соответствует перемещению работника на следующий уровень показателя при выполнении управленческих решений в соответствующей группе. Действия дискретны и отражают одно из управленческих решений, предназначенных для данной категории работников. Под решением понимается осуществление определённого мероприятия (например, повышение квалификации, обеспечение занятия спортом и др.), направленного на рост ЧК. Возможно реализовать 24 различных решения при движении работника из ячейки (1,1) в ячейку (5,5). Каждый противоположный цели шаг имеет штраф -1 балл, достижение цели имеет награду 3, переход через область ограничений, например, перемещение из (4,3) в (4,5), награждается в размере 1 балл. Цель алгоритма – научить агента формировать последовательность управленческих решений, обеспечивающих за минимальное время достижение максимальной награды. Проведена серия обучающих экспериментов для ряда работников с разными характеристиками ЧК. Для обучения агента использовались алгоритмы *DQN*, *DDQN*, *SARSA* и *PRO* [20]. Результаты экспериментов в виде изменения средней награды по эпизодам представлены на рисунке 4.

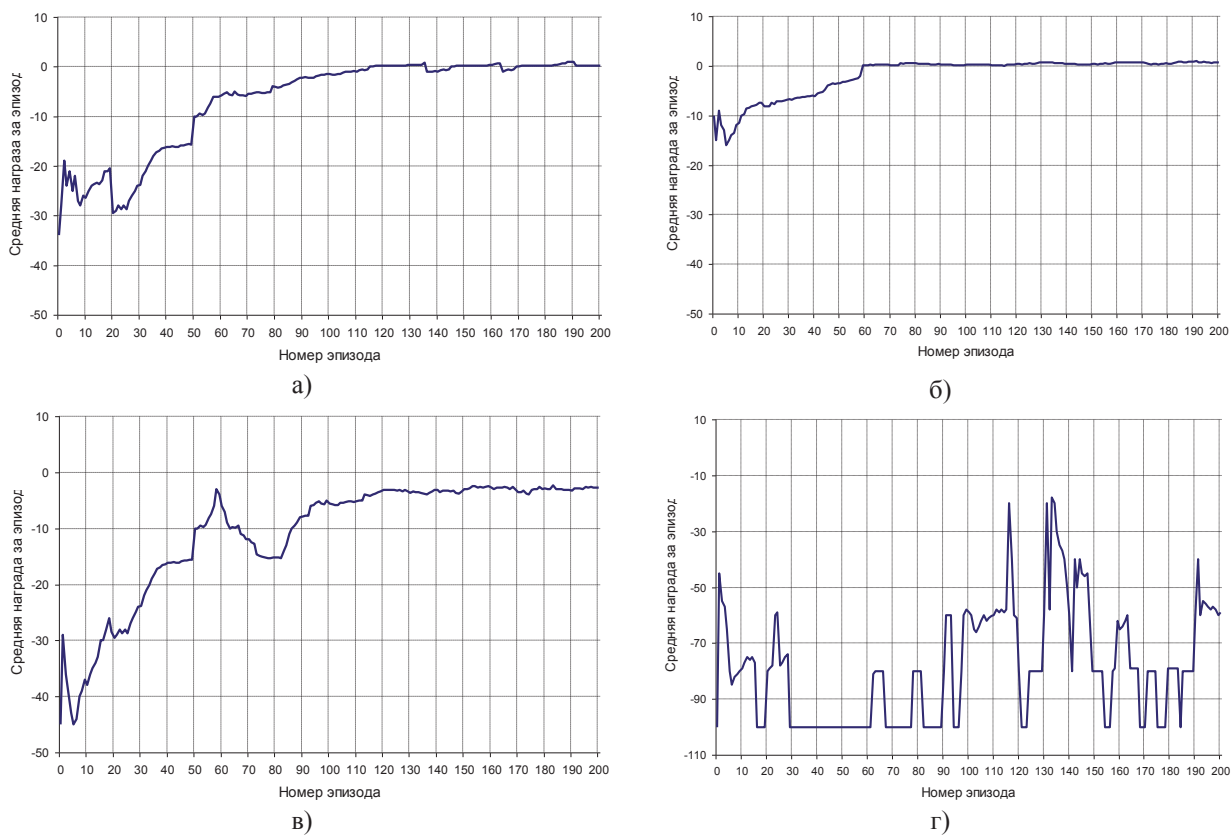


Рисунок 4 – Результаты обучения агента, коэффициент дисконтирования $\gamma = 0.99$, вероятность случайного действия $\varepsilon = 0.04$: а) эксперимент 1 – обучение на основе алгоритма *DQN*; б) эксперимент 2 – обучение на основе алгоритма *DDQN*; в) эксперимент 3 – обучение на основе алгоритма *SARSA*; г) эксперимент 4 – обучение на основе алгоритма *PRO*

Алгоритмы оценивались по двум критериям – эффективность политики (средняя награда) и эффективность обучения агента (скорость сходимости). Значения средних наград рассчитаны за каждый из 200 эпизодов моделирования, осреднённых по 50 испытаниям. Наилучший результат показал алгоритм *DDQN*, обеспечивающий сравнительно быстрое обучение и положительную награду, таблица 4. Поэтому выработка ИТР в дальнейшем основывалась на *DDQN*-алгоритме.

Таблица 4 – Результаты оценки эффективности политик и эффективности обучения

Алгоритм	Эффективность политики - средняя награда	Эффективность обучения - скорость сходимости (число эпизодов)
<i>DQN</i>	-0.15	0.27 (53)
<i>DDQN</i>	0.2	0.29 (58)
<i>SARSA</i>	-3.1	0.59 (117)
<i>PRO</i>	-52	-

На основе модельных экспериментов для каждого работника с учётом начального и конечного (целевого) состояний сформированы оптимальные стратегии в виде ИТР. Они отражают последовательность принятия управленческих решений, обеспечивающих рост уровня ЧК. На рисунке 5 по мере продвижения по сформированной траектории текущее состояние всё более затемняется.

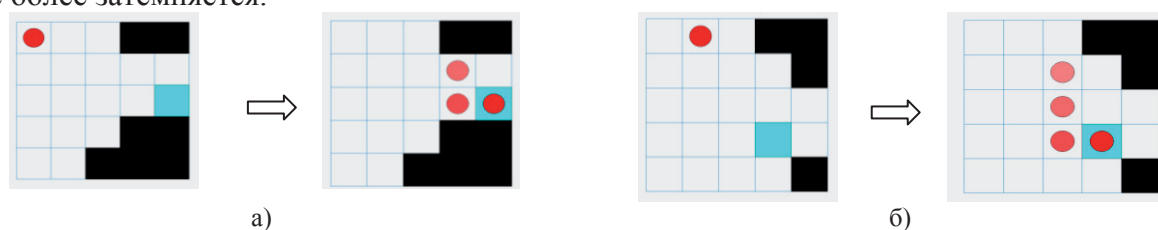


Рисунок 5 – Оптимальные политики (ИТР): а) эксперимент 1, начальное состояние (1,1), целевое состояние (3,5); б) эксперимент 2, начальное состояние (1,2), целевое состояние (4,4)

Результаты моделирования показывают, что для первого работника (эксперимент 1) для достижения целевого состояния наилучшими решениями будет следующая последовательность действий. Сначала необходимо провести программные мероприятия, направленные на улучшение здоровья работника до второго уровня, затем осуществлять программы по обеспечению роста профессиональных компетенций до уровня 4, после этого применить меры по оздоровлению, и вновь обеспечить улучшение профессиональных компетенций. Для второго работника (эксперимент 2) траектория развития следующая: выполнение программы, обеспечивающей рост профессионализма до уровня 3; проведение пошаговых мероприятий по улучшению здоровья до уровня 4; применение мер по росту компетентности. Осуществление сформированных ИТР позволит повысить уровень ЧК, обеспечит рост эффективности труда работников.

Заключение

Рассмотрены подходы, методы проектирования и модели ЦД организационных систем. Предложена технология разработки ЦД работников предприятия, основанная на гибридной модели объекта и включающая: модели структурного (математического) и компьютерного моделирования физических процессов; модели, основанные на данных, позволяющие обнаружить полезные и доступные для интерпретации знания, необходимые для принятия решений. ЦД работника с интеллектуальным управлением совмещает оба класса моделей, усиливая преимущества каждого из них.

В ЦД учёт неопределённости на этапе описания ЧК и в процессе его развития достигается за счёт использования разных типов данных, вариативности математических инструментов и итеративных процедур валидации и верификации моделей.

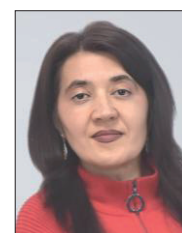
Список источников

- [1] ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.
- [2] **Malik A.A., Masood T., Bilberg A.** Virtual reality in manufacturing: Immersive and collaborative artificial-reality in design of human-robot workspace. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2019. Vol.33. 16 p. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1690685.
- [3] **Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.** Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*. 2019. Vol.5. P.653-661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
- [4] **Fonseca Í., Gaspar H., Mello P., Sasaki H.** A Standards-Based Digital Twin of an Experiment with a Scale Model Ship. *Computer Aided Design*. 2022. Vol.145(5). 103191. DOI: 10.1016/j.cad.2021.103191.
- [5] **Patterson E., Diamantakos I., Dvurecenska K., Greene R., Hack E., Labeas G., Lomnitz M., Siebert T.** Validation of a structural model of an aircraft cockpit panel: An industrial case study. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2021. 030932472110590. DOI: 10.1177/03093247211059084.
- [6] **Dembski F., Wössner U., Letzgus M., Ruddat M., Yamu C.** Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*. 2020. Vol.12. 17 p. DOI: 10.3390/su12062307.
- [7] **Марьясин О.Ю.** Разработка онтологий для цифрового двойника зданий. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9. №4 (34). С.480-495. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.
- [8] **Массель Л.В., Ворожцова Т.Н.** Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10. №3(37). С.327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [9] **Сойфер В.А.** Human fActor. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11. №1(39). С.8-19. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-8-19.
- [10] **Прохоров А., Лысачев М., Боровков А.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
- [11] **Петров А.В.** Имитационное моделирование как основа технологии цифровых двойников. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т.22. №10. С.56-66.
- [12] **Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A.** Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol.58. P.3-21. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- [13] **Erikstad S.O.** Merging Physics, Big Data Analytics and Simulation for the Next-Generation Digital Twins. *HIPER 2017, High-Performance Marine Vehicles*, Zevenwacht, South-Africa, 11-13 September 2017. 138-149 p.
- [14] **Martínez-García, A.N.** Artificial intelligence for sustainable complex socio-technical-economic ecosystems. *Computation*. 2022. Vol.10(6). DOI:10.3390/computation10060095.
- [15] **Kim D., Jo D.** Effects on Co-Presence of a Virtual Human: A Comparison of Display and Interaction Types. *Electronics*. 2022. Vol.11(3):367. DOI:10.3390/electronics11030367.
- [16] **Orlova E.V.** Innovation in Company Labor Productivity Management: Data Science Methods Application. *Applied System Innovation*. 2021. Vol.4. №3: 68. DOI: 10.3390/asi4030068.
- [17] **Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y.** Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 2020. Vol.114: 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
- [18] **Banerjee P.** AI and ML: The Brave New World of Simulation, 2021. <https://fluidcodes.com/news/ai-and-ml-the-brave-new-world-of-simulation/>.
- [19] **Radanliev P., De Roure D., Nicolescu R., Huth M., Santos O.** Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2022. Vol.6. No.1. P.171-185. DOI: 10.1007/s41315-021-00180-5
- [20] **Orlova E.V.** Design Technology and AI-Based Decision Making Model for Digital Twin Engineering. *Future Internet*. 2022. Vol.14. No.9:248. DOI: 10.3390/fi14090248.
- [21] **Орлова Е.В.** Методы и модели анализа данных и машинного обучения в задаче управления производительностью труда. *Программная инженерия*. 2020. № 4. С.219-229. DOI: 10.17587/prin.11.219-229.
- [22] **Рудской А.И.** Цифровая промышленность на основе цифровых двойников. *Приборы*. 2021. Т.249. №3. С.9-16.
- [23] **Grieves M., Vickers J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: *Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Editors. 2017, Springer: Switzerland. P.85-114.

- [24] **Орлова Е.В.** Оценка человеческого капитала предприятия и управление им в условиях цифровой трансформации экономики. *Journal of Applied Economic Research*. 2021. Т.20. №4. С.666–700. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.4.026.
- [25] **Orlova E.V.** Design of Personal Trajectories for Employees' Professional Development in the Knowledge Society under Industry 5.0. *Social Sciences*. 2021. Vol.10. №11: 427. DOI: 10.3390/socsci10110427.
- [26] **Markov A.A.** The Theory of Algorithms. *Journal of Symbolic Logic*. 1953. Vol.18. №4. 340–341 с.
- [27] **Bellman R.** A Markovian decision process. *Journal of Mathematics and Mechanics*. 1957. Vol.6. №4. P.679–684.
- [28] **Orlova E.V.** Dynamic regimes for corporate human capital development used reinforcement learning methods. *Mathematics*. 2023. Vol.11. №18: 3916. DOI: 10.3390/math11183916.
- [29] **Ding Q., Jahanshahi H., Wang Y., Bekiros S., Allassafi M.O.** Optimal reinforcement learning-based control algorithm for a class of nonlinear macroeconomic systems. *Mathematics*. 2022. Vol.10: 499. DOI: 10.3390/math10030499.

Сведения об авторе

Орлова Екатерина Владимировна, 1977 г. рождения. Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет в 1999 г., д.т.н. (2018). Профессор кафедры экономики предпринимательства УУНиТ. В списке научных трудов более 310 работ в области моделирования и управления организационными системами, машинного обучения и искусственного интеллекта в задачах организационного управления, разработки систем поддержки принятия решений в экономической и финансовой сфере. Author ID (РИНЦ): 117620; Author ID (Scopus): 57192170106; Researcher ID (WoS): E-8829-2014; ORCID: 0000-0001-6535-6727. ekorl@mail.ru.



Поступила в редакцию 27.07.2025, после рецензирования 18.08.2025. Принята к публикации 15.09.2025.



Scientific article

DOI: DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-4-471-485

Designing a digital twin of an employee

© 2025, E.V. Orlova

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract

The development of a digital twin of an employee aims to reduce risks such as unpredictable or undesirable behavior, burnout, declining engagement in work processes, lower productivity, and the emergence of destructive conflicts. The paper outlines approaches to designing digital twins and proposes organizational and methodological support for their development as socio-economic systems characterized by goal-setting, dynamism, reflection, and bounded rationality. The prototype of an employee's digital twin is based on a hybrid model that integrates mathematical models, which enable computer simulation of physical processes, with data-driven models incorporating data mining and reinforcement learning methods to identify patterns in data that are useful for decision-making. Such intelligently managed digital twin merges these two classes of models and is closely tied to the concept of individual human capital, understood as the sum of professional, intellectual, and social resources that define a worker's productivity and income. The digital twin incorporates both a human capital assessment model and a management model that supports the creation of personalized professional development trajectories. The management model applies reinforcement learning algorithms to generate an optimal management regime, consisting of measures and decisions aimed at employee development while accounting for dynamic personal characteristics such as health, professional and other competencies, and motivation. The implementation of an employee's digital twin has practical significance, as it helps to mitigate potential risks, enhance employee productivity, and improve the overall efficiency of the enterprise.

Keywords: *employee digital twin, human capital, digital twin design, intelligent management, reinforcement learning.*

For citation: Orlova E.V. Designing a digital twin of an employee [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 471-485. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-471-485.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Conceptual framework for modeling an employee's digital twin

Figure 2 – Control cycle in a reinforcement learning-based model

Figure 3 – Representation of the problem in the form of a 5*5 grid

Figure 4 – Agent training results, discount factor, probability of a random action: a) experiment 1 – training based on the DQN algorithm; b) experiment 2 – training based on the DDQN algorithm; c) experiment 3 – training based on the SARSA algorithm; d) experiment 4 – training based on the PRO algorithm

Figure 5 – Optimal policies: a) experiment 1, initial state (1.1), target state (3.5); b) experiment 2, initial state (1.2), target state (4.4)

Table 1 – Characteristics of approaches to digital twin modeling

Table 2 – Technology for developing a digital twin of an object

Table 3 – Statistical characteristics of quantitative indicators in a sample of 70 employees

Table 4 – Results of evaluating the effectiveness of policies and training efficiency

References

- [1] GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions. [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 15 p.
- [2] **Malik AA, Masood T, Bilberg A.** Virtual reality in manufacturing: Immersive and collaborative artificial-reality in design of human-robot workspace. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2019; 33. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1690685.
- [3] **Tao F, Qi Q, Wang L, Nee A.** Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*. 2019; 5: 653-661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
- [4] **Fonseca Í, Gaspar H, Mello P, Sasaki H.** A Standards-Based Digital Twin of an Experiment with a Scale Model Ship. *Computer-Aided Design*. 2022; 145: 103191. DOI: 10.1016/j.cad.2021.103191.
- [5] **Patterson E, Diamantakos I, Dvurecenska K, Greene R, Hack E, Labeas G, Lomnitz M, Siebert T.** Validation of a structural model of an aircraft cockpit panel: an industrial case study. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2021. 030932472110590. DOI: 10.1177/03093247211059084.
- [6] **Dembski F, Wössner U, Letzgus M, Ruddat M, Yamu C.** Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*. 2020; 12: 1-17. DOI: 10.3390/su12062307.
- [7] **Maryasin OYu.** Design of ontologies for a digital twin of buildings. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 480-495. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.
- [8] **Massel LV, Vorozhtsova TN.** Ontological approach to the construction of digital twins of energy objects and systems. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(3): 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [9] **Soyfer VA.** Human fActor. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(1): 8-19. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-8-19.
- [10] **Prokhorov A, Lysachev M, Borovkov A.** Digital twin. Analysis, trends, world experience. [In Russian]. Moscow: OOO "AlliancePrint", 2020. 401 p.
- [11] **Petrov AV.** Simulation modeling as a basis for digital twin technology. [In Russian]. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(10): 56-66.
- [12] **Qi Q, Tao F, Hu T, Anwer N, Liu A, Wei Y, Wang L, Nee A.** Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021; 58: 3-21. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- [13] **Erikstad SO.** Merging Physics, Big Data Analytics and Simulation for the Next-Generation Digital Twins. HIPER 2017, *High-Performance Marine Vehicles*, Zevenwacht, South-Africa, 11-13 September 2017. 138-149 p.
- [14] **Martínez-García AN.** Artificial Intelligence for Sustainable Complex Socio-Technical-Economic Ecosystems. *Computation* 2022; 10. DOI:10.3390/computation10060095.
- [15] **Kim D, Jo D.** Effects on Co-Presence of a Virtual Human: A Comparison of Display and Inter-action Types. *Electronics*. 2022; 11. DOI:10.3390/electronics11030367.
- [16] **Orlova E.V.** Innovation in Company Labor Productivity Management: Data Science Methods Application. *Applied Systems Innovation*. 2021; 4(3): 68. DOI: 10.3390/asi4030068.

- [17] **Boje C, Guerriero A, Kubicki S, Rezgui Y.** Towards a semantic construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 2020; 114: 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179
- [18] **Banerjee P.** AI and ML: The Brave New World of Simulation, 2021. <https://fluidcodes.com/news/ai-and-ml-the-brave-new-world-of-simulation/>.
- [19] **Radanliev P, De Roure D, Nicolescu R, Huth M, Santos O.** Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2022; 6(1): 171-185. DOI: 10.1007/s41315-021-00180-5.
- [20] **Orlova EV.** Design Technology and AI-Based Decision Making Model for Digital Twin Engineering. *Future Internet*. 2022; 14(9): 248. DOI: 10.3390/fi14090248.
- [21] **Orlova EV.** Methods and models of data analysis and machine learning in the task of labor productivity management. [In Russian]. *Software Engineering*. 2020; 4: 219-229. DOI: 10.17587/prin.11.219-229.
- [22] **Rudskoy AI.** Digital industry based on digital twins. *Devices*. 2021; 249(3): 9-16.
- [23] **Grieves M, Vickers J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: *Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Editors. 2017, Springer: Switzerland. P.85-114.
- [24] **Orlova EV.** Assessment of enterprise human capital and its management in the context of digital transformation of the economy. [In Russian]. *Journal of Applied Economic Research*. 2021. Vol. 20. No. 4. P. 666–700. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.4.026.
- [25] **Orlova EV.** Design of Personal Trajectories for Employees' Professional Development in the Knowledge Society under Industry 5.0. *Social Sciences*. 2021; 10(11): 427. DOI: 10.3390/socsci10110427.
- [26] **Markov AA.** The Theory of Algorithms. *Journal of Symbolic Logic*. 1953; 18(4): 340-341.
- [27] **Bellman R.** A Markovian decision process. *Journal of Mathematics and Mechanics*. 1957; 6(4): 679–684.
- [28] **Orlova EV.** Dynamic Regimes for Corporate Human Capital Development Used Reinforcement Learning Methods. *Mathematics*. 2023; 11(18): 3916. DOI: 10.3390/math11183916.
- [29] **Ding Q, Jahanshahi H, Wang Y, Bekiros S, Alassafi MO.** Optimal reinforcement learning-based control algorithm for a class of nonlinear macroeconomic systems. *Mathematics*. 2022; 10: 499. DOI: 10.3390/math10030499.

About the author

Ekaterina Vladimirovna Orlova (b. 1977) graduated from Ufa State Aviation Technical University (Ufa, Russia) in 1999, D.Sc.Eng. (2018). She is a professor at the Department of Entrepreneurship Economics, Ufa University of Science and Technology. She is the author and a co-author of more than 310 scientific articles and abstracts in the field of modeling and management in organizational systems, machine learning and artificial intelligence in organizational management, and development of decision support systems in economics and finance. Author ID (RSCI): 117620; Author ID (Scopus): 57192170106; Researcher ID (WoS): E-8829-2014; ORCID: 0000-0001-6535-6727. ekorl@mail.ru.

Received July 27, 2025. Revised August 18, 2025. Accepted September 15, 2025.

Примечание редакции

Публикуемая статья призвана стимулировать исследования в области построения модели самой важной и самой сложной онтологической сущности, каковым является актор — действующее лицо в любой созидательной деятельности. Различные публикации в информационных⁷ и кадровых^{8,9} агентствах о цифровых двойниках работников подогревают интерес к этой теме, в то время как научное обоснование и методическое обеспечение построения моделей таких двойников пока имеют скромные результаты и лишь в узких областях¹⁰.

Ждём откликов на заданную тему, а главное – новых идей и результатов!

⁷ В России создали цифрового двойника рабочего на производстве. ТАСС. 28 апр 2024. <https://nauka.tass.ru/nauka/20675489>.

⁸ **Насибуллина Я.** Создание цифровых двойников сотрудников: реальность или фантастика? *Кадровое агентство TECH-RECRUITER*. 6 мая 2025. <https://tech-recruiter.ru/blog/sozdanie-cifrovyyh-dvoynikov-sotrudnikov-realnost-ili-fantastika>.

⁹ **Макарова Е.** Цифровые двойники сотрудников: зачем они компаниям в России? *TenChat*. Май 2025.

<https://tenchat.ru/media/3366772-tsifrovyye-dvoyniki-sotrudnikov-zachem-oni-kompaniyam-v-rossii-2025>.

¹⁰ **Баранов Л.И.** и др. Цифровой двойник работника объекта использования атомной энергии на этапе предсменного контроля. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2024. Т.69. №1. С.33-40.



Онтологические аспекты стандартизации

© 2025, Д.В. Купцова¹✉, А.Я. Дмитриев^{1,2}, И.С. Новиков^{3,4}

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

² Академия проблем качества Российской Федерации, Москва, Россия

³ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ), Москва, Россия

⁴ Высшая школа управления и инноваций Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ВШУИ МГУ), Москва, Россия

Аннотация

В статье исследуется диалектическая природа стандартизации, сочетающая функции закрепления опыта и стимулятора развития. Рассматривается эволюция стандартов от древних традиций до современных цифровых технологий, отмечается концептуальная близость стандартизации с онтологическим подходом и менеджментом знаний. Предложена обобщённая семантическая схема стандартизации на основании терминов, установленных в основополагающих межгосударственном и национальном стандартах. Онтологическое моделирование системы стандартизации двухуровневой структуры (уровень мета-онтологии и уровень предметных онтологий) обеспечивает гибкость и адаптивность в условиях технологических изменений. Отмечается необходимость адаптации стандартизации к вызовам цифровой эпохи, включая разработку гибких онтологических моделей, способных интегрировать новые технологии. Стандартизация рассматривается как инструмент для создания конкурентоспособных наукоёмких систем, сочетающий стабильность базовых принципов с восприимчивостью к технологическим трендам. Новизна заключается в предложенной онтологической модели системы стандартизации, учитывающей обозначенные в статье функции стандартизации в создании технических систем. Эта модель может быть использована как базовая для формирования систем стандартизации в отдельно взятых наукоёмких отраслях промышленности.

Ключевые слова: стандартизация, наукоёмкая техника, техническая система, онтология, умный стандарт, менеджмент знаний, база знаний.

Цитирование: Купцова Д.В., Дмитриев А.Я., Новиков И.С. Онтологические аспекты стандартизации. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.486-496. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-4-486-496.

Вклад авторов: Купцова Д.В. – разработка концепции статьи, схем и моделей; Дмитриев А.Я. – идеи и методические основы исследования, подбор источников; Новиков И.С. – разработка концепции исследования, формулирование функций стандартизации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современная наукоёмкая техника характеризуется конструктивной и технологической сложностью, необходимостью учёта многоступенчатой иерархии взаимосвязанных требований, а в процессы её жизненного цикла (ЖЦ) вовлечена многоуровневая кооперация предприятий [1]. Особую значимость приобретает системный подход к организации, планированию и управлению процессами ЖЦ технических систем (ТС). Одним из инструментов применения системного подхода является стандартизация, обеспечивающая упорядоченность (в т.ч. систематизацию и классификацию), комплексность, преемственность, трансдисциплинарность, что создаёт основу для повышения качества и инновационного потенциала сложных ТС. Процессы ЖЦ наукоёмкой техники сопровождаются активным использованием об-

ширной информационной базы, а управление знаниями становится важным фактором осуществления наукоёмких технических проектов. Менеджмент знаний (МЗ) рассматривается как ключевой подход к управлению сложными системами [2]. В основе концепции МЗ лежит проектирование и разработка онтологий. Система стандартизации по своей функции близка к базе знаний (БЗ), и онтологический подход используется в стандартизации [3]. Потенциал стандартизации, как структурированной БЗ, заключается в систематизации, сохранении и передаче проверенных решений, что особенно актуально в условиях роста сложности ТС. В контексте МЗ стандартизация способствует генерации новых знаний [4].

Цель настоящей работы – исследование роли стандартизации в повышении качества и инновационного потенциала при создании сложных ТС за счёт интеграции методологий стандартизации с МЗ и построение онтологической модели системы стандартизации, учитывающей возрастающую сложность ТС и обеспечивающей управление информацией в их ЖЦ.

В задачи исследования входят:

- анализ диалектической природы понятия стандарта и рассмотрение стандартизации в контексте эволюции техники;
- исследование роли стандартизации в ЖЦ сложных наукоёмких ТС;
- разработка варианта онтологической модели системы стандартизации.

1 Стандарт: определения и диалектика

Стандарт (от английского *standard*) — типовой образец, которому должно удовлетворять изделие по размерам, форме и качеству [5]. Современные толкования слова «стандарт» раскрывают его научно-техническое содержание: «Стандарт... — образец, эталон, модель, принимаемые за исходные для сопоставления с ними др. объектов; нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации и утверждённый компетентным органом; стандарт может быть разработан на материально-технические предметы (...), нормы, правила, требования организационно-методического и общетехнического характера; стандарт распространяется на все сферы человеческой деятельности: науку, технику, ..., транспорт и т.д.» [6]. Действующая система стандартизации ориентируется на гармонизацию с международными нормами и практиками¹. В стандарте межгосударственного уровня закреплено следующее определение: «Стандарт: нормативный документ, который разработан на основе консенсуса, принят признанным на соответствующем уровне органом и устанавливает для всеобщего и многократного использования правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов, и который направлен на достижение оптимальной степени упорядочения в определённой области» [7].

Государственная система стандартизации в начале XX века формировалась из необходимости рационализации производств за счёт внедрения параметрических рядов однотипных изделий и установления единой системы мер и весов и обеспечивала упорядоченность, направленную на экономическую эффективность и быстрое освоение производств. Стандарт выполнял функцию закрепления наилучших достигнутых практик и фиксировал освоенные технические и технологические решения. Однако ускорение научно-технического прогресса и быстрое моральное устаревание продукции – объектов стандартизации – потребовали пересмотра роли стандартов: в дополнение к консервации существующего уровня техники в них стали закладывать опережающие (прогностические) требования. Такие стандарты, устанавливая перспективные показатели качества, вынуждали предприятия совершенствовать технологии и конструкции, тем самым превращая стандартизацию в инструмент технологического развития [8]. Стандарт приобрёл двойственную природу: сохраняет функцию обобщения проверенного опыта, т.е. представляет собой формализованное описание знаний субъектов об объектах стандартизации (*структурированное знание, онтология*); способствует инновациям, задавая ориентиры для будущих разработок (*объектов проектирования*), формируя в т.ч. *среду проектирования* [9]. Стандарты могут являться фактором, сдерживающим

¹ п. 3 ст. 15 Федерального закона от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

прогресс: фиксируя достигнутый уровень развития науки и технологий на определённый период, они замедляют развитие экономики, промышленных технологий, технологических инноваций [10]. Это противоречие между фиксацией прошлого и стимулированием прогресса отражает динамичную эволюцию стандартизации как механизма управления техническим развитием и раскрывает диалектическое содержание стандартизации.

Обозначенная диалектика стандартизации оказывает существенное влияние на развитие рынка. Установление заниженных, но общедоступных требований может привести к технологической стагнации, замедляя адаптацию промышленности к передовому научно-техническому уровню. Завышенные, опережающие стандарты создают барьеры для части производителей, неспособных обеспечить необходимый уровень технологического развития из-за высоких затрат на внедрение инноваций. В отраслях, техническое регулирование которых осуществляется в рамках Договора о Евразийском экономическом союзе² и Федерального закона о техническом регулировании³, данное противоречие разрешается через добровольный характер стандартов. В наукоёмких секторах экономики, таких как ракетно-космическая, атомная, оборонная, авиационная и др. отрасли, стандартизация приобретает особый характер, обусловленный обязательностью применения нормативных требований^{4,5}. Разработка новых ТС требует соответствия передовым технологическим нормативам, обеспечивающим конкурентоспособность и безопасность продукции. При этом необходимо учитывать, что жёсткие требования могут привести к неоправданному росту затрат и снижению эффективности реализации проектов. Обязательный характер стандартов в указанных отраслях усиливает значимость сбалансированности нормативных требований. Это противоречие можно рассматривать с позиций гегелевской диалектики, где оно выступает движущей силой развития [11]. Таким образом, стандартизация, сочетающая консервативные и прогрессивные функции, становится механизмом, который регулирует текущее состояние технологий и стимулирует их развитие.

2 Стандартизация в развитии техники

Стандарт и деятельность по стандартизации сопровождали человечество всегда. Приспосабливая под себя окружающую среду, оно искало пути выработки, фиксации, накопления и передачи знаний. В период античности формируется рациональный способ описания технологии посредством математики, которая определила «простые машины» как элементы, комбинация которых позволяет создать «сложные машины» [12]. Это можно назвать начальным этапом формирования широко используемых сегодня типизации, унификации и агрегатирования. В XX веке вопрос о доверии к процедуре познания и к результатам познания становится одним из фундаментальных вопросов теории познания [13].

Для создания сложных ТС в контексте цифровой трансформации требуется использование новых подходов, где система стандартизации может стать основой создания качественной и конкурентоспособной техники [14].

Соотношение развития техники и стандартизации можно рассмотреть с позиций философии техники, где техника есть изобретение [15, 16]. В стандартах предлагаются готовые варианты решения многих сопутствующих задач, на которые в отсутствие стандартов пришлось бы тратить когнитивные ресурсы, необходимые для творчества. Учитывая тенденции развития систем автоматизированного проектирования на базе искусственного интеллекта, стандарты, как формализованная система знаний, могут способствовать повышению производительности труда в проектировании и качества разрабатываемых проектов [17].

² Приложение № 9 к Договору о Евразийском экономическом союзе (подписан в г. Астане 29.05.2014).

³ Федеральный закон от 27.12.2002 № 162-ФЗ «О техническом регулировании».

⁴ ст. 6 Федерального закона от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

⁵ Приказ Минтранса России от 17.06.2019 № 184 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21».

3 Онтологическая модель системы стандартизации

Актуальной задачей становится разработка онтологической модели системы стандартизации, соответствующей вызовам технологической трансформации. Тезаурус системы стандартизации установлен основополагающими межгосударственным [7] и национальным [18] стандартами. В этих стандартах термины расположены в порядке, отражающем систему понятий в области стандартизации, однако в них отсутствует схема связей и отношений этих понятий. На рисунке 1 приведена обобщённая семантическая схема стандартизации, в которой использованы виды связей (родовые, партитивные, ассоциативные), приведённые в [19].



Рисунок 1 - Возможное представление обобщённой семантической схемы стандартизации

ния (мета-онтология), так и на уровне ПрО [21, 22]. Мета-онтология описывает наиболее общие понятия, а онтология ПрО – формальное описание ПрО, которое применяется для того, чтобы уточнить понятия, определённые в мета-онтологии, и/или определить общую терминологическую базу ПрО. Предлагаемая модель обладает характеристиками преемственности (стандарты совершенствуются и обновляются с учётом практики), комплексности (стандарты должны быть взаимоувязаны, непротиворечивы, системны и достаточны), а также межуровневой и межотраслевой диффузии (см. рисунок 2).

В первый уровень онтологии предлагается включить: стандарты, описывающие процессы стандартизации, т.е. «стандарты на стандарты» (например, ГОСТы Р серии 1); общие управленческие стандарты (например, стандарты ИСО 9001 и ГОСТ РВ 0015); метрологические стандарты, которые формируют сопоставимость и достоверность результатов; стандарты, содержащие в себе общетехнические требования и формирующие общий подход к ЖЦ объектов техники (например, стандарты системы общих технических требований, стандарты на параметрические ряды и требования к крепежным изделиям, стандарты Единой системы конструкторской и Единой системы технологической документации).

Второй уровень онтологии содержит совокупности стандартов отдельных отраслей техники (например, стандарты на ракетно-космическую технику, авиационную технику и пр.).

Стандарты первого уровня онтологии (мета-стандарты) задают направления развития для стандартов второго уровня онтологии (стандарты по отраслям). Диффузия может происхо-

Основными участниками работ по стандартизации являются технические комитеты по стандартизации (ТК), которые разрабатывают стандарты в соответствии с закрепленными за ТК объектами стандартизации (предметными областями, ПрО) [20]^{6,7}. При построении онтологической модели системы стандартизации разделение на ПрО предусматривает использование онтологий как на самом высоком уровне обобщения

⁶ По состоянию на 08.08.2025 действует 281 ТК. <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/standardization/techcom>.

⁷ В целях реализации положений пункта 17 статьи 9 Федерального закона от 29 июня 2015 г. N 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» приказами Росстандарта все действующие стандарты закреплены за конкретными ТК в соответствии с определёнными за ними объектами стандартизации.

доть не только «сверху вниз», но и «снизу вверх». Так, наилучшие практики из ПрО могут быть применены не только в другой ПрО (диффузия ПрО), но и стать общеприменимыми.

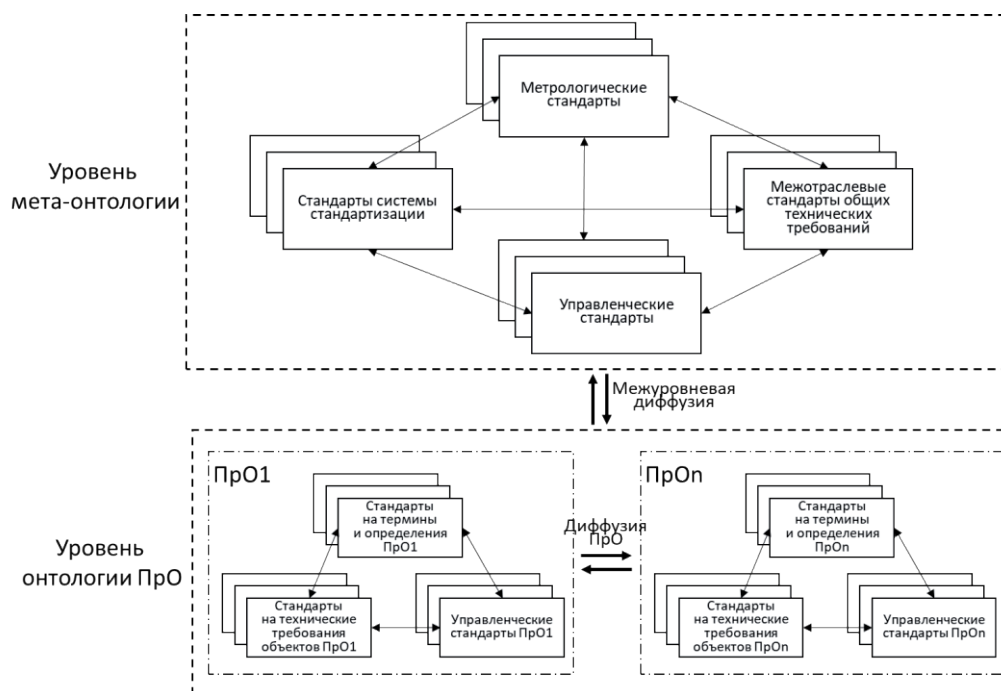


Рисунок 2 - Онтологическая модель системы стандартизации

Стандартизация должна выполнять функции инструмента для создания сложных ТС из типовых наиболее эффективных решений для обеспечения качества и преемственности, а также служить способом упорядочивания, трансдисциплинарного производства и передачи знаний, формируя систему требований.

Стандартизация, как инструмент для создания сложных ТС из типовых наиболее эффективных решений. Очевидна взаимосвязь проектирования и производства, когда стандартные решения используются для снижения стоимости производства. Каждая уникальная составная часть (деталь, узел и пр.) ТС будет повышать стоимость создания ТС. Стандартизованные элементы в этом случае рассматриваются как эмпирически обоснованный, подкреплённый опытом практического применения, наилучший вариант для решения конкретной задачи, который может быть произведён оптимальным способом.

Стандарты устанавливают требования к характеристикам компонентов систем, что обеспечивает их совместимость и взаимозаменяемость, ускоряет процесс разработки и снижает затраты. Стандарт при этом не является ограничителем творчества, а представляет собой инструмент наведения порядка во множестве вариантов исполнения элемента конструкции. В процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ могут создаваться новые принципы действия, варианты их осуществления, а также конструкции ТС и их компонентов, синтезироваться новые материалы и т.д. – т.е. создаваться изобретение, которое может стать основой нового стандарта для будущих разработок.

Стандартизация для обеспечения качества. Стандартизованные объекты представляют собой положительно показавший себя на практике вариант исполнения с точки зрения обеспечения безопасности и качества ТС. Стандарт может быть использован для оценки существующих объектов. Инструментом этого является система оценки соответствия, суть которой состоит в проведении испытаний с целью подтверждения требований, установленных в

стандартах. Соответствие стандартам упрощает процесс получения необходимых разрешений и сертификатов, ускоряет вывод товаров на рынок и ввод в эксплуатацию ТС.

Стандартизация, как способ упорядочивания. В качестве примера можно привести стандарт, устанавливающий общие требования к выполнению технических условий [23]. Технические условия являются документом по стандартизации в составе конструкторской документации и упорядочивают номенклатуру изделий и совокупность основных требований к изделию или группе однотипных изделий.

Стандартизация для преемственности. Обеспечение принципа преемственности при разработке стандартов требуется в соответствии с законодательством в сфере стандартизации⁸. Принцип преемственности осуществляется за счёт внесения изменений и пересмотра действующих стандартов, разработки новых стандартов на основе международных и национальных стандартов с их возможной последующей отменой⁹. Функция преемственности позволяет совершенствовать наилучшие практики, доказавшие свою полезность, отклоняя от использования то, что не проходит проверку изменившейся практикой.

Стандартизация, как система требований. Эта функция актуальна в условиях развития технологии цифровых двойников. ТС должна быть описана в т.ч. с помощью стандартов, содержащих технические требования к объекту закупки¹⁰. Общие требования необходимо разложить на целевые показатели. В основе создания цифровых двойников лежит многоуровневая система требований (матрица требований) [24]. Многоуровневая система требований позволяет декомпозировать каждое требование на целевые показатели, а также определить взаимосвязь требований.

Стандартизация, как способ трансдисциплинарного производства и передачи знаний. Стандартизация рассматривается как эффективный канал передачи знаний от исследователей в промышленность за счёт открытости разработки стандартов и возможности любым заинтересованным лицам принимать в этом участие [4, 25, 26]. Требования к стандартам формируются пользователями и заказчиками стандартов, а трансдисциплинарное знание, получаемое в процессе разработки стандарта, направлено на решение конкретных проблем (задач) заказчика. Стандартизация в трансдисциплинарном обмене знаниями представлена на рисунке 3.

Открытость разработки стандартов и участие в ней всех заинтересованных сторон даёт возможность создания нового знания на стыке дисциплин.

В качестве примера реализации межотраслевой диффузии может быть рассмотрен предварительный национальный стандарт (ПНСТ) [27]. ПНСТ разработан в рамках проектного ТК 711 «Умные (SMART) стандарты», участие в котором принимают крупные организации-представители различных отраслей¹¹. ПНСТ представляет собой результат совместной деятельности экспертов на стыке дисциплин, когда лучшие наработки и запросы всех участников ТК обсуждаются и учитываются на площадке ТК, а затем реализуются в стандарте. В ПНСТ выработаны методологические основы для развития технологии SMART-стандартов, которая впоследствии будет применена во многих отраслях [28].

Трансдисциплинарный подход (ТП) через конструктивное обобщение позволяет разобратся в причинах, обуславливающих существование понятий и их связей, определяющих объект исследования [29]. Достоинством ТП представляется возможность применить обобщённый положительный опыт участников группы по разработке стандартов к решению кон-

⁸ п. 3 ст. 4 Федерального закона от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

⁹ ГОСТ Р 1.5-2020 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления, внесения поправок и отмены».

¹⁰ п. 2 ст. 33 Федерального закона от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд».

¹¹ Приложение № 2 к приказу Росстандарта от 06.07.2021 № 1190 «Состав проектного технического комитета по стандартизации «Умные (SMART) стандарты».

кретной задачи. В настоящее время риск-ориентированный подход стал центральным элементом современных управленческих стандартов [25], т.е. произошёл переход от межотраслевой к межуровневой диффузии, когда стандарт одной ПрО сначала распространился на другие ПрО, а затем перешёл на уровень мета-стандарта.

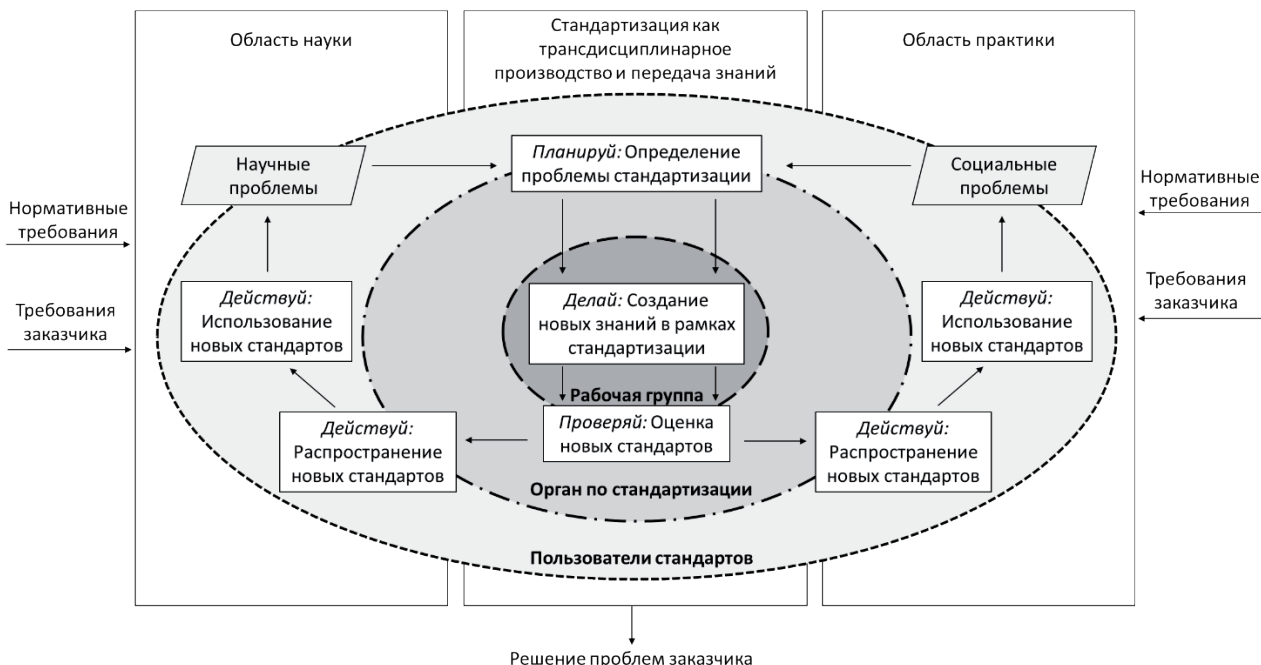


Рисунок 3 - Стандартизация как трансдисциплинарное производство и передача знаний [4] с дополнениями в части требований заказчика

Рассмотренные функции стандартизации близки с функциями БЗ.

В качестве примера можно рассмотреть систему стандартизации в ракетно-космической отрасли (РКО). Система стандартизации в РКО является обособленной, а фонд документов по стандартизации ракетно-космической техники (ДС РКТ) представляет собой систематизированный отраслевой опыт (БЗ), накопленный в ходе реализации космических проектов [30]. Знание – это человеческий актив или *актив организации*, позволяющий *принимать эффективные решения* и действовать *в соответствии с контекстом* [31]. Фонд ДС РКТ – актив, позволяющий принимать эффективные решения в соответствии с контекстом (создавать конкурентоспособную РКТ), т.е. БЗ и применять к нему подходы МЗ.

Стандартизация способствует решению задачи по созданию сложной наукоёмкой техники, а онтологический подход позволяет осуществить моделирование и наглядное представление взаимосвязей требований, установленных в стандартах. Это представляется крайне необходимым для повышения «цифровой зрелости» нормативной документации [32].

Заключение

Стандартизация представляет собой социально-технический феномен: её содержание и механизмы реализации неразрывно связаны с текущим уровнем технологического развития. Эта взаимосвязь обуславливает необходимость создания гибкой онтологической модели, которая отражала бы фундаментальные принципы стандартизации и обладала достаточной адаптивностью для быстрого отклика на технологические инновации.

Предложенный подход к стандартизации учитывает: ускорение темпов технологических изменений, рост сложности ТС и их компонентов, необходимость обеспечения совместимости и интероперабельности разнородных технологических решений, требования к гибкости стандартов. Это может быть достигнуто путём применения многоуровневой онтологической

модели, которая позволит структурировать существующую совокупность стандартов и создать методологическую основу для разработки новых стандартов в условиях быстро изменяющейся технологической среды.

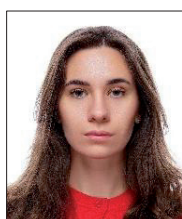
Стандартизации на основе онтологий может способствовать повышению качества и инновационного потенциала при создании сложных ТС, однако нуждается в детальной проработке методических и технических решений для конкретных ПрО.

Список источников

- [1] **Шалаев А.П., Сироткин Р.О.** Инструменты стандартизации в реализации приоритетных направлений развития. *Стандарты и качество*. 2018. №10. С.20-23.
- [2] **Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.** Проектирование качества продукции на основе параметрической идентификации моделей, требований потребителей, знаний: онтологическая парадигма. *Онтология проектирования*. 2015. Т.5, №3(17). С.313-327. DOI: 10.18287/2223-9537-2015-5-3-313-327.
- [3] **Серенков П.С., Соломахо В.Л., Нифагин В.А., Минова А.А.** Концепция инфраструктуры стандартизации как базы знаний на основе онтологий. *Стандартизация*. 2005. №5. С.25-29.
- [4] **Blind K.** Standardization in the context of transdisciplinarity. *Sustainability Science*. 2024. Vol.19, No.5. P.1609-1621. DOI: 10.1007/s11625-024-01524-3.
- [5] Толковый словарь русского языка Д.Н. Ушакова. 1935-1940. - <https://ushakovdictionary.ru/word.php?wordid=73928>
- [6] Большая советская энциклопедия. Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1976. В 30 т. Т 24. 607 с.
- [7] ГОСТ 1.1-2002. Межгосударственная система стандартизации. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 44 с.
- [8] Основы стандартизации / Под ред. В.В. Ткаченко. М.: Издательство стандартов, 1973. 432 с.
- [9] **Боргест Н.М.** Научный базис онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2013. №1 (7). С.7-25.
- [10] **Бурмистров В.А., Шалаев А.П., Глушкова И.И.** Развитие стандартизации в Российской Федерации - процесс непрерывный. *Стандарты и качество*. 2020. №2. С.12-14.
- [11] **Гегель Г.В.Ф.** Наука логики. В 3 т. Т. 1. М.: Мысль, 1970. 501 с.
- [12] **Горохов В.Г.** Эволюция инженерии: от простоты к сложности. М.: ИФРАН, 2015. 199 с.
- [13] **Степин В.С., Горохов В.Г., Розов М.А.** Философия науки и техники. М.: Фирма «Гардарика», 1996. 399 с.
- [14] Стандартизация в условиях цифровой трансформации / Под редакцией В.В. Окрепилова. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2024. 219 с.
- [15] **Энгельмейер П.К.** Философия техники. СПб.: Лань, 2013. 93 с.
- [16] **Дессауэр Ф.** Человек и космос. Опыт. Спор о технике: монография. Серия: *Spatium cosmicum ad vivendum* / Пер. с нем. А.Ю. Нестерова. Самара: Изд-во «Мудрая черепаха». 2024. 340 с.
- [17] **Глазунов В.Н.** Концептуальное проектирование. Теория изобретательства. М.: ЛЕНАНД, 2018. 512 с.
- [18] ГОСТ Р 1.12-2020. Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 10 с.
- [19] ГОСТ Р 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2018. 48 с.
- [20] ГОСТ Р 1.1-2020. Стандартизация в Российской Федерации. Технические комитеты по стандартизации и проектные технические комитеты по стандартизации. Правила создания и деятельности. М.: Стандартинформ, 2020. 27 с.
- [21] ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021. Информационные технологии. Онтологии высшего уровня (TLO). Часть 1. Требования. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 23 с.
- [22] ГОСТ Р 59798-2021. Информационные технологии. Онтологии высшего уровня (TLO). Часть 2. Базисная формальная онтология (BFO). М.: Российский институт стандартизации, 2021. 29 с.
- [23] ГОСТ 2.114-2016. Единая система конструкторской документации. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.
- [24] Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: Монография / Под ред. А.И. Боровкова. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 492 с.
- [25] ГОСТ Р 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2020. 23 с.
- [26] **Новиков И.С., Ермилина Д.В., Ионов А.Г., Собко А.А., Смирнов В.М.** ТК 321 «Ракетно-космическая техника. Стандартизация в ракетно-космической отрасли. *Стандарты и качество*. 2024. №4. С.34-38.

- [27] ПНСТ 864-2023. Умные (SMART) стандарты. Общие положения. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2023. 11 с.
- [28] Денисова О.А., Дмитриева С.Ю. Зачем нужен SMART-стандарт? *Стандарты и качество*. 2023. №11. С.92-95.
- [29] Фаянс А.М. Об онтологии проектирования с позиций трансдисциплинарного подхода. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.163-173. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-163-173.
- [30] Новиков И.С., Купцова Д.В., Ионов А.Г. Анализ и перспективы развития стандартизации в ракетно-космической отрасли. *Стандарты и качество*. 2025. №6. С.22-26.
- [31] ГОСТ Р ИСО 30401-2020. Системы менеджмента знаний. Основные требования. М.: Стандартиформ, 2020. 17 с.
- [32] Лигай О.А., Самотуго И.С. От документа к требованию: технологии перехода. *Стандарты и качество*. 2025. №6. С.36-39.

Сведения об авторах



Купцова Дарья Владиславовна, 1998 г. рождения. Окончила бакалавриат в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева (Самарский университет) в 2020 г., магистратуру МАИ в 2023 г. Аспирант Самарского университета. Сертифицированный эксперт по стандартизации. В списке научных трудов более 10 публикаций в области стандартизации и управления качеством. ORCID: 0009-0007-5717-7332. Author ID (РИНЦ): 1076654. dar.yermilina@gmail.com.

Дмитриев Александр Яковлевич, 1956 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт имени С.П. Королёва в 1979 г., к.т.н. (1987).

Доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского университета, генеральный директор ООО «Новое качество». Академик Академии проблем качества. В списке научных трудов более 100 работ в области управления качеством. ORCID: 0000-0002-9237-1989. Author ID (РИНЦ): 525474. dmitriev.aya@ssau.ru.



Новиков Илья Сергеевич, 1986 г. рождения. Окончил МАИ в 2009 г. Старший преподаватель кафедры управления качеством МАИ, преподаватель ВШУИ МГУ. Советник министра промышленности и торговли Российской Федерации. Сертифицированный эксперт по стандартизации. В списке научных трудов более 30 публикаций в области управления качеством и стандартизации. Author ID (РИНЦ): 502040. NovikovIS@minprom.gov.ru.



Поступила в редакцию 07.08.2025, после рецензирования 21.10.2025. Принята к публикации 24.10.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-486-496

Ontological aspects of standardization

© 2025, D.V.Kuptsova¹✉, A.Ya.Dmitriev^{1,2}, I.S.Novikov^{3,4}

¹ Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

² Academy for quality of Russian Federation, Moscow, Russia

³ Moscow Aviation Institute (National Research University, MAI), Moscow, Russia

⁴ Higher School of Management and Innovation of Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract

This article explores the dialectical nature of standardization, combining the functions of consolidating experience and the stimulation of further development. It traces the evolution of standards from ancient traditions to modern digital technologies, emphasizing the conceptual proximity of standardization to ontological thinking and knowledge manage-

ment. A generalized semantic framework of standardization is proposed, grounded in terminology established by key international and national standards. The ontological modeling of the standardization system, structured at two levels—meta-ontology and subject ontology—provides adaptability and flexibility in response to technological change. The paper highlights the necessity of adapting standardization to the challenges of the digital era through the development of flexible ontological models capable of integrating new technologies. Standardization is viewed as a tool for creating competitive, knowledge-intensive systems, combining the stability of basic principles with responsiveness to technological trends. The novelty of the study lies in the proposed ontological model of the standardization system, which reflects the role of standardization in the creation of technical systems. This model can serve as a methodological foundation for developing standardization systems in specific knowledge-intensive industries.

Keywords: *standardization, high-tech technology, technical system, ontology, smart standard, knowledge management, knowledge base.*

For citation: Kuptsova DV, Dmitriev AY, Novikov IS. Ontological aspects of standardization [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 486-496. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-486-496.

Authors' contributions: Kuptsova DV – development of the article's concept, schemes, and models; Dmitriev AY – formulation of ideas and methodological foundations of the research, selection of sources; Novikov IS – development of the research concept, formulation of standardization functions.

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

List of figures

Figure 1 – Possible representation of a generalized semantic scheme of standardization

Figure 2 – Ontological model of the standardization system

Figure 3 – Standardization as a transdisciplinary process of knowledge production and transfer [4], with additions concerning customer requirements

References

- [1] **Shalaev AP, Sirotkin RO.** Standardization tools in the implementation of priority development directions [In Russian]. *Standards and quality*. 2018; 10: 20-23.
- [2] **Dmitriev AY, Mitroshkina TA.** Product quality design based on identification of parametric models, consumer requirements, knowledge: ontological paradigms [In Russian]. *Ontology of designing*. 2015; 3(17): 313-327. DOI 10.18287/2223-9537-2015-5-3-313-327.
- [3] **Serenkov PS, Solomakho VL, Nifagin VA, Minova AA.** The concept of standardization infrastructure as a knowledge base built on ontologies [In Russian]. *Standardization*. 2004; 5: 25-29.
- [4] **Blind K.** Standardization in the context of transdisciplinarity. *Sustainability Science*. 2024; 5: 1609-1621. DOI 10.1007/s11625-024-01524-3
- [5] Explanatory Dictionary of the Russian Language by Ushakov DN. 1935-1940. - <https://ushakovdictionary.ru/word.php?wordid=73928>.
- [6] Great Soviet Encyclopedia [In Russian]. Edited by Prokhorov AM. Moscow: Sov. Encycl.; 1976. Vol. 24. 607 p.
- [7] GOST 1.1-2002. Interstate standardization system. Terms and definitions. [In Russian]. Moscow: Publishing house of standards. 2003. 44 p.
- [8] Basics of Standardization: textbook for technical schools [In Russian]. Edited by Tkachenko VV Moscow: Publishing House of Standards, 1986. 328 p.
- [9] **Borgest NM.** The scientific basis of the ontology of designing [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013; 1(7): 7-25.
- [10] **Burmistrov VA, Shalaev AP, Glushkova II.** Development of standardization in the Russian Federation: A continuous process [In Russian]. *Standards and quality*. 2020; 2: 12-14.
- [11] **Hegel.** Science of logic. In 3 volumes. Volume 1. Moscow: Mysl, 1970. 501 p.
- [12] **Gorokhov VG.** Evolution of engineering: from simplicity to complexity [In Russian]. Moscow: IPhRAS; 2015. 199 p.
- [13] **Stepin VS, Gorokhov VG., Rozov MA.** Philosophy of Science and Technology [In Russian]. In-t «Open Society». Moscow: Firm «Gardarika», 1996. 399 p.
- [14] Standardization in the context of digital transformation [In Russian]. Edited by VV Okrepilov St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics, 2024. 219 p.
- [15] **Engelmeier PK.** Philosophy of technique [In Russian]. St. Petersburg: Lan; 2013. 93 p.

- [16] **Dessauer F.** Man and Space. Experience. Debate on Technology: monograph [In Russian]. Translation from German Nesterov AYU. Samara: Wise turtle publ; 2024. 340 p.
- [17] **Glazunov VN.** Conceptual design. Invention theory [In Russian]. Moscow: LENAND; 2018. 512 p.
- [18] GOST R 1.12-2020. National standard of the Russian Federation. Standardization in the Russian Federation. Terms and definitions [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2020. 10 p.
- [19] GOST R 9000-2015 National standard of the Russian Federation. Quality management systems. Basic provisions and dictionary [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2018. 48 p.
- [20] GOST R 1.1-2020. Standardization in the Russian Federation. Technical committees on standardization and project technical committees on standardization. Rules of creation and activities [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2020. 27 p.
- [21] GOST R ISO/IEC 21838-1-2021. Information Technology. Top-Level Ontologies (TLO). Part 2. Requirements [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2021. 23 p.
- [22] GOST R 59798-2021. Information Technology. Top-Level Ontologies (TLO). Part 2. Basic Formal Ontology (BFO) [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2021. 29 p.
- [23] GOST 2.114-2016 Unified system of design documentation. Technical conditions [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2016. 11 p.
- [24] Digital twins in high-tech industry: monograph / edited by Borovkov AI [In Russian]. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. 492 p.
- [25] GOST R 9001-2015 National standard of the Russian Federation. Quality management systems. Requirements [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2020. 23 p.
- [26] **Novikov IS, Ermilina DV, Ionov AG, Sobko AA, Smirnov VM.** TK 321 Rocket and space technology. Standardization in the rocket and space industry [In Russian]. Standards and quality. 2024; 4: 34-38.
- [27] Preliminary GOST R 864-2023. Smart standards. General provisions [In Russian]. Moscow: Institute of Standardization. 2023. 11 p.
- [28] **Denisova OA, Dmitrieva SYu.** Why do we need a SMART standard? [In Russian]. Standards and quality. 2023; 11: 92-95.
- [29] **Fayans FM.** On the ontology of designing from the standpoint of a transdisciplinary approach [In Russian]. Ontology of designing. 2025; 15(2): 163-173. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-163-173.
- [30] **Novikov IS, Kuptsova DV, Ionov AG.** Analysis and prospects for the development of standardization in the rocket and space industry [In Russian]. Standards and quality. 2025; 6: 22-26.
- [31] GOST R ISO 30401-2020. Knowledge management systems. Requirements [In Russian]. Moscow: Standardinform. 2020. 17 p.
- [32] **Ligay OA, Samotugo IS.** From document to requirement: transition technologies [In Russian]. Standards and quality. 2025; 6: 36-39.

About the authors

Daria Vladislavovna Kuptsova (b. 1998) graduated with a bachelor's degree from Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University) in 2020 and earned her Master's degree from Moscow Aviation Institute (MAI) in 2023. Currently a PhD student at Samara University. Certified expert in standardization. The list of scientific papers includes more than 10 publications in the field of standardization and quality management, Author ID (RSCI): 1076654. ORCID: 0009-0007-5717-7332. dar.yermilina@gmail.com. ✉.

Aleksandr Yakovlevich Dmitriev (b.1956) graduated from Kuibyshev Aviation Institute named after S.P. Korolev in 1979, PhD in Engineering (1987). Associate Professor at the Department of Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara University, and General Director of Novoye Kachestvo LLC. Academician of the Academy of Quality Problems. The list of scientific papers includes more than 100 publications in the field of quality management and risk management. ORCID: 0000-0002-9237-1989. Author ID (RSCI): 525474. dmitriev.aya@ssau.ru

Ilya Sergeevich Novikov (b.1986) graduated from Moscow Aviation Institute (National Research University) in 2009. Senior Lecturer at the Department of Quality Management, MAI, and Lecturer at the Graduate School of Management and Innovation, Lomonosov Moscow State University. Adviser to the Minister of Industry and Trade of the Russian Federation. Certified expert in standardization. The list of scientific works includes more than 30 publications in the field of quality management and standardization. Author ID (RSCI): 525474. NovikovIS@minprom.gov.ru.

Received August 7, 2025. Revised October 21, 2025. Accepted October 24, 2025.



Коллективное проектирование и прототипирование робототехнических систем на основе нейрокогнитивного подхода

© 2025, К.Ч. Бжихатлов, И.А. Пшенокова ✉

Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик, Россия

Аннотация

Применение систем управления проектами, основанных на искусственном интеллекте, позволяет повысить эффективность командной работы. Целью исследования является разработка концепции системы коллективного проектирования и прототипирования на основе нейрокогнитивного мультиагентного подхода. Структура коллективной системы прототипирования представлена в виде клиент-серверного приложения. В качестве клиентов системы могут выступать как реальные пользователи, так и интеллектуальные агенты в виде отдельных программ на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. На сервере хранится обобщённая модель поведения создаваемого устройства в различных условиях и информация обо всех его элементах. Разработанная схема взаимодействия между сервером и клиентами коллективной системы прототипирования позволяет обеспечить динамическое создание онтологии, описывающей структуру проектируемого устройства, что позволит упростить обработку данных и процесс проектирования. Представленная система проектирования устройств для робототехники обеспечивает общее управление проектами, в частности возможность создания, редактирования и удаления проекта, подключение пользователей и отдельных программных агентов, а также обмен данными между ними.

Ключевые слова: коллективное проектирование, прототипирование, когнитивные системы, интеллектуальные системы, интеллектуальные агенты, робототехника.

Цитирование: Бжихатлов К.Ч., Пшенокова И.А. Коллективное проектирование и прототипирование робототехнических систем на основе нейрокогнитивного подхода. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.497-508. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508.

Вклад авторов: Бжихатлов К.Ч. - концепция системы прототипирования изделий и устройств робототехники, структура коллективной системы проектирования, примеры. Пшенокова И.А. – структура интеллектуального агента и его программная реализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Интеллектуальное прототипирование (ИП) в проектировании робототехнических систем объединяет методы и технологии, основанные на искусственном интеллекте (ИИ). ИП позволяет создавать комплексные решения, которые учитывают разнообразные аспекты пользовательского опыта и функциональности продукта [1]. Совместная работа человеко-машинного коллектива является одним из элементов парадигмы *Industry 5.0* [2]. Одним из основных методов ИП является использование генеративного проектирования [3], что позволяет находить инновационные решения [4].

Облачные платформы для совместной работы в реальном времени позволяют нескольким участникам команды одновременно работать над прототипами, делиться результатами и быстро вносить изменения. Это полезно для распределённых команд, так как существенно сокращает время на обратную связь и корректировки.

Важным аспектом является тестирование прототипов с использованием виртуальной или дополненной реальности [5]. Например, в [6] представлена платформа для совместного про-

ектирования городской среды, где для упрощения взаимодействия пользователя и платформы используются виртуальная и дополненная реальности.

В [7] представлен метод проектирования, ориентированный на пользователя и включающий набор инструментов и методов для проектирования, прототипирования и валидации решений. ИП применяется для автоматической адаптации таких решений к предпочтениям и потребностям пользователей.

В [8] рассмотрены три парадигмы ИП: цифровое прототипирование, которое фокусируется на проектировании на основе данных; физическое и цифровое прототипирование, включающее проектирование и сборку с использованием смешанной реальности; коллективное прототипирование, объединяющее интеллект человека и машины. Методы ИП используются в различных областях [9-11], позволяют быстро оценить и доработать проект, получить обратную связь в режиме реального времени.

Целью исследования является разработка системы коллективного проектирования и прототипирования изделий и устройств для робототехники на основе нейрокогнитивного мультиагентного подхода.

1 Концепция системы

В проектировании изделий робототехники принимают участие различные специалисты, использующие специализированное программное обеспечение (ПО), которое позволяет проводить свою часть проектирования и моделирования разрабатываемого устройства. В данной работе, по аналогии с технологией *BIM (Building Information Model)* [12, 13], рассматривается концепция единой модели устройства робототехники и ПО для работы с подобной моделью.

ПО должно позволять моделировать различные физико-химические свойства изделия: механические и электротехнические; взаимодействие с внешней средой; производственные процессы и др. Для этого необходимы интерфейсы редактирования создаваемого устройства, которые должны работать с единой моделью устройства. Функционал коллективной системы прототипирования устройств робототехники показан на рисунке 1.

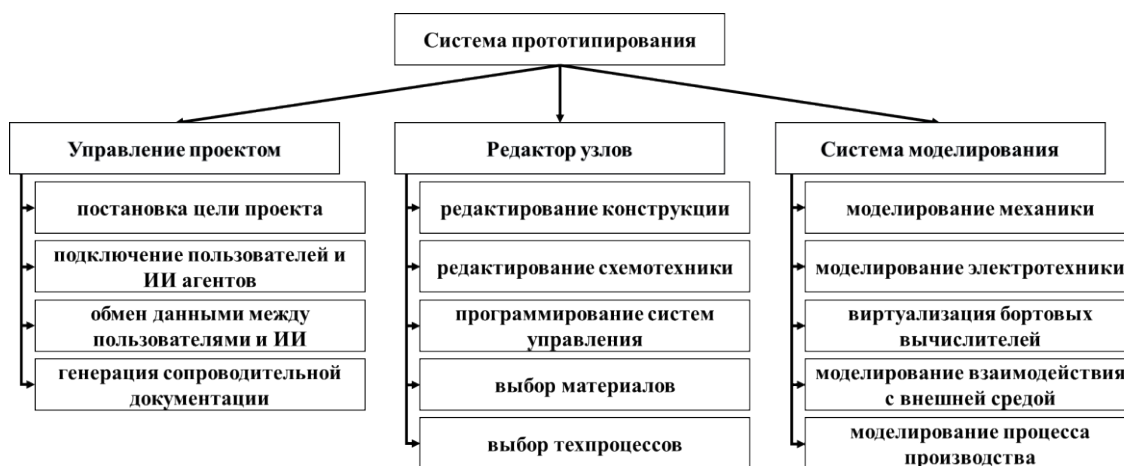


Рисунок 1 – Функционал коллективной системы прототипирования устройств (узлов) робототехники

Система проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники может быть реализована в виде клиент-серверного приложения. Схема взаимодействия между клиентами и сервером показана на рисунке 2. Клиентами системы могут быть «живые» пользователи и интеллектуальные агенты (ИА) в виде отдельных программ. Пользователи отвечают за управление проектом, постановку задач для ИА и редактирование устройств. Все измене-

ния отправляются на сервер, где хранится база данных с проектами и типовыми устройствами, и передаются пользователям. На сервере хранятся обобщённые модели создаваемого устройства и информация о всех его элементах, а также моделируется поведение устройства в различных условиях. Редактирование и моделирование производится на нескольких уровнях, а на сервере создаётся вся сопроводительная документация.

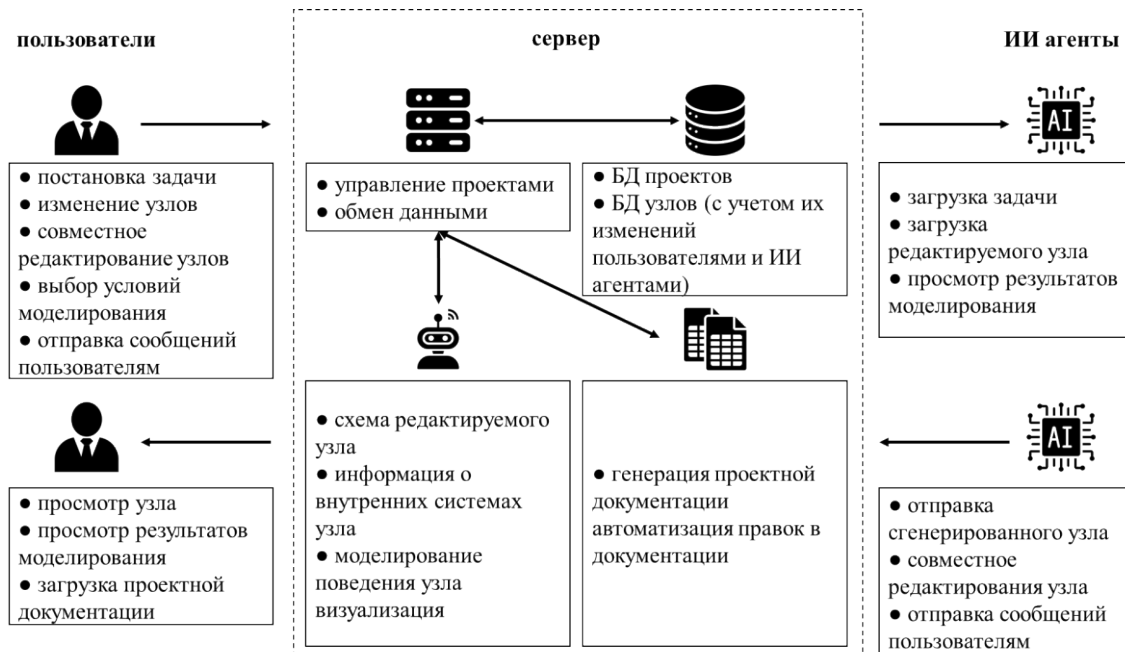


Рисунок 2 – Структура коллективной системы прототипирования устройств (узлов) робототехники

ИА и пользователи могут загружать модель редактируемого устройства и просматривать результаты моделирования. ИА наравне с пользователями могут вносить изменения в модель устройства и обмениваться сообщениями с другими участниками человеко-машинного коллектива. Программная реализация системы коллективного проектирования и прототипирования устройств робототехники состоит из серверной части и нескольких клиентов. Схема взаимодействия между элементами подобной программы показана на рисунке 3.

Клиентами являются: программы для редактирования модели устройств; ИА; панель редактирования, которая используется для общего управления проектами и ролями пользователей и ИА. Здесь же проводится сбор статистики и выгрузка отчётов по работе сервера. Редактор представляет собой программу для визуализации и редактирования модели разрабатываемого устройства [14]. Эта программа позволяет вносить изменения в модель устройства, отправлять изменения на сервер, получать результаты моделирования поведения устройства и выводить их в виде трёхмерной модели (рисунок 3).

Редактором осуществляется создание и редактирование сопроводительной документации, а также обмен сообщениями между пользователями (включая ИА). ИА включает интеллектуальную систему (например, обученную модель, предназначенную для генерации конструкции, подбора рекомендаций для пользователя, генерации кода или документов) и модуль взаимодействия с сервером, через который происходит передача результатов работы за счёт изменений в проекте или сообщений для пользователей. ИА содержит информацию о проектируемом устройстве или его элементе, которую он передаёт в виде сообщений другим агентам или пользователю. ИА обладают собственными целевыми функциями (максимизация энергии). Протокол взаимодействия между агентами осуществляется на основе мультиагентного алгоритма (см., например, [15, 16]). При его выполнении агенты заключают дого-

ворные обязательства, в соответствии с которыми они взаимодействуют друг с другом посредством сообщений. Зависимость, возникающую, когда агенты заключают друг с другом договорные обязательства на условиях взаимовыгодного обмена энергии на знания, названа мультиагентным контрактом.

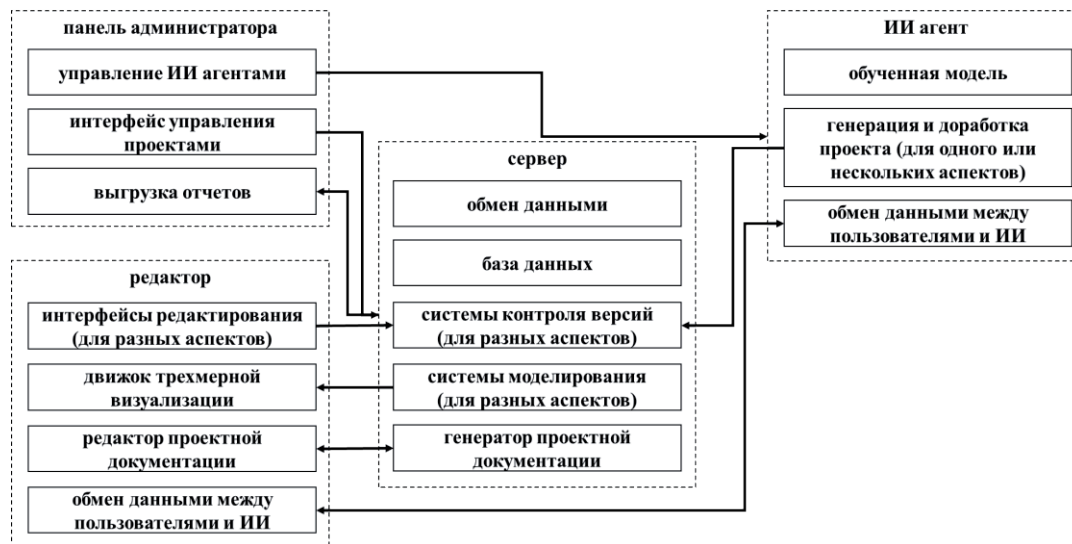


Рисунок 3 – Схема взаимодействия между сервером и клиентами коллективной системы проектирования и прототипирования устройств (узлов) для робототехники

На сервере осуществляются: обмен данными между клиентами; хранение информации в базе данных; контроль версий и системы моделирования разрабатываемого устройства; разграничение доступа пользователей и целостность модели устройства.

2 Архитектура интеллектуального агента

ИА в коллективной системе могут выполнять ряд задач, характерных для участников проектирования. ИА представляет собой программное решение, состоящее из интерфейса взаимодействия с сервером, обеспечивающего обмен сообщениями через открытый протокол, конвертирование сообщений сервера в подходящий формат и передачу сообщений в модуль обработки. В работе рассматривается возможность использования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур для моделирования процессов рассуждения и принятия решений [17]. Архитектура ИА приведена на рисунке 4. Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура состоит из набора агентов, моделирующих отдельные нейроны или группы нейронов головного мозга, разделённые на

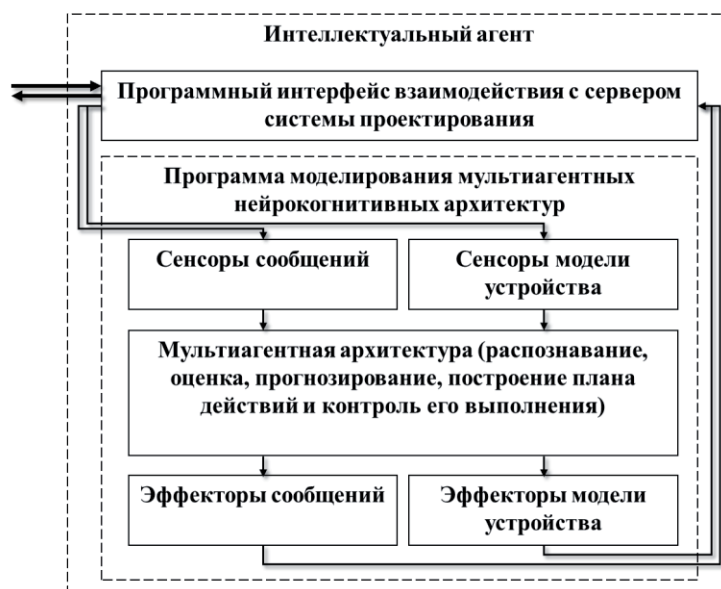


Рисунок 4 – Архитектура интеллектуального агента

функциональные группы [18]. Взаимодействие между агентами аналогично механизмам в нейронных сетях мозга человека. Каждый агент, будучи автономным компонентом, решает конкретно поставленную ему задачу в процессе прототипирования, обеспечивая параллельную обработку данных и повышая эффективность совместной работы. Первый слой подобных агентов отвечает за сбор данных из внешней (по отношению к ИА) среды. В частности, агент, работающий в коллективной системе проектирования, имеет две группы сенсоров, предназначенных для: получения сообщений от других пользователей системы; получения информации о модели разрабатываемого устройства (структура, трёхмерная модель, результаты моделирования и т.д.).

После сбора информации агенты анализируют и интерпретируют данные в соответствии с заданными алгоритмами и моделями, а также могут осуществлять классификацию, прогнозирование и генерацию новых знаний. Например, агент, отвечающий за 3D-моделирование, может использовать данные о предыдущих версиях проекта, чтобы предложить его улучшение и оптимизацию. Каждый агент может отправлять сообщения своему окружению, что позволяет другим агентам в реальном времени учитывать изменения и принимать решения на основе актуализированных данных. После обработки и обмена информацией агенты вырабатывают совместный результат, который формируется в виде набора сигналов с агенто-эффекторов, которые так же, как и сенсоры, разделены на две группы. Полученная информация собирается программным интерфейсом и отправляется на сервер.

Важным свойством мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры является устойчивость к сбоям. Если один из агентов выходит из строя, другие могут продолжать свою работу, обмениваясь информацией и принимая решения на основе оставшихся ресурсов. Это позволяет системе оставаться в рабочем состоянии и адаптироваться к изменяющимся условиям прототипирования. Пример мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, обеспечивающей получение и анализ данных о трёхмерной модели устройства от сервера системы проектирования, приведён на рисунке 5.

Модель робототехнического устройства описывается набором сообщений от сервера, где представлены данные по определённому аспекту моделирования. В частности, для трёхмерной модели устройства – это информация об элементах устройства, каждый из которых состоит из набора плоскостей, включающих набор точек. Точки определяются набором координат x , y , z . Каждое сообщение от сервера представляет собой набор сообщений для конкретных агентов в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре, в частности для агентов-сенсоров, отвечающих за получение сигнала из внешнего мира. В мультиагентной архитектуре созданы следующие агенты-сенсоры: сенсор устройств, сенсор поверхностей, сенсор координат (x , y , z), сенсор углов, сенсор материалов и т.д. Архитектура содержит агентов сенсорного типа (расположены в верхней части рисунка и обозначены треугольниками), абстрактного типа (обозначены кругами), агентов действий (шестиугольники) и агентов событий (обозначены фигурой в виде клевера).

Данные, поступающие в систему, запускают работу базы знаний сенсоров, которые пересылают сообщения другим агентам. Например, при появлении нового устройства сенсор отправляет сообщение с названием устройства агенту абстрактного типа «устройство» и агенту-действию «состоит». Одновременно приходит информация о наличии поверхности на данном устройстве, что вызывает срабатывание сенсора поверхностей. Этот сенсор передаёт информацию агенту абстрактного типа «поверхность», в результате группе агентов событийного типа передаются три сообщения: «устройство», «состоит», «поверхность». Если на момент подобной передачи среди агентов событий нет подходящего, то он создаётся фабрикой событийных агентов. Вновь созданный агент отвечает за мультиагентное представление факта о том, что «устройство состоит из поверхности» и автоматически заключает контракты

с агентами, на чьи запросы он был создан. Если агент уже существовал, то он ответит на полученные запросы и отправит своё сообщение далее на следующие слои мультиагентной архитектуры.

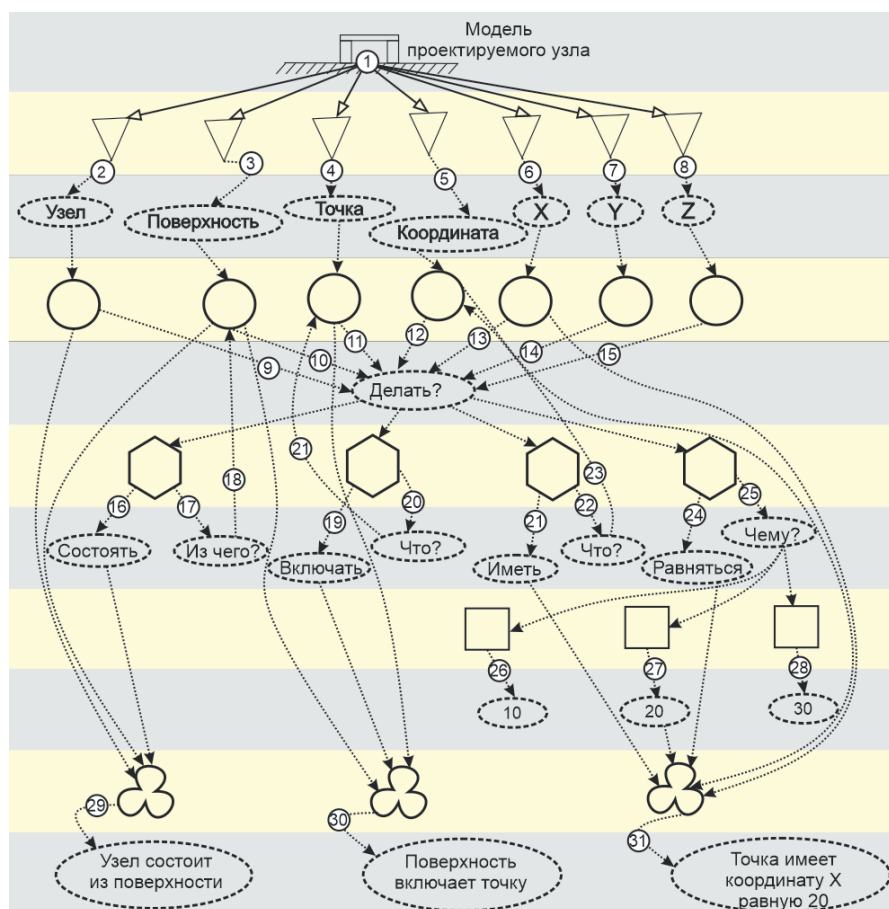


Рисунок 5 – Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура получения информации о трёхмерной модели проектируемого устройства (узла)

После формирования мультиагентного факта распознавания поверхности в мультиагентной архитектуре формируются факты, связанные с конкретными координатами точек на поверхности. Для этого на сенсоры координат отправляются трёхмерные координаты точек поверхности. Сенсоры координат x , y , z отправляют сообщение абстрактному агенту «точка» и выполняют рассылку со своими входными сигналами агентам числительного типа. В результате активируются агенты числительные с именами, совпадающими с координатами. Если подобного агента нет, то фабрика числительных создаст его автоматически (на рисунке 5 это «20»). В результате числительное отправит своё имя событийным агентам. Вместе с координатой событийным агентам отправляются сообщения от агентов «точка», «координата x » и действие «равно», созданные в результате работы сенсора координат. Этот набор сообщений формирует событие «Точка имеет координату X равную 20». Так же формируются факты для координат y и z . Эта информация позволяет записывать расположение точек на модели.

Срабатывание сенсоров координат вызывает передачу сообщений абстрактному агенту «поверхность» и агенту-действию «содержит», в результате чего формируется событие «Поверхность включает точку», описывающее принадлежность новой точки к конкретной поверхности устройства. Кроме набора поверхностей и точек система получения данных о модели формирует мультиагентные факты, описывающие расстояния между точками и углы

между линиями на поверхности. Похожим образом передается информация о свойствах поверхности и материала каждого устройства.

В качестве примера проектируемого устройства рассмотрен модуль опрыскивателя для автономного робота по защите растений (рисунок 6).

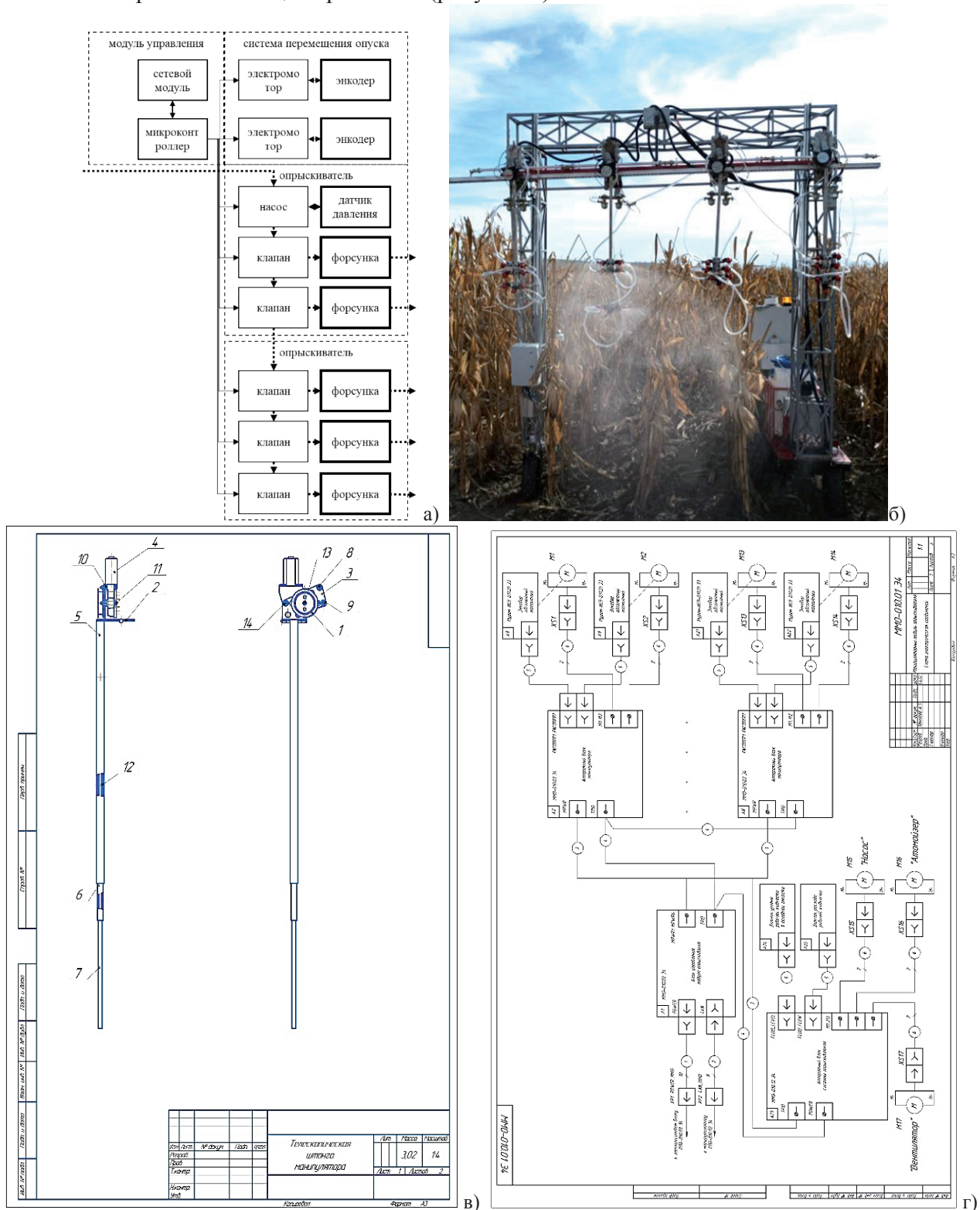


Рисунок 6 – Схема (а), внешний вид (б) и чертежи (в, г) манипулятора опрыскивателя

Модуль представляет собой манипулятор, способный перемещаться по горизонтали и смещаться вниз. На транспортной платформе устанавливается несколько таких модулей, каждый из которых оснащён собственной системой управления, двумя двигателями, насосом и набором управляемых форсунок для внесения активных веществ в почву или на поверхность растений. Структурная схема манипулятора показана на рисунке 6а, а на рисунке 6б показан автономный робот с подобным манипулятором во время проведения испытаний. В процессе проектирования разработаны конструкция устройства (рисунок 6в) и схематические решения (рисунок 6г).

В процессе работы в системе коллективного проектирования созданы: модуль трёхмерного проектирования изделия, модуль моделирования схмотехнических решений, текстовый редактор исходного кода для микроконтроллеров; сформирована онтология разрабатываемого устройства. Фрагмент онтологии приведён на рисунке 7. Сначала заполняется список основных элементов устройства (на примере – это модуль управления, система перемещения и два опрыскивателя). Каждый элемент состоит из отдельных устройств. Для разных устройств заполняется информация о расположении, материале, размерах (например, для корпуса основания) или схемы, напряжения питания и выполняемом алгоритме (для сетевого модуля).

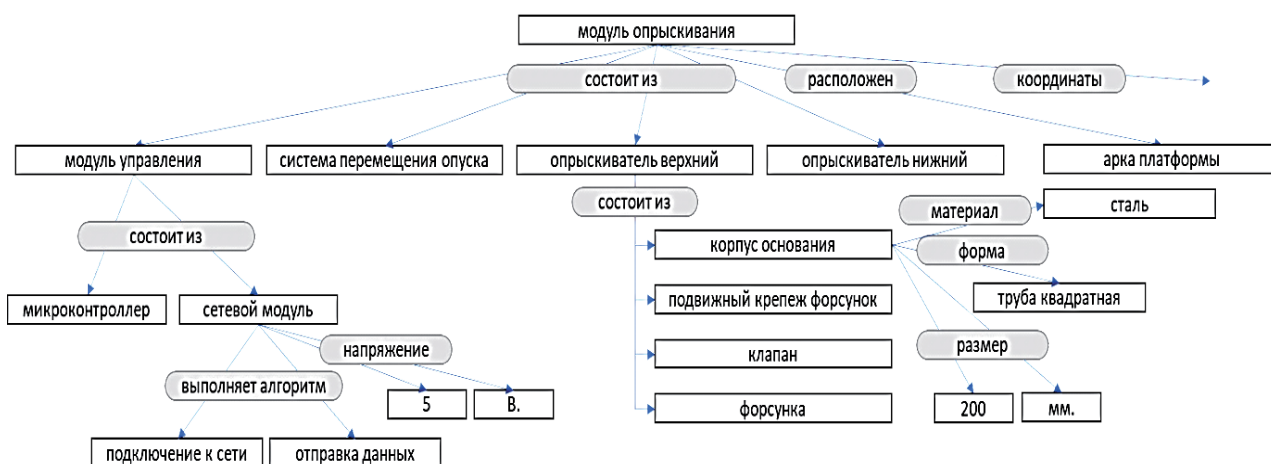


Рисунок 7 – Фрагмент формируемой онтологии при разработке манипулятора опрыскивателя

Подобное решение позволяет обеспечить создание онтологии, описывающей структуру проектируемого и используемых устройств, что упрощает проектирование новых устройств для робототехники, дальнейшую обработку данных и интеллектуальное сопровождение процесса проектирования.

Заключение

Представлена коллективная система проектирования и прототипирования устройств для робототехники, которая обеспечивает: управление проектами; возможность создания, редактирования и удаления проектов; постановку цели проектирования; подключение пользователей и программных агентов, а также обмен данными между ними.

Архитектура коллективной системы выполнена в виде клиент-серверного приложения. В качестве клиентов системы могут быть «живые» пользователи и ИА в виде отдельных программ, в т.ч. системы принятия решений на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Сервер осуществляет хранение обобщённой модели создаваемого устройства и информации о его элементах, а также моделирование поведения устройства в различных усло-

виях. Разработанная схема взаимодействия между сервером и клиентами коллективной системы прототипирования позволяет построить онтологию, описывающую структуру проектируемого устройства, упростить дальнейшую обработку данных и интеллектуальное сопровождение процесса проектирования.

Список источников

- [1] **Pissardini P.E., Godinho Filho M., Calfe M.H., Ganga G.M.D., da Silva E.R.** Smart-enhanced organisational functions: A framework comprising capabilities, barriers, and evolutionary path. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol.255. P.124530. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124530.
- [2] **Emiliani F., Bajrami A., Costa D. M., Palmieri G., Polucci D., Leoni C., Callegari M.** Design and prototyping of a collaborative station for machine parts assembly. *Machines*. 2024. Vol.8. P.572. DOI: 10.3390/machines12080572.
- [3] **Zheng Wen, Jianming Yang, Bowen Sun, Yuanwei Liu.** Research on symmetry optimization of designer requirements and prototyping platform functionality in the context of agile development. *Symmetry*. 2025. Vol.17(4). P.502. DOI: 10.3390/sym17040502.
- [4] **Gunpinar E., Coskun U.C., Ozsipahi M., Gunpinar S.** A generative design and drag coefficient prediction system for sedan car side silhouettes based on computational fluid dynamics. *CAD Computer Aided Design*. 2019. Vol.111. P.65-79. DOI: 10.1016/j.cad.2019.02.003.
- [5] **Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E., Samukaitė-Bubnienė U., Bučinskas V.** Advanced applications of industrial robotics: new trends and possibilities. *Appl. Sci.* 2022. Vol.12. P.135. DOI: 10.3390/app12010135.
- [6] **Imottesjo H., Kain J.** The Urban CoCreation Lab—An integrated platform for remote and simultaneous collaborative urban planning and design through web-based desktop 3D modeling, head-mounted virtual reality and mobile augmented reality: prototyping a minimum viable product and developing specifications for a minimum marketable product. *Applied Sciences* (Switzerland). 2022. Vol.12(2). P.797. DOI: 10.3390/app12020797.
- [7] **Gil M., Albert M., Fons J.** et al. Modeling and “smart” prototyping human-in-the-loop interactions for AmI environments. *Pers Ubiquit Comput.* 2022. Vol.26. P.1413–1444. DOI: 10.1007/s00779-020-01508-x.
- [8] **Kanaani M.** Smart Prototyping: From Data-Driven Mass-Customization to Community-Enabled Co-Production. In: *Routledge Companion to Smart Design Thinking in Architecture & Urbanism for a Sustainable, Living Planet*. London: Routledge, 2024. P.633-642. DOI: 10.4324/9781003384113.
- [9] **Arrivillaga M., Bermúdez P.C., García-Cifuentes J.P., Vargas-Cardona H.D., Neira D., del Mar Torres M., ... & Arizala B.** Designing CITOBOT: A portable device for cervical cancer screening using human-centered design, smart prototyping, and artificial intelligence. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2024. Vol.24. P.739-745. DOI: 10.1016/j.csbj.2024.11.018.
- [10] **Lauff C.A., Knight D., Kotys-Schwartz D., Rentschler M.E.** The role of prototypes in communication between stakeholders. *Design Studies*. 2020. Vol.66. P.1-34. DOI: 10.1016/j.destud.2019.11.007.
- [11] **Wang J., Ranscombe C., Eisenbart B.** An integrated prototyping tool to enhance interdisciplinary communication in smart product design. *Ergonomics*. 2024. P.1-19. DOI: 10.1080/00140139.2024.2418949.
- [12] **Desogus G., Frau C., Quaquero E., Rubiu G.** From Building Information Model to Digital Twin: A Framework for Building Thermal Comfort Monitoring, Visualizing, and Assessment. *Buildings*. 2023. Vol.13(8). P.1971. DOI: 10.3390/buildings13081971.
- [13] **Pishdad-Bozorgi P., Gao X., Eastman C., Self A. P.** Planning and developing facility management-enabled building information model (FM-enabled BIM). *Automation in Construction*. 2018. Vol.87. P.22-38. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.004.
- [14] **Nagoev Z., Bzhikhatlov K., Pshenokova I., Unagasov A.** Algorithms and software for simulation of intelligent systems of autonomous robots based on multi-agent neurocognitive architectures. In: Ronzhin A., Savage J., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science*, vol 14898. Springer, Cham. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P.381-391. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_29.
- [15] **Скобелев П.О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге. *Онтология проектирования*. 2013. №2. С.26-48.
- [16] **Кирьяков Ф.М., Скобелев П.О.** Мультиагентный метод повышения адаптивности и эффективности управления вычислительными ресурсами в реальном времени. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.418-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435
- [17] **Нагоев З.В.** Интеллектика или мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 211 с.

- [18] Анчѣков М.И., Апишев А.З., Бзихатлов К.Ч. и др. Формальная модель генома агента общего искусственного интеллекта на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023. №5(115). С.11-24. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-11-24.

Сведения об авторах



Бзихатлов Кантемир Чамалович, 1988 г. рождения. Канд. физ.-мат. наук, директор Института информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН, зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы» Кабардино-Балкарского научного центра РАН. В списке научных трудов более 100 работ. Author ID (РИНЦ): 655130; Author ID (Scopus): 55212157600; ORCID: 0000-0003-0924-0193. Researcher ID (WoS): O-9741-2014. haosit13@mail.ru.

Пшенокова Инна Ауесовна, 1982 г. рождения. Канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Интеллектуальные среды обитания» Института информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН. В списке научных трудов около 100 работ. Author ID (РИНЦ): 584146; Author ID (Scopus): 57190407251; ORCID: 0000-0003-3394-7682. Researcher ID (WoS): V-6679-2018. pshenokova_inna@mail.ru ✉.



Поступила в редакцию 26.08.2025, после рецензирования 06.10.2025. Принята к публикации 16.10.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508

Collaborative design and prototyping of robotic systems based on a neurocognitive approach

© 2025, K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova ✉

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia

Abstract

The use of project management systems based on artificial intelligence enhances the efficiency of collaborative work. This study aims to develop a concept for a system that supports collaborative design and prototyping grounded in a neurocognitive multi-agent approach. The structure of the proposed system is presented as a client-server application. System clients may include both human users and intelligent agents represented by standalone programs built on multi-agent neurocognitive architectures. The server stores a generalized behavioral model of the designed device under various conditions, as well as detailed information about all its components. The developed interaction scheme between the server and the system's clients enables the dynamic creation of an ontology that describes the structure of the designed device, thereby facilitating data processing and streamlining the design process. The presented system for designing robotic devices provides comprehensive project management capabilities, including the creation, editing, and deletion of projects, the integration of users and software agents, and efficient data exchange among all participants in the design process.

Keywords: collaborative design, prototyping, cognitive systems, intelligent systems, intelligent agents, robotics.

For citation: Bzhikhatlov KCh, Pshenokova IA. Collaborative design and prototyping of robotic systems based on a neurocognitive approach [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 497-508. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508.

Authors' contributions: Bzhikhatlov K.Ch. – concept of the prototyping system for robotic devices and components, structure of the collaborative design system, examples. Pshenokova I.A. – structure of the intelligent agent and its software implementation.

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

List of figures

Figure 1 – Functionality of the collaborative prototyping system for robotics devices (components)

Figure 2 – Structure of the collaborative prototyping system for robotics devices (components)

Figure 3 – Interaction scheme between the server and clients of the collaborative design and prototyping system for robotic devices (components)

Figure 4 – Architecture of the intelligent agent

Figure 5 – Multi-agent neurocognitive architecture for obtaining information about the 3D model of the designed device (components)

Figure 6 – Scheme (a), appearance (b), and drawings (c, d) of the sprayer manipulator

Figure 7 – Fragment of the otology generated during the development of the sprayer manipulator

References

- [1] **Pissardini PE, Godinho Filho M, Callefi MH, Ganga GMD, da Silva ER.** Smart-enhanced organisational functions: A framework comprising capabilities, barriers, and evolutionary path. *Expert Systems with Applications*. 2024; 255: 124530. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124530.
- [2] **Emiliani F, Bajrami A, Costa DM, Palmieri G, Polucci D, Leoni C, Callegari M.** Design and prototyping of a collaborative station for machine parts assembly. *Machines*. 2024; 8: 572. DOI: 10.3390/machines12080572.
- [3] **Zheng Wen, Jianming Yang, Bowen Sun & Yuanwei Liu** Research on Symmetry Optimization of Designer Requirements and Prototyping Platform Functionality in the Context of Agile Development. *Symmetry*. 2025; 17(4): 502. DOI: 10.3390/sym17040502.
- [4] **Gunpinar E., Coskun U. C., Ozsipahi M., Gunpinar S. A.** Generative Design and Drag Coefficient Prediction System for Sedan Car Side Silhouettes based on Computational Fluid Dynamics. *CAD Computer Aided Design*. 2019; 111: 65-79. DOI: 10.1016/j.cad.2019.02.003.
- [5] **Dzedzickis A, Subačiūtė-Žemaitienė J, Šutinys E, Samukaitė-Bubnienė U, Bučinskas V.** Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. *Appl. Sci*. 2022; 12: 135. DOI: 10.3390/app12010135.
- [6] **Imottesjo H, Kain J.** The Urban CoCreation Lab—An Integrated Platform for Remote and Simultaneous Collaborative Urban Planning and Design through Web-Based Desktop 3D Modeling, Head-Mounted Virtual Reality and Mobile Augmented Reality: prototyping a minimum viable product and developing specifications for a minimum marketable product. *Applied Sciences* (Switzerland). 2022; 12(2): 797. DOI: 10.3390/app12020797.
- [7] **Gil M, Albert M, Fons J.** et al. Modeling and “smart” prototyping human-in-the-loop interactions for AmI environments. *Pers Ubiquit Comput*. 2022; 26: 1413–1444. DOI: 10.1007/s00779-020-01508-x.
- [8] **Kanaani M.** Smart Prototyping: From Data-Driven Mass-Customization to Community-Enabled Co-Production. In: *Routledge Companion to Smart Design Thinking in Architecture & Urbanism for a Sustainable, Living Planet*. London: Routledge, 2024. P.633-642. DOI: 10.4324/9781003384113.
- [9] **Arrivillaga M, Bermúdez PC, García-Cifuentes JP, Vargas-Cardona HD, Neira D, del Mar Torres M, ... & Arizala B.** Designing CITOBOT: A portable device for cervical cancer screening using human-centered design, smart prototyping, and artificial intelligence. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2024; 24: 739-745. DOI: 10.1016/j.csbj.2024.11.018.
- [10] **Lauff CA, Knight D, Kotys-Schwartz D, Rentschler ME.** The role of prototypes in communication between stakeholders. *Design Studies*. 2020; 66: 1-34. DOI: 10.1016/j.destud.2019.11.007.
- [11] **Wang J, Ranscombe C, Eisenbart B.** An integrated prototyping tool to enhance interdisciplinary communication in smart product design. *Ergonomics*. 2024. P.1-19. DOI: 10.1080/00140139.2024.2418949.
- [12] **Desogus G, Frau C, Quaquero E, Rubiu G.** From Building Information Model to Digital Twin: A framework for building thermal comfort monitoring, visualizing, and assessment. *Buildings*. 2023; 13(8): 1971. DOI: 10.3390/buildings13081971.
- [13] **Pishdad-Bozorgi P, Gao X, Eastman C, Self AP.** Planning and developing facility management-enabled building information model (FM-enabled BIM). *Automation in Construction*. 2018; 87: 22-38. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.004.

- [14] **Nagoev Z, Bzhikhatlov K, Pshenokova I, Unagasov A.** Algorithms and Software for Simulation of Intelligent Systems of Autonomous Robots Based on Multi-agent Neurocognitive Architectures // In: Ronzhin A., Savage J., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics*. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14898. Springer, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P.381-391. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_29.
 - [15] **Skobelev PO.** Situation-driven decision making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2013; 2: 26-48.
 - [16] **Kiryakov FM, Skobelev PO.** Multi-agent method to improving adaptive real-time management of computing resources [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(3): 418-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.
 - [17] **Nagoev ZV.** Intelligence, or thinking in living and artificial systems. [In Russian]. Nalchik: KBNTs RAS Publishing House, 2013. 211 p.
 - [18] **Anchekov MI, Apshev AZ, Bzhikhatlov KCh. et al.** A formal genome model of a general artificial intelligence agent based on multi-agent neurocognitive architectures. [In Russian]. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023; 5(115): 11–24.
-

About the authors

Kantemir Ch. Bzhikhatlov (b. 1988), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – a branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory “Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems” at the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. He is a co-author of more than 100 scientific articles and abstracts. Author ID (RSCI): 655130; Author ID (Scopus): 55212157600; ORCID: 0000-0003-0924-0193. Researcher ID (WoS): O-9741-2014. haosit13@mail.ru.

Inna A. Pshenokova (b. 1982), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory “Intelligent Habitats” at the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – a branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. She is a co-author of more about 100 scientific articles and abstracts. Author ID (RSCI): 584146; Author ID (Scopus): 57190407251; ORCID: 0000-0003-3394-7682. Researcher ID (WoS): V-6679-2018. pshenokova_inna@mail.ru ✉.

Received August 26, 2025. Revised October 6, 2025. Accepted October 16, 2025.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-509-522



Онтологический комплекс представления знаний для реабилитации травматолого-ортопедических пациентов

© 2025, В.В. Грибова, Е.А. Шалфеева, Д.Б. Окунь ✉, О.Н. Шевченко

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (ИАПУ ДВО РАН), Владивосток, Россия

Аннотация

Системное структурирование клинических данных позволяет проводить комплексную оценку степени функциональных нарушений, уровня активности и степени вовлечённости в реабилитационный процесс пациентов травматолого-ортопедического профиля. Для стандартизации представления медицинских знаний и создания единого семантического пространства для всех участников процесса реабилитации выбрана онтолого-ориентированная технология разработки информационных систем. В работе представлен комплекс взаимосвязанных и логически согласованных онтологических моделей, формирующих семантическую основу интеллектуальной системы поддержки принятия врачебных решений в области реабилитации. Разработаны модели медицинской диагностики, планирования восстановительных процедур, оценивания динамики состояния пациентов. Практическая реализация онтологического комплекса осуществляется на базе облачной платформы IACPaas. Формируемые на основе онтологических моделей специализированные целевые ресурсы и программные средства составляют систему поддержки принятия решений травматолога.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, база знаний, онтология, инженерия знаний, реабилитация пациентов, травматология.

Цитирование: Грибова В.В., Шалфеева Е.А., Окунь Д.Б., Шевченко О.Н. Онтологический комплекс представления знаний для реабилитации травматолого-ортопедических пациентов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.509-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-509-522.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-11-20021).

Вклад авторов: Грибова В.В. - разработка концепции и плана исследования, формулировка целей и задач. Шалфеева Е.А. - формирование моделей онтологического комплекса. Окунь Д.Б. - сбор, анализ медицинских знаний, наполнение информационных ресурсов. Шевченко О.Н. - онтологическое проектирование и комплексирование информационных ресурсов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В здравоохранении особую медико-социальную значимость имеет реабилитация пациентов с последствиями травм и заболеваниями костно-мышечной системы. В России ежегодно выполняется свыше 120 тысяч операций по эндопротезированию, преимущественно тазобедренного и коленного суставов, причём ожидается дальнейшее увеличение объёма таких вмешательств [1]. В этих условиях системный подход к медицинской реабилитации, представляющей собой комплекс лечебных, диагностических и психологических мероприятий,

приобретает особую актуальность [2-5]. Оптимизация существующих реабилитационных стратегий остаётся важной научно-практической задачей¹.

Существующая система медицинской реабилитации травматолого-ортопедических пациентов включает её проведение в различных медицинских организациях, что сопряжено с необходимостью комплексного учёта множества факторов: индивидуальных особенностей травмы (локализация, степень повреждения, осложнения), сопутствующей патологии (возрастные изменения, хронические заболевания), разнообразия реабилитационных методик и восстановительного потенциала пациента (соблюдение рекомендаций, мотивация, социальные условия). Выбор тактики реабилитации часто осуществляется на основе клинического опыта врача, что может приводить к неполному восстановлению функций, развитию осложнений и преждевременной инвалидизации, значительным временным и ресурсным затратам.

Перспективным направлением является внедрение цифровых технологий и систем на основе искусственного интеллекта (ИИ), позволяющих анализировать клинические, функциональные и реабилитационные параметры в режиме реального времени, вырабатывать персонализированные рекомендации, преодолеть терминологическую неоднозначность, затрудняющую междисциплинарное взаимодействие [6]. Системы ИИ, которые обеспечивают объяснение результатов логического вывода и согласование терминологии, целесообразно строить с применением онтологических моделей (ОМ).

Цель работы – представить комплекс взаимосвязанных ОМ, формирующих основу для интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) в реабилитации пациентов травматолого-ортопедического профиля.

1 Материалы и методы

Разработка онтологического комплекса для интеллектуальной СППР в области реабилитации пациентов травматолого-ортопедического профиля осуществлялась с применением системного подхода, объединяющего принципы семантического моделирования, экспертного анализа и облачных вычислений.

ОМ – семантическая сеть или графовая модель предметной области (ПрО), показывающая связи всех существенных абстрактных понятий и соглашения об их использовании при решении профессиональных задач; *онтологический комплекс* – совокупность множества ОМ и номенклатурного справочника названий понятий (база медицинской номенклатуры), с помощью которых в ПрО рассматриваются проблемные ситуации.

В качестве исходных материалов исследования использованы:

- актуальные клинические рекомендации и протоколы ведения пациентов с травмами опорно-двигательного аппарата и после ортопедических операций;
- стандарты оказания медицинской помощи при травмах и заболеваниях костно-мышечной системы, утверждённые Министерством здравоохранения РФ;
- экспертные оценки травматологов-ортопедов и специалистов по медицинской реабилитации.

Методологическая схема исследования включает:

- *аналитический этап*, в рамках которого проведён системный анализ ПрО с выделением ключевых понятий, их классификацией и установлением взаимосвязей, выполнена концептуальная структуризация многоэтапного реабилитационного процесса, осуществлена формализация взаимосвязей между клиническими, функциональными и реабилитационными параметрами;

¹ Rehabilitation after traumatic injury. London: National Institute for Health and Care Excellence (NICE); 2022 Jan 18. (NICE Guideline, No. 211.) Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK579697/>.

- этап онтологического моделирования, в рамках которого разработана система взаимосвязанных ОМ с использованием специализированного языка платформы *IACPaaS*²;
- этап технической реализации, в котором осуществляется формирование информационных ресурсов – описаний оценочных шкал, справочников и других данных и знаний, важных для проведения травматолого-ортопедической реабилитации и интеграции с международной классификацией функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ)³ и другими существующими классификаторами и справочниками.

На облачной платформе *IACPaaS* за счёт онтологического уровня обеспечивается коллективная работа экспертов, инженеров и клиницистов.

2 Комплекс онтологических моделей

Разработанный комплекс ОМ включает следующие основные компоненты.

1) *ОМ пациента* в соответствии с форматом реабилитационной карты пациента объединяет: клиничко-anamnestические данные; параметры функциональных нарушений; реабилитационный потенциал, задачи и мероприятия; динамику восстановительного процесса.

2) *ОМ клиниметрии* содержит формальное описание: набора валидированных оценочных шкал и тестов; способов интерпретации полученных результатов.

3) *ОМ диагностических методик* реализует принципы МКФ через: стандартизированное описание диагностических процедур; унификацию критериев оценки функционального статуса; объединение с общепринятыми классификационными системами.

4) *ОМ междисциплинарного взаимодействия* определяет: состав и функциональные роли членов мультидисциплинарной реабилитационной команды (МДРК); алгоритмы взаимодействия специалистов; этапность реабилитационного процесса.

5) *ОМ администрирования МДРК* задаёт формат хранения и управления данными об участниках реабилитационного процесса и обеспечивает: учёт всех специалистов, вовлечённых в процесс реабилитации; определение роли специалиста в команде; контроль прав доступа к данным пациента в зависимости от роли специалиста; логирование действий для аудита и отчётности; синхронизацию с организационными структурами медучреждения.

6) *ОМ содержимого медицинских справочников* обеспечивает: стандартизацию форматов представления клинических данных; согласование с международной клинической терминологией.

7) *База медицинских наблюдений и справочников (БМН)*, сформированная на основе соответствующей ОМ, является: расширяемой (позволяет динамически дополнять термины и связи в соответствии с развитием медицины и клинических стандартов); структурированной по ключевым разделам (медицинские расстройства, диагнозы, процедуры и вмешательства, медицинские изделия); выполняющей терминологическую унификацию используемых понятий; обеспечивающей семантическую согласованность между всеми ресурсами. Множество терминов БМН покрывает потребности описания знаний (в т.ч. инструкций из клинических рекомендаций) и составления сопутствующих реабилитационному процессу документов. Имена и/или значения терминов соотнесены с названиями и кодами из российских и международных номенклатурных перечней и классификаторов (в т.ч. *SNOMED CT*⁴).

² *IACPaaS (Intelligent Applications, Control and Platform as a Service)* – облачная платформа для разработки, управления и удалённого использования интеллектуальных облачных сервисов. <https://iacpaas.dvo.ru/>.

³ МКФ - Международная классификация функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья. <https://ergotherapy.ru/wp-content/uploads/2017/05/Mezhdunarodnaya-klassifikatsiya.pdf>.

⁴ *SNOMED CT* (Систематизированная медицинская номенклатура – Клинические термины) – это систематизированная машинно-обрабатываемая медицинская номенклатура. <https://www.snomed.org/what-is-snomed-ct>.

На рисунке 1 представлена схема разработанных ОМ, стрелками указаны их связи с целевыми ресурсами: базами знаний (БЗ) и данными, необходимыми для интеллектуальной СППР при реабилитации.



Рисунок 1 – Схема онтологического комплекса для интеллектуальной системы поддержки принятия решений при реабилитации пациентов травматолого-ортопедического профиля

Для оптимизации доступа к кодам МКФ и Международной классификации болезней (МКБ⁵) в процессе диагностики, для обеспечения совместимости электронных медицинских записей с системами отчётности (например, на уровне кодирования медицинских процедур) разработано онтологическое представление ресурсов, где определены, структурированы и сгруппированы термины и их коды, используемые в практической деятельности. Например, для интеграции с МКФ при постановке реабилитационного диагноза множество узлов *Домен*, *Определители* и их значения установлены для категорий: *Функция организма*, *Активность и участие*, *Факторы окружающей среды*, *Структуры организма*.

ОМ пациента даёт возможность клиническим специалистам внести необходимые медицинские данные о пациенте, отразить их динамичность. ОМ пациента структурирована в соответствии с форматом реабилитационной карты пациента и позволяет каждому специалисту МДРК иметь своё информационное пространство для проведения коллегиальных осмотров и ведения дневников ежедневных осмотров. Модель задаёт формализованный вид данных, вводимых в медицинскую карту: каждый раздел структурирован под соответствующий класс данных, используемых в медицинской практике согласно шаблону реабилитационной карты. На рисунке 2 приведён фрагмент онтологии для документирования клинических данных в виде медицинской реабилитационной карты. Совокупность заполненных карт формирует информационный ресурс – коллекцию медицинских реабилитационных карт пациента.

ОМ клиниметрии – это система формальных правил описания оценочных шкал и тестов, включая их интерпретацию (см. рисунок 3). Модель отражает структуру теста, позволяя представить возможные вопросы и варианты ответов, ключи для оценки результатов, правила интерпретации полученных данных. В ходе анализа структуры тестов, применяемых для диагностики реабилитационного потенциала пациента, выделены следующие ключевые элементы онтологии: *Исследуемая область*, *Пункт*, *Вопрос*, *Ответ*, *Правило подсчёта*. Выявлена определённая группа тестов, в которых используется группировка вопросов. Для таких случаев введено понятие *Один вопрос из группы*, которое позволяет определять свою пару *Вопрос – Ответ* и величину соответствующих ответу баллов.

⁵ Международная классификация болезней 10-го пересмотра (МКБ-10). <https://mkb-10.com/>.

Введено понятие *Подробность* для фрагментирования длинных текстов вопросов: лаконичная часть используется как концепт, а сопровождающая текстовая часть даёт возможность представления вопроса в текстовом варианте, привычном для специалистов-пользователей. Баллы наполненного тестами ресурса используются для дальнейшего расчёта результатов теста на основе *Правила подсчёта* (например, суммирование всех баллов).

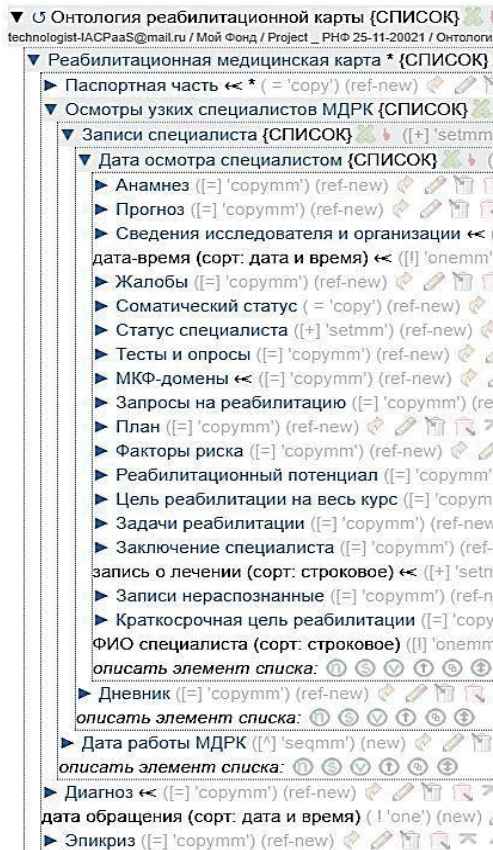


Рисунок 2 – Онтологическая модель пациента (фрагмент)

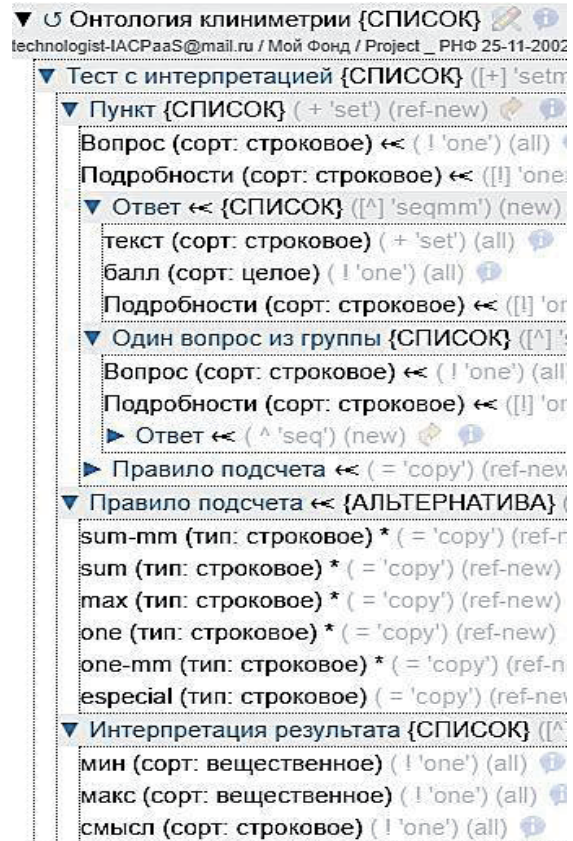


Рисунок 3 – Онтологическая модель клиниметрии (фрагмент)

В качестве примера (см. рисунок 4) предложен формализм шкал Гудвина [7] и Харриса [8], применяемых для оценки функциональных исходов хирургического лечения пациентов с переломами проксимального отдела бедренной кости. Эти шкалы позволяют оценить клинические исходы после остеосинтеза переломов проксимального отдела бедренной кости и эндопротезирования тазобедренного сустава. Шкала Гудвина для определения результатов операции на тазобедренном суставе включает качественную оценку критериев (боль, объём движений, ходьба), а результат оценивается как отличный, хороший, удовлетворительный, слабый и неудовлетворительный. Шкала Харриса для тазобедренного сустава содержит оценку четырёх категорий (боль, функция, деформация, амплитуда движений). Для каждой категории набирается определённое количество баллов. Максимальное число баллов равно 100. Сумма баллов от 90 до 100 оценивается как отличная функция сустава, от 80 до 89 – хорошая, от 70 до 79 – удовлетворительная и менее 70 – неудовлетворительная [8, 9].

Учитывая необходимость исследования каждого сустава по отдельности, для формализации шкалы Харриса используются вершины онтологии: *Исследуемая область*, которая имеет спецификатор $[+]\text{setmm}$ (пустое упорядоченное множество), что позволяет в целевом ресурсе генерировать некоторое множество необходимых вершин.

▼ База динамической клиниметрии в травматологической реабилитации [Онтология динамической клиниметрии в травматологической реабилитации]

technology-IACPaas@mail.ru / Мой Фонд / Project_RHФ 25-11-20021 / База динамической клиниметрии в травматологической реабилитации

▼ шкала Харриса [Тест с интерпретацией]

▼ Исследуемый левый тазобедренный сустав [Исследуемая область]

▼ Боль (выберите 1 вариант ответа) [Пункт]

▼ 1 [Ответ]

Отсутствует [текст (сорт: строковое)]

44 [балл (сорт: целое)]

▼ 2 [Ответ]

Слабая [текст (сорт: строковое)]

40 [балл (сорт: целое)]

▼ 3 [Ответ]

Умеренная (временами) [текст (сорт: строковое)]

30 [балл (сорт: целое)]

▼ 4 [Ответ]

Умеренная [текст (сорт: строковое)]

20 [балл (сорт: целое)]

▼ 5 [Ответ]

Сильная [текст (сорт: строковое)]

10 [балл (сорт: целое)]

▼ 6 [Ответ]

Невыносимая [текст (сорт: строковое)]

0 [балл (сорт: целое)]

► Хромота [Пункт]

► Опора [Пункт]

► Расстояние, преодолеваемое при ходьбе [Пункт]

► Сидение [Пункт]

► Пользование общественным транспортом [Пункт]

► Ходьба по лестнице [Пункт]

► Надевание обуви и носков [Пункт]

► Отсутствие деформации [Пункт]

► Объем движений (значение в норме) [Пункт]

► Разброс объема движений: [Пункт]

► Правило подсчета

▼ 1 [Интерпретация результата]

100.0 [макс (сорт: вещественное)]

90.0 [мин (сорт: вещественное)]

Отличная функция сустава [смысл (сорт: строковое)]

▼ 2 [Интерпретация результата]

89.0 [макс (сорт: вещественное)]

80.0 [мин (сорт: вещественное)]

Хорошая функция сустава [смысл (сорт: строковое)]

▼ 3 [Интерпретация результата]

79.0 [макс (сорт: вещественное)]

70.0 [мин (сорт: вещественное)]

Удовлетворительная функция сустава [смысл (сорт: строковое)]

▼ 4 [Интерпретация результата]

69.0 [макс (сорт: вещественное)]

0.0 [мин (сорт: вещественное)]

Неудовлетворительная функция сустава [смысл (сорт: строковое)]

► Исследуемый правый тазобедренный сустав [Исследуемая область]

Рисунок 4 – База динамической клиниметрии в травматологической реабилитации (фрагмент)

В данном примере это: *Исследуемый левый тазобедренный сустав, Исследуемый правый тазобедренный сустав*. Каждая порождённая вершина имеет идентичную внутреннюю структуру по причине единого онтологического «донора» (см. рисунок 5). Каждый вопрос шкалы соответствует онтологической структуре *Пункт*, в котором сгенерированы варианты ответов с текстовой их интерпретацией и балльным соответствием. Для каждой вершины внесены соответствующие правила подсчёта и логика интерпретации результатов.



Рисунок 5 – Множественное порождение вершины целевого ресурса (пример)

ОМ диагностических методик. Одним из главных этапов реабилитации пациента является постановка реабилитационного диагноза с использованием кодировки по доменам МКФ. В отличие от МКБ и Международной классификации нарушений⁶, которые сосредоточены на последствиях болезней с этиологической точки зрения, в МКФ предлагается классификация компонентов здоровья и оценивается функционирование и ограничения жизнедеятельности человека, используя биопсихосоциальный подход. Основная цель МКФ – интеграция данных о состоянии здоровья и динамике заболевания с учётом биологических, социальных и личностных аспектов. Реабилитационный диагноз представляет собой подробное описание нарушений структур и функций органов и систем, которые приводят к определённым ограничениям, и учитывает факторы окружающей среды, которые могут как облегчать, так и затруднять выполнение пациентом повседневных задач и функций [10].

ОМ диагностических методик в травматологии и ортопедии (см. рисунок 6), отражает структуру знаний, позволяющих выдвигать гипотезы о наличии определённого нарушения, кодируемого классификатором МКФ в рамках интеллектуальной поддержки МДРК. Данная модель содержит набор отношений, достаточный для связывания элементов клинической картины пациента с кодом МКФ и определителем степени тяжести.

Знания группируются под узлами-вершинами: В, D, S, E (МКФ домены: функции организма, структуры организма, активность и участие, факторы окружающей среды). Информация соответствует элементам структуры: МКФ название – код и имя МКФ классификатора; МКФ код – диагностируемый код МКФ классификатора с соответствующим определителем.

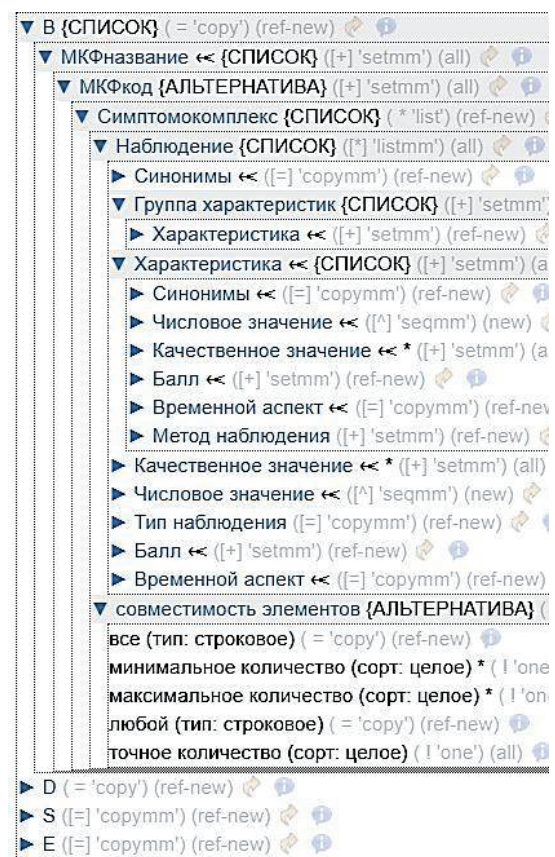


Рисунок 6 – Онтологическая модель диагностических методик в травматологии и ортопедической реабилитации (фрагмент)

⁶ МКФ - Международная классификация функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья. <https://ergotherapy.ru/wp-content/uploads/2017/05/Mezhdunarodnaya-klassifikatsiya.pdf>.

Симптомокомплекс предназначен для группировки клинически значимых наблюдений, включая результаты тестов.

Наблюдение – единица, отражающая клинически значимые данные пациента. Каждое наблюдение можно выразить в простом варианте его описания или используя множество элементов или характеристик. К ним относятся и итоговые результаты проведения тестирования и опросов по шкалам, и результаты отдельных вопросов таких тестов.

Тип наблюдения представляет принадлежность к категории (*метрика, наследственность, образ жизни, лабораторное исследование, осмотр, заболевание* и т.д.) для различения вводимых элементов. **Совместимость элементов** используется для определения полноты диагностируемых состояний через определение сочетаемости наблюдений. Используются определения: *минимальное количество, любой, все*.

Справочник медицинских терминов и наблюдений. Справочники необходимы для согласованного взаимодействия участников, корректного употребления терминов при описании особенностей пациента, полученной травмы, реабилитационных методик и лечебных мероприятий, особенностей восстановительного потенциала пациента и т.д. Для поддержки формирования номенклатуры согласованных терминов и клинических данных сформирована **ОМ содержимого медицинских справочников**, апробированная на платформе *IACPaas*. В ней группируются перечни наблюдаемых фактов разного типа, позволяя описывать интересующее **Наблюдение** с использованием простого представления или с использованием множества элементов или характеристик. Для жалоб и нарушений структура БМН позволяет вносить данные через управляющий узел *Наличие отклонений от нормы*, открывающий на следующем уровне возможность подробного описания.

Справочники медицинских терминов отвечают современным требованиям электронного здравоохранения обширным содержанием с детализацией терминов-наблюдений состояния пациентов и с указанием международных названий и кодов терминов (в т.ч. *SNOMED CT*) для стандартизации медицинской документации (см. рисунок 7). В частности, в [11] представлена выборка приоритетных кодов и их описание по МКФ, которые необходимы при постановке реабилитационного диагноза у пациентов при патологии опорно-двигательной системы: изменение и поддержание положения тела (d410-d429); ходьба и передвижение (d450-d469); передвижение и использование транспорта (d470-d489); приобретение предметов первой необходимости (d610-d629) и др. Реабилитационный диагноз описывается в категориях МКФ, имеющих четыре уровня детализации нарушения структур, функций, жизнедеятельности и факторов среды. Интеграции со справочником помогает вложенная структура от метапонятия *Домен* до комплекса *Определителей* через *Узел*, представляющий код нарушения.

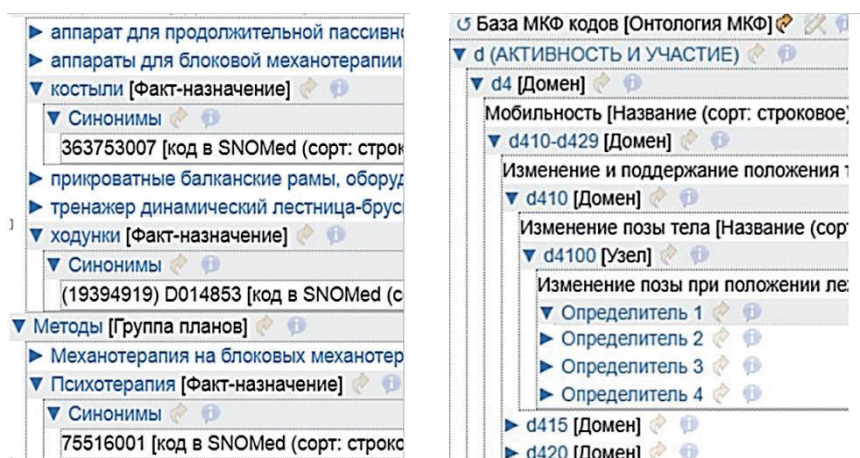


Рисунок 7 – Фрагменты номенклатурных справочников (слева *SNOMED CT*, справа МКФ)

ОМ администрирования (А) и междисциплинарного взаимодействия (Б) обеспечивают процесс формирования плана работы реабилитационной бригады (см. рисунок 8).

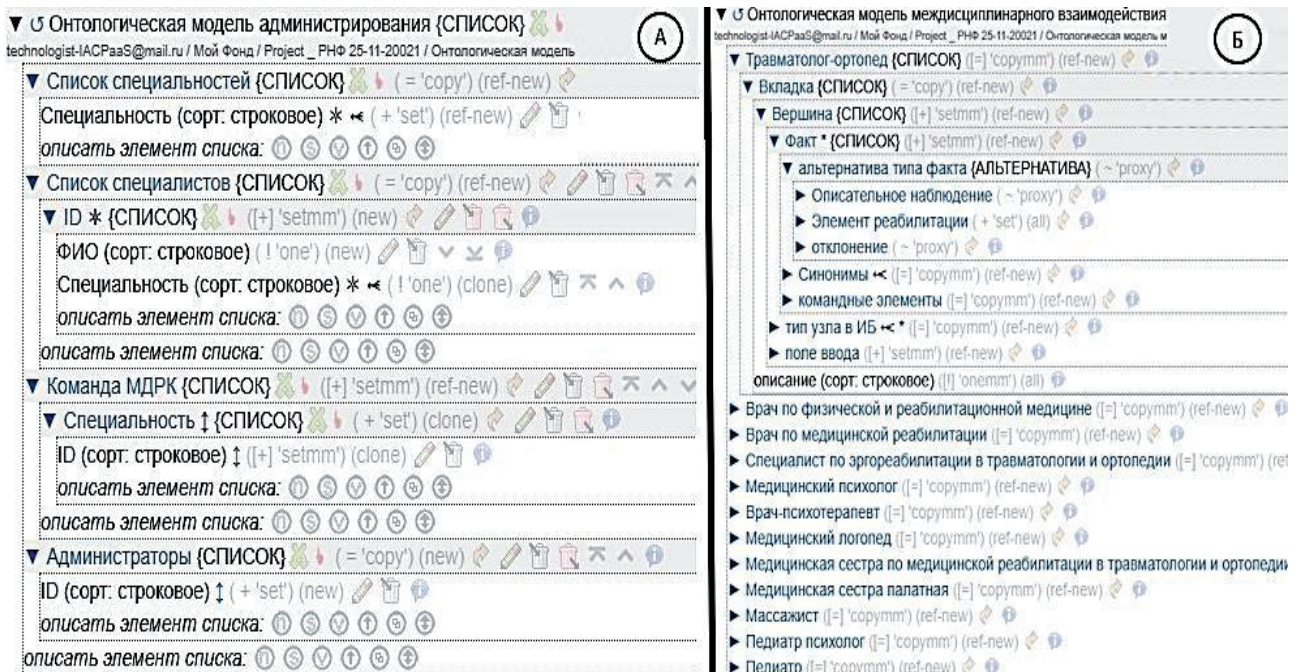


Рисунок 8 – Онтологическая модель управления мультидисциплинарной реабилитационной командой

ОМ междисциплинарного взаимодействия предназначена для декларативного описания сценария работы врача через комплекс *Вкладок* с множеством элементов *Вершина* для документирования опроса, осмотра пациента, анамнеза заболевания, формирования плана реабилитации, проведение тестирования пациента с использованием утверждённых шкал и тестов. ОМ обеспечивает формирование структурированных *шаблонов* ввода информации (и правил ввода данных в пользовательском интерфейсе) разными *специалистами* МДРК, а также правила формирования отчётов по реабилитации пациентов.

ОМ администрирования предназначена для координации между специалистами, сокращения ошибок администрирования и обеспечения открытости реабилитационного процесса в МДРК и представляет собой структуру, задающую формат хранения списка всех вовлечённых в реабилитацию участников с указанием медицинской специальности и принадлежностью МДРК. ОМ имеет следующие корневые понятия: список специальностей, список специалистов, команда МДРК, администраторы. Список специальностей организован как множество возможных специальностей, определяющих МДРК. Список специалистов реализован как множество *ID*, состоящее из ФИО (Фамилия Имя Отчество) и специальностей. МДРК включает множество пар *ID* и специальность. Администраторы – вершина, формирующая некоторое множество *ID* лиц, допущенных к принятию административных решений.

3 Обсуждение

В работе представлен комплекс ОМ для СППР в реабилитации пациентов травматологического профиля, обеспечивающий полный цикл разработки онтологий, графовых БЗ, а также основанных на них СППР [12]. К наиболее известным медицинским онтологиям

можно отнести клинические онтологии *SNOMED CT*, *UMLS*⁷, *ICD-11*⁸, различные специализированные онтологии (например, онтология сердечно-сосудистых заболеваний [13], онтология диабета [14], онтология рака [15], онтология *COVID* - 19 [16] и др.; онтологии для конкретных медицинских задач (например, онтология лекарственных средств [17], онтология побочных эффектов [18], онтология медицинских устройств [19], онтология клинических анализов [20], онтологии для реабилитации [21], онтология функционального восстановления [22], онтология инвалидности [23]). Анализ медицинских онтологий показал, что каждая из них имеет специфическую область использования, уникальную структуру понятий, особые механизмы актуализации, конкретные сферы применения в клинической практике.

Представленный в данной работе комплекс онтологий обладает рядом принципиальных отличий от других медицинских ОМ. Наиболее существенным является предложенная форма ОМ, позволяющая создавать актуальные БЗ, управлять ими и использовать в СППР. Новизна содержания заключается в предназначении для поддержки комплексной оценки состояния пациента с использованием МКФ. Это позволяет учитывать нозологическую форму заболевания и весь спектр функциональных возможностей пациента, включая двигательные функции, когнитивные способности, психологическое состояние и факторы окружающей среды, что особенно важно для разработки эффективных реабилитационных программ.

Важной особенностью является применение онтологических компонентов для реализации гибкой программно-сервисной поддержки системного подхода к процессу диагностики и планирования реабилитации. Это позволяет управлять составом специалистов МДРК: физиотерапевтов, эрготерапевтов, психологов и др. Командный подход соответствует клиническим рекомендациям Министерством здравоохранения РФ. Состав МДРК обеспечивает учёт всех аспектов состояния пациента, позволяет разрабатывать индивидуальные программы реабилитации.

Список источников

- [1] **Погонченкова И.В., Рассулова М.А., Макарова М.В.** Система организации медицинской помощи по профилю «медицинская реабилитация» больным, перенесшим эндопротезирование в Москве. *Московская медицина*. 2018. № 5(27). С.44-49. EDN: VNVPQI.
- [2] **Амбражук И.И., Яковлев М.Ю., Фесюн А.Д.** Отечественный опыт в разработке стратегии развития отделений медицинской реабилитации. *Russian journal of rehabilitation medicine*. 2018. №3. С.42-49.
- [3] **Колышенков В.А., Решетников Р.В., Шумская Ю.Ф., Омельянская О.В., Владимирский А.В.** Возможности применения телемедицинских технологий в реабилитации пациентов травматолого-ортопедического профиля. *Russian Journal of Environmental and Rehabilitation Medicine*. 2023. № 3. С.60-70.
- [4] **Папина И.В., Арсентьев В.В., Телегин Р.С.** Методика роботизированной реабилитации как средства восстановления двигательного акта ходьбы. *Modern Humanities Success*. 2024. № 1. С.212-217. DOI: 10.58224/2618-7175-2024-1-212-217.
- [5] **Антоненков Ю.Е., Кириленко К.Ю., Чернов А.В., Титова С.Н.** Современные проблемы организации ортопедической помощи населению (обзор). *Вестник Всероссийского общества специалистов по медико-социальной экспертизе, реабилитации и реабилитационной индустрии*. 2023. №1. С.68-81. DOI: 10.17238/issn1999-2351.2023.1.68-81.
- [6] **Грибова В.В., Шалфеева Е.А.** Обеспечение жизнеспособности систем, основанных на знаниях. *Информационные технологии*. 2019. Т.25. №12. С.738-746. DOI: 10.17587/it.25.738-746.
- [7] **Goodwin R.A.** The Austine Moore prothesis in fresh femoral neck fractures. A review of 611 post-operative cases. *Am. J. Orthop.Surg.* 1968. Vol.10. №2. P.40-43.

⁷ *Unified Medical Language System (UMLS)* - средство для разработки компьютерных систем в сфере здравоохранения. Разработка начата в 1986 году в Национальной медицинской библиотеке США. <https://www.nlm.nih.gov/research/umls/index.html>.

⁸ *International Classification of Diseases 11th Revision (ICD-11)*. МКБ-11 — одиннадцатый пересмотр Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем. <https://icd.who.int/en>.

- [8] **Harris W.H.** Traumatic arthritis of the hip after dislocation and acetabular fractures: treatment of mold arthroplasty. An end-result study using a new method of result evaluation. *J Bone Joint Surg Am.* 1969. Vol.51. №4. P.737-755.
- [9] **Загородний Н.В., Еремушкин М.А.** Методическое пособие по эндопротезированию тазобедренного сустава с реабилитацией. М., 2019. 40 с. <https://ds8mos.ru/wp-content/uploads/2021/07/Metodich-posobie-po-endoprotezirovaniyu-15.02.pdf>.
- [10] **Ivanova G.E., Bodrova R.A., Builova T.V., Karimova G.M., Komarnitsky V.S.** Algorithm for formulation a rehabilitation diagnosis using the international classification of functioning in a patient with a stroke: clinical case. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2022. Vol.4. №1. P.37-54. DOI: 10.36425/rehab96918.
- [11] **Цыкунов М.Б.** Реабилитационный диагноз при патологии опорно-двигательной системы с использованием категорий международной классификации функционирования. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* 2019. Т.1. № 2. С.107-125.
- [12] **Gribova V.V., Moskalenko P.M., Timchenko V.A., Shalfeeva E.A.** The IACPaaS Platform for Developing Systems Based on Ontologies: A Decade of Use. *Scientific and Technical Information Processing.* 2024. Vol.50. №5. P.406-413. DOI: 10.3103/S0147688223050064.
- [13] **Chaleplioglou A., Poulos M., Papavlasopoulos S.** The Development of a Cardiological Ontology to Describe Medical, Genetic and Pharmaceutical Entities and Interplay // 2018 5th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI), Corfu, Greece. IEEE, 2018. P.34-39, DOI: 10.1109/MCSI.2018.00017.
- [14] **El-Sappagh S., Ali F.** DDO: a diabetes mellitus diagnosis ontology. *Applied Informatics.* 2016. T.3. C.1-28. DOI: 10.1186/s40535-016-0021-2.
- [15] **Kumar A., Smith B.** Oncology ontology in the NCI thesaurus // In: Miksch, S., Hunter, J., Keravnou, E.T. (eds) *Artificial Intelligence in Medicine. AIME 2005. Lecture Notes in Computer Science*, vol.3581. Berlin: Heidelberg Springer, 2005. P.213-220. DOI: 10.1007/11527770_30.
- [16] **He Y., Yu H., Ong E., et al.** CIDO: The Community-Based Coronavirus Infectious Disease Ontology // Proceedings of the 11th International Conference on Biomedical Ontologies (ICBO) and 10th Workshop on Ontologies and Data in Life Sciences (ODLS). 2021. <https://philpapers.org/rec/HECTC>. (дата обращения 04.07.2025).
- [17] **Hanna J., Joseph E., Brochhausen M., Hogan W.R.** Building a drug ontology based on RxNorm and other sources. *Journal of biomedical semantics.* 2013. Vol.4. P.1-9. DOI: 10.1186/2041-1480-4-44.
- [18] **He Y., Sarntivijai S., Lin Y., et al.** OAE: the ontology of adverse events. *Journal of biomedical semantics.* 2014. Vol.5. P.1-13. DOI: 10.1186/2041-1480-5-29.
- [19] **Santos I.C.T., Gazelle G.S., Rocha L.A., Tavares J.M.R.** An ontology model for the medical device development process in Europe // The 1st International Conference on Design and Processes for Medical Devices-PROMED 2012. 8 p.
- [20] **Huser V., Taft L.M., Cimino J.J.** Suitability of LOINC document ontology as a reference terminology for clinical document types: a case report of a research-oriented EHR. 2023. DOI: 10.20935/AcadQuant7613.
- [21] **Berges I., Antón D., Bermúdez J., Goñi A., Illarramendi A.** TrhOnt: building an ontology to assist rehabilitation processes. *Journal of biomedical semantics.* 2016. Vol. 7. P.1-21. DOI: 10.1186/s13326-016-0104-y.
- [22] **Townsend C., Huang J., Dou D., Liu H., He L., Hayes P., Rudnick R., Shah H., Fell D., Liu W.** Ontology-based knowledge acquisition for neuromotor functional recovery in stroke // 2010 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine Workshops (BIBMW), Hong Kong, China, 2010. P.424-429. DOI: 10.1109/BIBMW.2010.5703839.
- [23] **Spoladore D., Sacco M., Trombetta A.** A review of domain ontologies for disability representation. *Expert Systems with Applications.* 2023. Vol.228. P.120467. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120467.

Сведения об авторах



Грибова Валерия Викторовна, 1965 г.рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт (1989). Заместитель директора по научной работе, научный руководитель лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН, д.т.н. (2008), чл.-корр. РАН (2022). Научные интересы: онтологии и БЗ, прикладные и проблемно-ориентированные системы, основанные на знаниях, управление БЗ. В списке научных трудов более 400 работ. Author ID (РИНЦ): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru.

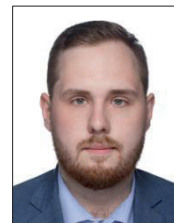
Шалфеева Елена Арефьевна, 1967 г. рождения. Окончила математический факультет Дальневосточного государственного университета (1989), д.т.н. (2022). Ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН, доцент. В списке научных трудов более 120 работ. Author ID (Scopus): 6508163590; ORCID: 0000-0001-5536-2875. shalfe@dvo.ru.



Окунь Дмитрий Борисович, 1973 г. рождения. Окончил Владивостокский государственный медицинский университет (1996), к.м.н. (2000). Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН. Author ID (РИНЦ): 642886; Author ID (Scopus): 57204598165; SPIN-код: 8390-2749; ORCID: 0000-0002-6300-846X. okdm@iacp.dvo.ru. ✉.



Шевченко Олег Николаевич, 1999 г. рождения. Аспирант, ведущий инженер-программист лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН. Научные интересы: онтологии и базы знаний, интеллектуальные системы поддержки принятия решений. ORCID: 0009-0002-5766-8055. oleg-555-13@mail.ru.



Поступила в редакцию 07.07.2025, после рецензирования 15.08.2025. Принята к публикации 25.08.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-509-522

Ontological knowledge representation framework for rehabilitation of traumatology and orthopedic patients

© 2025, V.V. Gribova, E.A. Shalfeeva, D.B. Okun ✉, O.N. Shevchenko

Institute for Automation Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract

Systematic structuring of clinical data provides a comprehensive foundation for assessing the degree of functional impairment, activity level, and patient engagement in the rehabilitation process for traumatology and orthopedic cases. To standardize the representation of medical knowledge and establish a unified semantic environment for all participants in rehabilitation, an ontology-oriented approach to information system development has been adopted. The paper presents a set of interconnected, logically consistent ontological models that form the semantic core of an intelligent decision support system for medical rehabilitation. Models of medical diagnostics, rehabilitation procedure planning, and patient progress evaluation have been developed. The practical implementation of the proposed ontological framework is based on the IACPaaS cloud platform. The specialized resources and software tools derived from these ontological models constitute the foundation of a trauma surgeon's decision support system.

Keywords: decision support, knowledge base, ontology, knowledge engineering, patient rehabilitation, traumatology.

For citation: Gribova VV, Shalfeeva EA, Okun DB, Shevchenko ON. Ontological knowledge representation framework for rehabilitation of traumatology and orthopedic patients [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 509-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-509-522.

Financial Support: The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation (project no. 25-11-20021).

Authors' contributions: Gribova V.V. – development of the research concept and plan, formulation of research objectives and tasks. Shalfeeva E.A. – development of ontological models. Okun D.B. – collection and analysis of medical knowledge, population of information resources. Shevchenko O.N. – ontological engineering and deployment of information resources.

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

List of figures

- Figure 1 – Structure of the ontological framework for an intelligent decision support system in the rehabilitation of traumatology and orthopedic patients
 Figure 2 – Ontological model of the patient (fragment)
 Figure 3 – Ontological model of clinimetry (fragment)
 Figure 4 – Database of dynamic clinimetry in trauma rehabilitation (fragment)
 Figure 5 – Multiple generation of a target resource node (example)
 Figure 6 – Ontological model of diagnostic methods in traumatological and orthopedic rehabilitation (fragment)
 Figure 7 – Fragments of nomenclature reference books
 Figure 8 – Ontological model for managing a multidisciplinary rehabilitation team

References

- [1] **Pogonchenkova IV, Rassulova MA, Makarova MV.** The system of organization of medical care in the field of "medical rehabilitation" for patients who have undergone endoprosthetic replacement in Moscow [In Russian]. *Moskovskaya medicina*. 2018; 5(27): 44-49.
- [2] **Ambrazhuk II, Yakovlev MYu, Fesyun AD.** Russian experience in developing a strategy for development of medical rehabilitation departments [In Russian]. *Russian journal of rehabilitation medicine*. 2018; 3: 42-49.
- [3] **Kolyshenkov VA, Reshetnikov RV, Shumskaya YF, Omelyanskaya OV, Vladzimirskyy AV.** Opportunities for applying telemedicine technologies in the rehabilitation of traumatology and orthopedic patients [In Russian]. *Russian Journal of Environmental and Rehabilitation Medicine*. 2023; 3: 60-70.
- [4] **Papina IV, Arsentiev VV, Telegin RS.** Method of robotic rehabilitation as a means of restoring motor act of walking [In Russian]. *Modern Humanities Success*. 2024; 1: 212-217. DOI 10.58224/2618-7175-2024-1-212-217.
- [5] **Antonov YuE, Kirilenko KYu, Chernov AV, Titova SN.** Modern problems of the organization of orthopedic care to the population (review) [In Russian]. *Vestnik Vserossiyskogo obshchestva specialistov po mediko-social'noj ekspertize, reabilitacii i reabilitacionnoj industrii*. 2023; 1: 68-81. DOI 10.17238/issn1999-2351.2023.1.68-81.
- [6] **Gribova VV, Shalfeeva EA.** Ensuring of Viability of Systems Based on Knowledge. [In Russian]. *Information technology*. 2019; 25(12): 738-746.
- [7] **Goodwin RA.** The Austine Moore prothesis in fresh femoral neck fractures. A review of 611 post-operative cases. *Am. J. Orthop. Surg.* 1968; 10(2): 40-43.
- [8] **Harris WH.** Traumatic arthritis of the hip after dislocation and acetabular fractures: treatment of mold arthroplasty. An end-result study using a new method of result evaluation. *J Bone Joint Surg Am.* 1969; 51(4): 737-755.
- [9] **Zagorodnij NV, Eremushkin MA.** Methodical manual on hip arthroplasty with rehabilitation [In Russian]. Moscow, 2019. 40 p. <https://ds8mos.ru/wp-content/uploads/2021/07/Metodich-posobie-po-endoprotezirovaniyu-15.02.pdf>.
- [10] **Ivanova GE, Bodrova RA, Builova TV, Karimova GM, Komarnitsky VS.** Algorithm for formulation a rehabilitation diagnosis using the international classification of functioning in a patient with a stroke: clinical cas. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2022; 4(1): 37-54. DOI: 10.36425/rehab96918.
- [11] **Tsykunov MB.** Rehabilitation diagnosis in the pathology of the musculoskeletal system using the categories of the international classification of functioning [In Russian]. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2019; 1(2): 107-125.
- [12] **Gribova VV, Moskalenko PM, Timchenko VA, Shalfeeva EA.** The IACPaaS Platform for Developing Systems Based on Ontologies: A Decade of Use. *Scientific and Technical Information Processing*. 2023; 50(5): 406-413
- [13] **Chalepliglou A, Poulos M, Papavlasopoulos S.** The Development of a Cardiological Ontology to Describe Medical, Genetic and Pharmaceutical Entities and Interplay. In: 2018 5th Int. Conf. on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI), Corfu, Greece. IEEE, 2018: 34-39, DOI: 10.1109/MCSI.2018.00017.
- [14] **El-Sappagh S, Ali F.** DDO: a diabetes mellitus diagnosis ontology. *Applied Informatics*. 2016; 3: 1-28. DOI: 10.1186/s40535-016-0021-2.
- [15] **Kumar A., Smith B.** Oncology ontology in the NCI thesaurus. In: Miksch, S., Hunter, J., Keravnou, E.T. (eds) *Artificial Intelligence in Medicine. AIME 2005. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Heidelberg Springer, 2005; 3581: 213-220. DOI: 10.1007/11527770_30.
- [16] **He Y, Yu H, Ong E, et al.** CIDO: The Community-Based Coronavirus Infectious Disease Ontology. In: Proc. of the 11th Int. Conf. on Biomedical Ontologies (ICBO) and 10th Workshop on Ontologies and Data in Life Sciences (ODLS). 2021. <https://philpapers.org/rec/HECTC>. (accessed 4 June 2025).
- [17] **Hanna J, Joseph E, Brochhausen M, Hogan WR.** Building a drug ontology based on RxNorm and other sources. *Journal of biomedical semantics*. 2013; 4: 1-9. DOI: 10.1186/2041-1480-4-44.

- [18] **He Y, Sarntivijai S, Lin Y, et al.** OAE: the ontology of adverse events. *Journal of biomedical semantics*. 2014; 5: 1-13. DOI: 10.1186/2041-1480-5-29.
 - [19] **Santos ICT, Gazelle GS, Rocha LA, Tavares JMR.** An ontology model for the medical device development process in Europe. In: *The 1st Int. Conf. on Design and Processes for Medical Devices-PROMED 2012*. 8 p.
 - [20] **Huser V, Taft LM, Cimino JJ.** Suitability of LOINC document ontology as a reference terminology for clinical document types: a case report of a research-oriented EHR. 2023. DOI: 10.20935/AcadQuant7613.
 - [21] **Berges I, Antón D, Bermúdez J, Goñi A, Illarramendi A.** TrhOnt: building an ontology to assist rehabilitation processes. *Journal of biomedical semantics*. 2016; 7: 1-21. DOI: 10.1186/s13326-016-0104-y.
 - [22] **Townsend C, Huang J, Dou D, Liu H, He L, Hayes P, Rudnick R, Shah H, Fell D, Liu W.** Ontology-based knowledge acquisition for neuromotor functional recovery in stroke. In: *2010 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine Workshops (BIBMW)*. Hong Kong, China, 2010: 424-429. DOI: 10.1109/BIBMW.2010.5703839.
 - [23] **Spoladore D, Sacco M, Trombetta A.** A review of domain ontologies for disability representation. *Expert Systems with Applications*. 2023; 228: 120467. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120467.
-

About the authors

Valeriya Viktorovna Gribova (b. 1965) graduated from Leningrad Polytechnic Institute (1989), Doctor of Technical Sciences (2008), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (2022), Deputy Director for Scientific Work, Scientific supervisor of the Laboratory of Intelligent Systems at Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS. The scientific interests are ontologies and knowledge bases, applied and problem-oriented systems based on knowledge. There are more than 400 works in the list of scientific papers. Author ID (RSCI): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru

Elena Arefjevna Shalfeeva (b. 1967) graduated from the Faculty of Mathematics at Far Eastern State University with a degree in Applied Mathematics in 1989, Doctor of Technical Sciences (2022). Leading Researcher at the Laboratory of Intelligent Systems at the Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS, Associate Professor. In her list of scientific works there are over 120 publications. Author ID (Scopus): 6508163590; ORCID: 0000-0001-5536-2875. shalfe@dvo.ru.

Okun Dmitry Borisovich (b. 1973) graduated from Vladivostok State Medical University with a degree in General Medicine in 1996, Candidate of Medical Sciences (2000). Senior Researcher at the Laboratory of Intelligent Systems at the Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS. Author ID (Scopus): 57204598165; SPIN-код: 8390-2749; ORCID: 0000-0002-6300-846X. okdm@iacp.dvo.ru. ✉.

Oleg Nikolaevich Shevchenko (b. 1999) is a postgraduate student at the Institute for Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. He is a leading software engineer at the A.S. Kleshchev Laboratory of Intelligent Systems. His scientific interests include ontologies and knowledge bases, and intelligent decision support systems. ORCID: 0009-0002-5766-8055. oleg-555-13@mail.ru.

Received July 7, 2025. Revised August 15, 2025. Accepted August 25, 2025.



Проекционный принцип построения функционально-воксельных моделей

© 2025, А.В. Толок ✉, Н.Б. Толок

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

Аннотация

Рассматривается проблема автоматизированного получения пространственной цифровой модели по плоским чертежам. Об актуальности свидетельствует множество существующих подходов к её решению. Новым является использование аналитического R-функционального геометрического моделирования к решению задач на основе структурного подхода к конструированию описания аналитическими функциями сложного геометрического объекта. Обсуждаются принципы компьютерного аналитического конструирования сложных геометрических объектов с применением функционально-воксельного моделирования (ФВ-моделирование). Такое моделирование обеспечивает переход от непрерывного представления области аналитических функций к дискретно-непрерывному компьютерному аналогу, базирующемуся на графических многомерных образах-моделях, позволяющих хранить информацию о локальной функции в каждой точке дискретной области. Принципы ФВ-моделирования применены к функциям R-функционального моделирования, составляющего основу аналитических конструкций сложного геометрического объекта. Показана возможность изменения размерности пространства аргумента путём добавления дополнительной или изъятия лишней локальной геометрической характеристики, позволяющей описать влияние такого аргумента на поведение формулируемой функции. Рассматривается принцип увеличения размерности ФВ-модели области плоской функции для последующего применения средств R-функционального моделирования на трёхмерной области. Применение принципа ФВ-моделирования функций В.Л. Рвачёва позволяет обеспечить переход к расчёту локальных геометрических характеристик линейной функции, что снижает сложность компьютерного представления R-функциональной модели. На основе закона вращения в плоскости вокруг ортогональной оси разработан принцип вращения ФВ-модели, позволяющий на основе плоской ФВ-модели для функции-проекции построить пространственную ФВ-модель фигуры вращения. Разработанные инструменты ФВ-моделирования можно рассматривать как дополнительный инструмент к решению основной задачи 3D-моделирования по плоским проекциям (чертежам).

Ключевые слова: R-функция, проекция, функционально-воксельная модель, M-образ, локальная функция, пересечение, закон вращения.

Цитирование: Толок А.В., Толок Н.Б. Проекционный принцип построения функционально-воксельных моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №4(58). С.523-534. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-523-534.

Вклад авторов: Толок А.В. – разработаны теоретические принципы проекционного подхода в аналитическом моделировании геометрических объектов; Толок Н.Б. – проведена практическая апробация принципов с компьютерной реализацией на представленных примерах.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Задача автоматизации построения пространственной модели по её чертежам является актуальной, поскольку с приходом автоматизированных подходов к проектированию возникла задача заполнения баз данных конструкций [1-7]. Задача состоит в описании модели объекта в 3D-пространстве, что влечёт за собой описание проекционных связей между проекциями и обеспечение перехода к другому измерению каждого из пространственных элементов, составляющих геометрический объект. Подходы к такому переходу средствами параметриза-

ции, предложенные в [1], а также в других отечественных [2-5] и зарубежных работах [6-8], позволяют подойти к решению задачи, но пока не привели к полноценному алгоритму построения цифровой 3D-модели, обеспечивающей требуемую точность описания поверхностей объектов параметрическими функциями. Интересные результаты достигнуты в [9] посредством применения искусственного интеллекта при распознавании чертежа. В этой работе, несмотря на воксельное представление результата, «теряются» основные геометрические характеристики восстанавливаемого объекта. Задачу увеличения размерности геометрического объекта целесообразно привести к обобщённому виду для многомерного пространства.

1 Постановка задачи

Один из прогрессивных подходов к многомерному геометрическому моделированию на базе функций В.Л. Рвачёва [10] (*R*-функциональное моделирование, *RFM*) описан в [11, 12]. Суть подхода – в моделировании плоского контура чертежа аналитическими функциями, описывающими области значений, характеризующих нулевую границу плоского геометрического объекта, положительную зону значений внутри и отрицательную снаружи. В аналитическом представлении геометрический объект легко поддаётся увеличению размерности его пространства. В качестве примера предлагается рассмотреть принцип построения четырёхмерного пространства аргумента для заданной функции $y = f^{[1]}(x)$ одномерного пространства (в квадратных скобках указывается размерность пространства аргумента функции). На рисунке 1 изображен график функции для одномерного пространства аргумента.

Перенос значения переменной y в правую часть уравнения переводит её в аргумент, а уравнение при этом приобретает неявный вид:

$$f^{[2]}(x, y) = f^{[1]}(x) - y = 0.$$

Все точки на кривой приобретают нулевое значение, а закон рассматриваемой кривой определяется поверхностью для двухмерного пространства аргумента как показано на рисунке 2 и записывается как: $z = f^{[2]}(x, y)$.

Повторение этой процедуры к вновь полученному уравнению преобразует функцию к неявному виду:

$$f^{[3]}(x, y, z) = f^{[2]}(x, y) - z = 0 \text{ или } u = f^{[3]}(x, y, z).$$

Значения u теперь обнуляются на поверхности и образуют трёхмерные области положительных и отрицательных значений (рисунок 3).

Процесс можно продолжать далее, наращивая размерность пространства аргумента, однако зрительно сложно себе представить получаемые геометрические объекты.

Аналитический подход к описанию геометрических моделей сопровождается сложными вычислениями и долгое время считался непригодным для автоматизации. Попытки применения *RFM* к построению поверхностных моделей [13] привели к значительной потере полезных данных, содержащихся на области описываемого функционала и, главное, к потере основного свойства увеличения размерности. В [14, 15] предложен метод функционально-воксельного моделирования (ФВ-моделирование), позволивший построить компьютерную модель таким образом, что она в целом сохраняет свойства аналитической модели на выбранной области в многомерном пространстве. Исследования показали, что такой подход к моделированию может позволить решать различные задачи геометрического моделирования на компьютере [16-19], а также вполне применим к задаче построения пространственного геометрического объекта по его аналитическим проекциям (чертежам). В предлагаемом материале ставится задача сформулировать аналитические принципы основных процедур получения описания 3D геометрического объекта по его плоским проекциям, описанным аналитическими функциями, представленными на компьютере в виде ФВ-моделей.

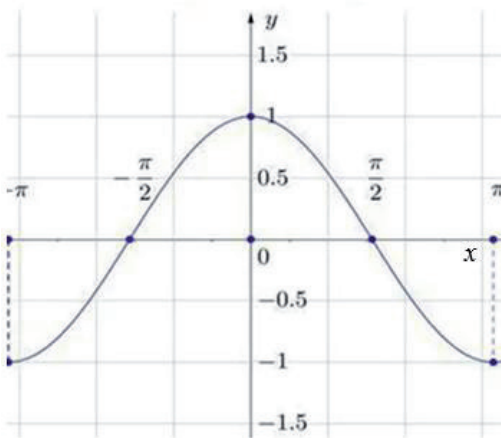


Рисунок 1 – График функции $y = \cos x$

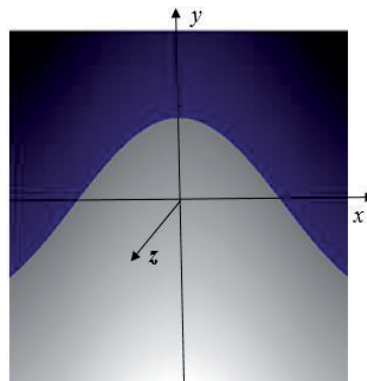
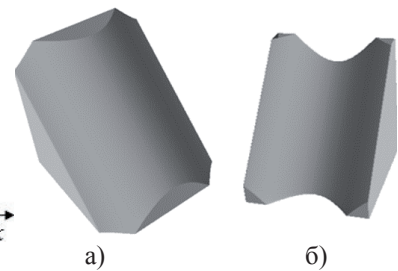


Рисунок 2 – График функции $z = \cos x - y$



а) область положительных значений
б) область отрицательных значений

Рисунок 3 – Значения области функции $u = \cos x - y - z$

2 Функционально-воксельное моделирование

Метод ФВ-моделирования хорошо зарекомендовал себя в ряде прикладных направлений, среди которых: компьютерное моделирование R -функциями объектов аналитической геометрии, решение задач многомерного моделирования, расчёт физических характеристик в инженерных задачах, прокладка градиентного спуска с учётом препятствий к намеченной цели в задачах оптимизации. При этом аналитическая функция $F(X_m) = 0$, описывающая геометрический объект, представляется набором графических M -образов $(M_1, \dots, M_{m+1})$, содержащих данные для формирования области локальных функций $L(X_m, N_{m+1}) = 0$. Здесь N_{m+1} – компоненты нормированного однородного вектора градиента в рассматриваемой точке. Каждая локальная функция моделирует линейную аналитическую зависимость $n_1 x_1 + \dots + n_m x_m + n_{m+1} = 0$, поведение которой в рассматриваемой точке полностью соответствует исходной аналитической функции $F(X_m) = 0$, что позволяет использовать её в дальнейших расчётах. Такой подход к представлению геометрической информации позволяет решать задачи компьютерного моделирования на уровне применения локальных функций в каждой точке рассматриваемой области. Подобное представление функции позволяет применять к ФВ-моделям функциональные операции, что значительно расширяет возможности моделирования многомерных геометрических объектов сложной формы, выполняя такие упрощённые вычисления.

Размерность пространства для функции определяет количество её аргументов, поэтому количество слагаемых локальной функции определяется количеством аргументов, увеличенным на два слагаемых. Например, функция $z = f(x, y)$ имеет два аргумента x, y , а значит четыре слагаемых определяют локальную функцию; $n_1 x + n_2 y + n_3 z + n_4 = 0$. На рисунке 4 показана схема получения компьютерного представления заданной области такой функции в виде M -образов.

Предложенным способом можно кодировать информацию об аналитической функции любой размерности, описывая геометрические объекты любой сложности на заданной области аргументов. На рисунке 5 показано описание сложной геометрии, представленной тремя аргументами пространства (x, y, z) в виде пяти многослойных M -образов, где каждый слой образов M_i в заданной точке области характеризует значение n_i . Кодировка цвета в точке каждого из M -образов представляется в RGB (*Red, Green, Blue* – цветовая модель) формате

единым целочисленным значением, представляющим соответственно 16777216^1 возможных положительных целых чисел ($M_i = 0 \dots 16777215$), а значит точность представления значений компоненты n_i доведена до пятого знака после запятой. Трёхмерный объект представлен пятью такими компонентами локальной функции (рисунок 5).

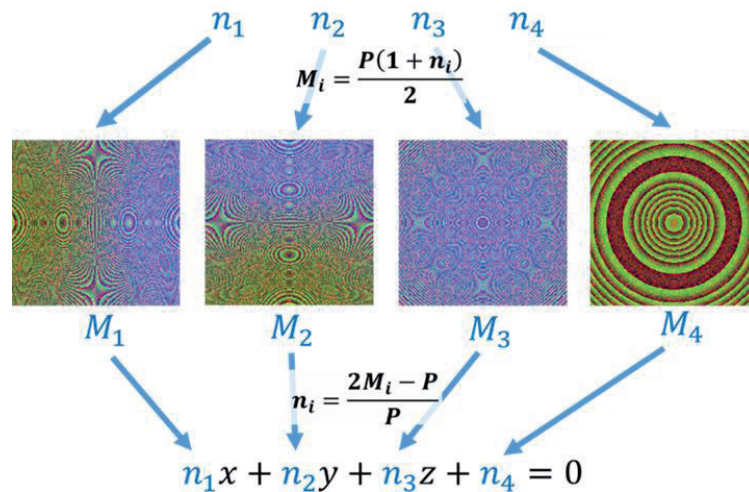


Рисунок 4 – Графическая кодировка области функции набором M -образов с последующим получением локальной функции $L(x, y, z, N_4) = 0$

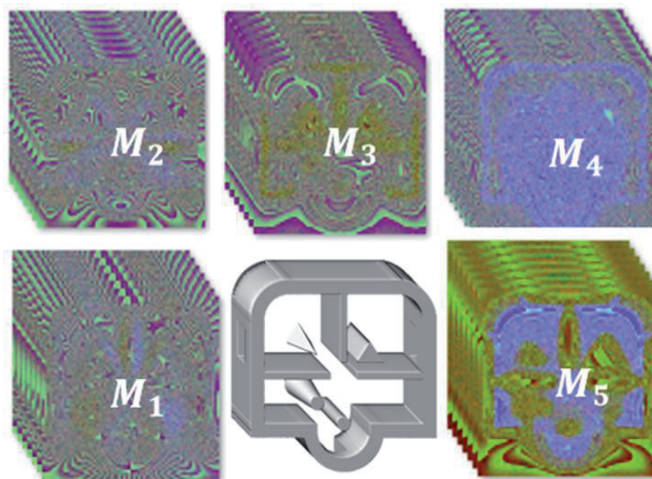


Рисунок 5 – Графическая кодировка области функции набором M -образов с последующим получением локальной функции $L(x, y, z, u, N_5) = 0$

3 Принцип проекционного ФВ-моделирования

Можно отметить сходство между традиционным конструированием на проекциях и аналитическим конструированием на функциях, а также единство в проекционном применении аналитического описания геометрических объектов. Например, аналитическое описание цилиндра радиусом основания r и высотой h можно представить двумя функциями с пространством аргумента более низкой размерности, т.е. функциями двухмерного пространства аргумента и одномерного: $f(x, y) = r^2 - x^2 - y^2$ и $g(z) = h^2 - z^2$. На рисунке 6 представлены ФВ-модели соответствующих функций, где M -образы распределены в соответствии пяти положениям в трёхмерном пространстве аргумента. Чтобы обеспечить этим ФВ-моделям про-

¹ Каждый цвет в RGB имеет 256 оттенков от 0 до 255, то есть всего $256 * 256 * 256 = 16\,777\,216$ возможных оттенков.

ективное свойство в трёхмерном пространстве аргумента функции «цилиндр», достаточно дополнить недостающие M -образы «нулевыми», т.е. отображающими нулевое значение в каждой точке, образами. Результат представлен на рисунке 7.

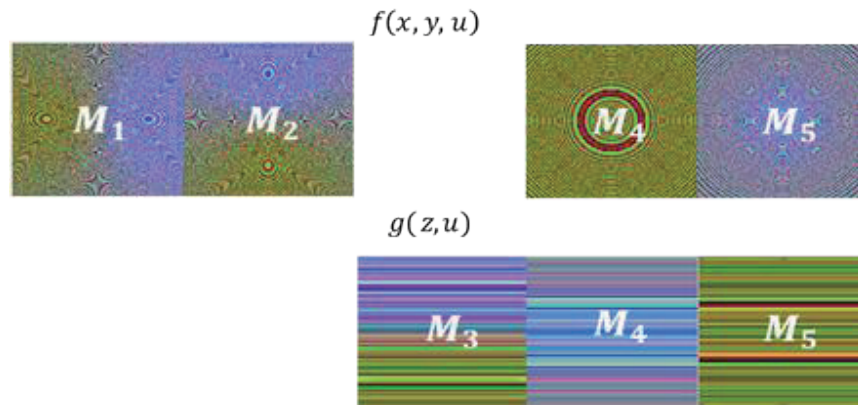


Рисунок 6 – Последовательное расположение M -образов согласно пяти компонентам локальной функции четырёх аргументов (x, y, z, u)

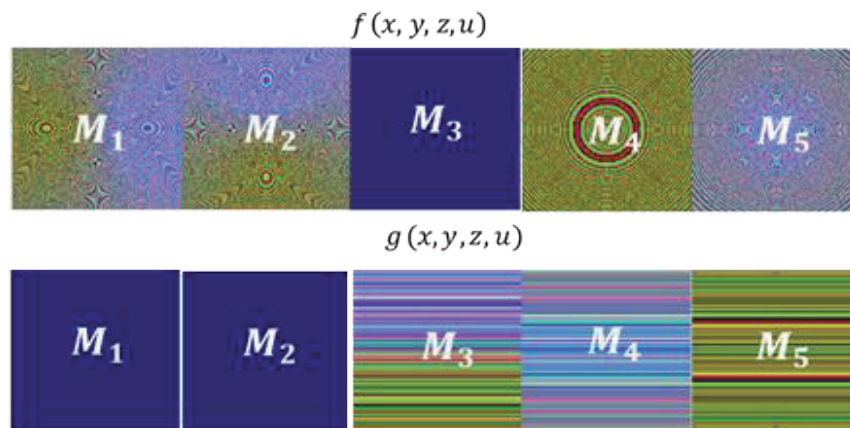


Рисунок 7 – Заполненная последовательность расположения M -образов согласно пяти компонентам локальной функции четырёх аргументов (x, y, z, u)

В аналитическом способе пересечение и объединение положительных и отрицательных значений на заданной области двух функций осуществляется посредством R -функционального моделирования. Например, функция пересечения двух функций выглядит следующим образом: $R(x, y, z) = f(x, y) + g(z) - \sqrt{f(x, y)^2 + g(z)^2}$ или $u = u_1 + u_2 - \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$, где $u_1 = r^2 - x^2 - y^2$, $u_2 = h^2 - z^2$. Можно также использовать локальные функции в точках ФВ-модели:

$$u_1 = -\frac{n_1^{[1]}}{n_4^{[1]}}x - \frac{n_2^{[1]}}{n_4^{[1]}}y - \frac{n_5^{[1]}}{n_4^{[1]}}, u_2 = -\frac{n_3^{[2]}}{n_4^{[2]}}z - \frac{n_5^{[2]}}{n_4^{[2]}}.$$

Полученные точки положительного значения области u показаны на рисунке 8.



Рисунок 8 – Фигура, построенная R -функцией пересечения согласно положительным значениям

$$u = u_1 + u_2 - \sqrt{u_1^2 + u_2^2}.$$

4 Функционально-воксельное пересечение

В задаче, представленной в разделе 3, осуществлялось выделение точек трёхмерного пространства для положительной области пересечения двух функций $f(x, y)$ и $g(z)$. Для перехода к задаче получения ФВ-модели той же трёхмерной фигуры «цилиндр» необходимо выразить функцию, которая по примеру функции В.Л. Рвачёва выполняет послойное формирование M -образов, представляющих область функции «цилиндр» на основе полученных ФВ-моделей для $f(x, y, z, u)$ и $g(x, y, z, u)$. Значение цветовой градации M_i в точке M -образа пересчитывается в компоненту вектора $n_i = (2M_i - P)/P$, где $i = 1 \dots 5$, $P = 16777216$ градаций цвета. В результате записываются локальные функции для обеих ФВ-моделей: $n_1^{[1]}x + n_2^{[1]}y + n_3^{[1]}z + n_4^{[1]}u + n_5^{[1]} = 0$ и $n_1^{[2]}x + n_2^{[2]}y + n_3^{[2]}z + n_4^{[2]}u + n_5^{[2]} = 0$. Деление всех компонент на компоненту при аргументе u (это компоненты $n_4^{[1]}$ и $n_4^{[2]}$) приводит к записи:

$$l_{1,2,3,5}^{[1]} = \frac{n_{1,2,3,5}^{[1]}}{n_4^{[1]}}, l_{1,2,3,5}^{[2]} = \frac{n_{1,2,3,5}^{[2]}}{n_4^{[2]}}, l_4^{[1]} = l_4^{[2]} = 1.$$

Рассчитываются значения u для обеих функций на основе полученных коэффициентов (компонент) l_i : $u^{[1]} = -l_1^{[1]}x - l_2^{[1]}y - l_3^{[1]}z - l_5^{[1]}$, $u^{[2]} = -l_1^{[2]}x - l_2^{[2]}y - l_3^{[2]}z - l_5^{[2]}$.

Окончательное выражение закона для определения компонент локальной функции согласно R -функции пересечения записывается как:

$$l_i^{[R]} = l_i^{[1]} + l_i^{[2]} - \left(\frac{l_i^{[1]}u^{[1]} + l_i^{[2]}u^{[2]}}{\sqrt{(u^{[1]})^2 + (u^{[2]})^2}} \right), l_4^{[R]} = 1, i = 1, 2, 3, 5.$$

Результат получения ФВ-модели цилиндра показан на рисунке 9.

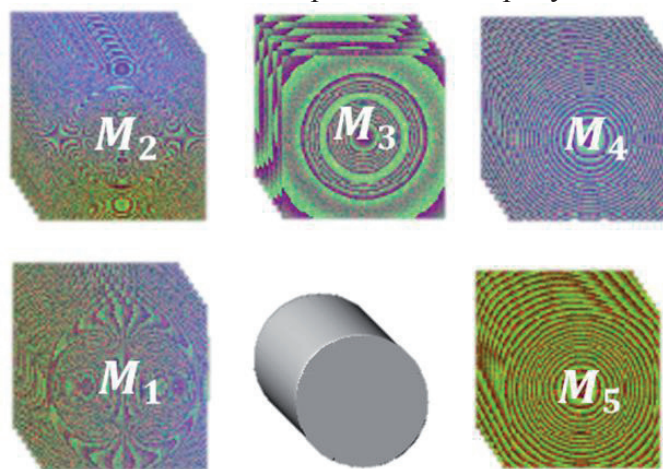


Рисунок 9 – Скомпонованная композиция из пяти трёхмерных M -образов и фигуры цилиндра, полученной на их основе

Количество и сложность проекций можно увеличивать, а также применять процедуру объединения:

$$l_i^{[R]} = l_i^{[1]} + l_i^{[2]} + \left(\frac{l_i^{[1]}u^{[1]} + l_i^{[2]}u^{[2]}}{\sqrt{(u^{[1]})^2 + (u^{[2]})^2}} \right), l_4^{[R]} = 1, i = 1, 2, 3, 5.$$

На рисунке 10 показано пересечение трёх проекций, обеспечивающих полному цилиндру два дополнительных сквозных отверстия с круглым и квадратным сечениями. Для наглядности проекции представлены ортогонально друг другу с выделением положительной области значений. В центре рисунка 10 помещена объёмная фигура, полученная в результате трёх последовательных пересечений.

5 Закон функционально-воксельного вращения

Закон ФВ вращения можно показать на примере построения сферы по одной проекции – окружности. Если применить шесть проекций (сверху, снизу, справа, слева, спереди и сзади) в виде окружностей, то при их пересечении сфера не получится. Отсюда следует, что для описания сферы по проекциям необходимо дополнительно указывать, что трёхмерная фигура является сферой, как фигура вращения её проекции (окружности).

Локальную функцию единичной сферы можно записать, применив её проекционную локальную функцию окружности с единичным радиусом, заданную на области от -1 до 1 по двум осям в плоскости xOz : $u = 1 - x^2 - z^2$.

Для получения единичной сферы достаточно вместо координаты x вписать закон вращения в плоскости xOy :

$$x' = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Аргументы под корнем определяют плоскость вращения (xOy). Подстановкой вместо аргумента x закона вращения (x') получается уравнение единичной сферы:

$$u = 1 - \left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 - z^2 = 1 - x^2 - y^2 - z^2.$$

Локальная функция, описывающая точки на заданной области сечения сферы в плоскости xOz , содержит следующее выражение: $n_1x + n_3z + n_4u + n_5 = 0$.

Замена аргумента x выражением закона вращения (x') в локальной функции даёт:

$$n_1\sqrt{x^2 + y^2} + n_3z + n_4u + n_5 = 0.$$

Умножением на выражение закона вращения всех компонент функции получается:

$$n_1 \left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 + n_3z\sqrt{x^2 + y^2} + n_4u\sqrt{x^2 + y^2} + n_5\sqrt{x^2 + y^2} = 0.$$

В результате преобразований формируется локальная функция, учитывающая закон вращения проекции в плоскости xOz : $\left(|n_1|\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)x + \left(|n_1|\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)y + n_3z + n_4u + n_5 = 0$, а значит $n'_1 = |n_1|\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}$, $n'_2 = |n_1|\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}$.

На рисунке 11 показана ФВ-модель сферы, полученная пересчётом компонент.

Пример вращения более сложной геометрической фигуры, составленной объединением окружности и треугольника, показан на рисунке 12.

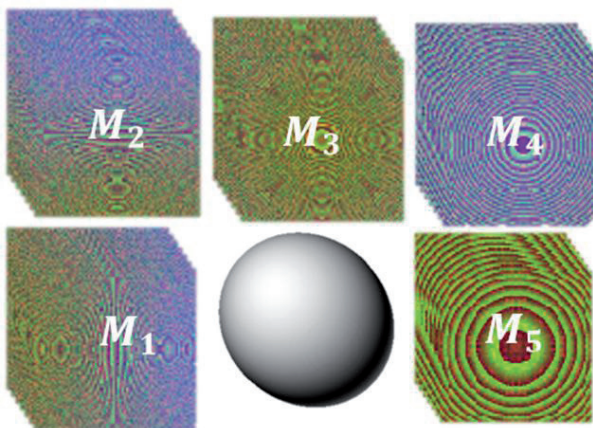


Рисунок 11 – Композиция из пяти трёхмерных M -образов и фигуры сферы, полученной на их основе

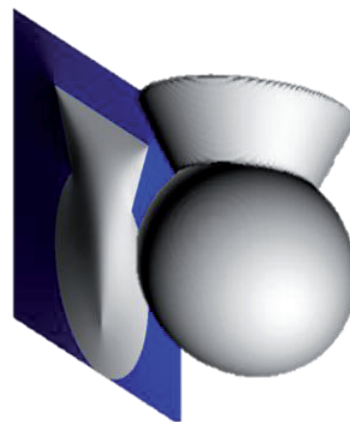


Рисунок 12 – Композиция из проекции M -образа и фигуры, полученной на его основе

Пример получения фигуры вращения для чертежа, рассматриваемого в работе [3], как способ получения функционально-воксельной 3D-модели по плоской проекции, описанной сложным контуром, представлен на рисунке 13.

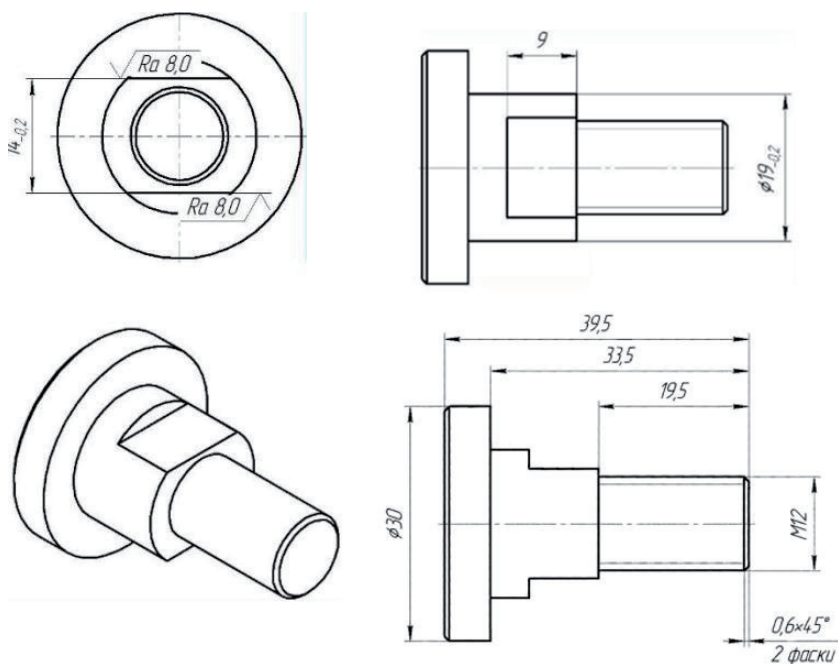


Рисунок 13 – Чертёж детали, рассмотренный в работе [3]

В [10] предложен аналитический способ описания сложного контура посредством пересечения/объединения полуплоскостей, задаваемых уравнением:

$$(y_i - y_{i+1})x - (x_i - x_{i+1})y + (x_{i+1}y_i - x_iy_{i+1}) \geq 0,$$

где i – номер текущей точки контура.

При рассмотрении обобщённой функции в контексте R -функционального моделирования получается, что:

$$(y_i - y_{i+1})x - (x_i - x_{i+1})y + (x_{i+1}y_i - x_iy_{i+1}) = z_{i,i+1},$$

$$u = z_{1,2} \cap z_{2,3} \cap z_{3,4} \cap (z_{4,5} \cup (z_{5,6} \cap z_{6,7}) \cup z_{7,8}) \cap z_{8,9} \cap z_{9,10} \cap z_{10,11} \cap$$

$$\cap (z_{11,12} \cup (z_{12,13} \cap z_{13,14}) \cup z_{14,15}) \cap z_{15,16} \cap z_{16,1}.$$

Из этого выражения видно, что контур содержит последовательно расположенные 16 узловых точек, как показано на рисунке 14, где синим цветом выделена область отрицательных значений z . На рисунке 15 представлены четыре M -образа, кодирующие значение локальных геометрических характеристик для получения локальной функции в выбранной точке:

$$n_1x + n_3y + n_4z + n_5 = 0.$$

На рисунке 16 показан результат моделирования тела вращения по полученным четырём M -образам при малом разрешении 256x256 пикселей с применением закона вращения $x' = \sqrt{x^2 + z^2}$. В результате функционально-воксельного моделирования получается набор из пяти M -образов, описывающих трёхмерную область аргументов для локальной функции:

$$u = -\frac{n'_1}{n_4}x - \frac{n'_2}{n_4}y - \frac{n_3}{n_4}z - \frac{n_5}{n_4},$$

где $n'_1 = |n_1| \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$, $n'_2 = |n_1| \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$, $n_i = (2M_i - P)/P$, $i = 1 \dots 5$.

Для получения окончательного результата моделирования, сопоставимого с аксонометрией детали рисунка 13, на рисунке 17 показано применение области отсека.

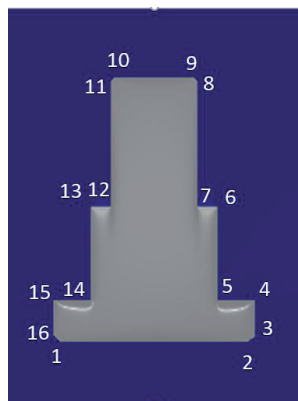


Рисунок 14 – Поверхность положительных значений z с нумерацией узлов нулевой границы

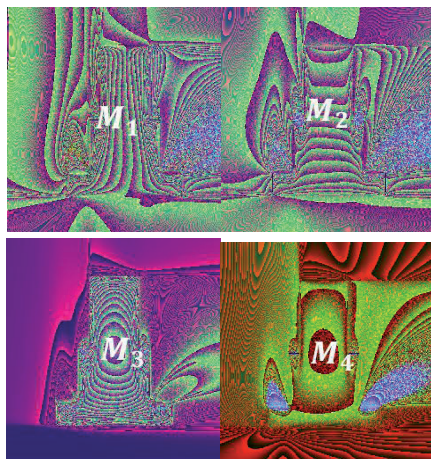


Рисунок 15 – Композиция из проекции M -образа и фигуры, полученной на его основе



Рисунок 16 – Композиция из проекции M -образа и фигуры, полученной на его основе

Заключение

Аналитическое конструирование можно рассматривать как структуру проекционных процедур. Она позволяет из проекций, как функций двух аргументов, собирать аналитическое описание сложного трёхмерного объекта. Разработанные инструменты в виде аналитических процедур пересечения, объединения и вращения, а также принципы увеличения размерности ФВ-модели позволяют моделировать 3D-область для функции описания пространственного геометрического объекта, формируя проекционные связи в виде функциональных закономерностей. Полученные результаты могут способствовать решению задачи построения функции описания трёхмерных геометрических объектов по функциям, описывающим элементы плоского чертежа.



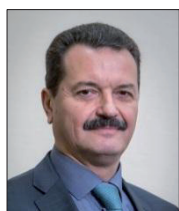
Рисунок 17 – Композиция из проекции M -образа отсечения и окончательной фигуры, полученной на его основе

Список источников

- [1] **Полозов В.С., Будеков О.А.** Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. М.: Машиностроение, 1983. 277 с.
- [2] **Роменский С.А., Ротков С.И., Бурцев Ю.П. и др.** Восстановление каркасной модели 3D-объекта по бумажному архивному чертежу. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2022. Т.22, №4. С.66-75. DOI 10.14529/build220407.
- [3] **Мошкова Т.В., Ротков С.И., Смычёк М.М., Тюрина В.А.** Задача преобразования каркасной модели 3D объекта, восстановленной по его техническому чертежу. *Научная визуализация* 2018. 10.5: 13-31. DOI: 10.26583/sv.10.5.02.
- [4] **Захаров А.А.** Исследование алгоритмов формирования трёхмерной модели по ортогональным видам. *Сборник научных статей: Алгоритмы, методы и системы обработки данных*. М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2010. С.4–9.
- [5] **Никаноров А.А.** Разработка программы восстановления каркасных 3D-объектов по 2D-проекциям. *Альманах современной науки и образования*. Тамбов: Грамота, 2014. №8. С.117-128.
- [6] **Lee H., Han S.** Reconstruction of 3D interacting solids of revolution from 2D orthographic views. *Computer-Aided Design*. 2005. 37: 1388-1398. DOI: 10.1016/j.cad.2005.01.007.
- [7] **Wang Z., Latif M.** Reconstruction of 3D Solid Models Using Fuzzy Logic Recognition. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2007. V.1. P.37-42.

- [8] **Governi L., Furferi R., Palai M., Volpe Y.** 3D Geometry Reconstruction from Orthographic Views: a Method Based on 3D Image Processing and Data Fitting. *Computers in Industry*. 2013. No.64. P.1290-1300. DOI: 10.1016/j.compind.2013.02.003.
- [9] **Басов О.О., Носков Д.А.** Построение геометрической модели изделия на основе мультимодальной обработки бумажной конструкторской документации. *Экономика. Информатика*. 2025. 52(1): 137–144. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-137-144.
- [10] **Рвачев В.Л.** Об аналитическом описании некоторых геометрических объектов. *Доклады Академии наук Украины*. 1963. Т.153. №4. С.765–767.
- [11] **Максименко-Шейко К.В.** R-функции в математическом моделировании геометрических объектов и физических полей. Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2009. 306 с.
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **Толок А.В.** Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. М.: Физматлит. 2016. 112 с.
- [15] **Толок А.В., Толок Н.Б.** Локальная компьютерная геометрия. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2025. 228 с.
- [16] **Tolok A.V., Tolok N.B.** Mathematical programming problems solving by functional voxel method. *Automation and Remote Control*. 2018. Vol.79(9). P.1703-1712. DOI: 10.1134/S0005117918090138.
- [17] **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.
- [18] **Лоторевич Е.А.** Принципы пространственной визуальной компоновки аналитических моделей, отображённых в воксельном графическом пространстве. *Технология машиностроения*. 2013. №11. С.59-63.
- [19] **Плаксин А.М., Пушкарев С.А.** Геометрическое моделирование тепловых характеристик объектов функционально-воксельным методом. *Геометрия и графика*. 2020. Т.8, №1. С.25–32. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-25-32.

Сведения об авторах



Толок Алексей Вячеславович (1961 г.р.), д.т.н. (2004); профессор, заведующий лабораторией компьютерной графики ИПУ РАН. Научные интересы: функционально-воксельное моделирование в компьютерных технологиях, R-функциональное моделирование, САПР-технологии, графическое ядро, 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.р.), 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 11.07.2025, после рецензирования 26.08.2025. Принята к публикации 29.08.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-523-534

Projection principle for constructing functional voxel models

© 2025, A.V. Tolok ✉, N.B. Tolok

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

Abstract

This paper addresses the problem of automated generation of spatial digital models from flat drawings. The relevance of this problem is underscored by the wide range of existing approaches aimed at its solution. A novel aspect of this work

is the application of analytical R-functional geometric modeling to these tasks, employing a structural approach for describing complex geometric objects through analytical functions. The principles of computer-aided analytical construction of complex geometric objects using functional voxel modeling (FV-modeling) are discussed. Such modeling ensures the transition from a continuous representation of the domain of analytical functions to a discrete-continuous computer analogue, based on multidimensional graphical image-models that store information about the local function at each point within the discrete domain. The principles of FV-modeling are applied to R-functional modeling functions, which serve as the foundation for analytical constructions of complex geometric object. The study demonstrates how the dimensionality of the argument space can be modified by introducing additional or removing redundant local geometric characteristics, thereby enabling the analysis of their influence on the function's behavior. The paper explores the principle of increasing the dimensionality of a FV-model of a plane function domain for subsequent application of R-functional modeling methods to a three-dimensional space. By applying V.L. Rvachev's principle of FV-modeling, the approach allows the computation of local geometric characteristics of a linear function, simplifying the computer representation of the R-functional model. Based on the law of planar rotation around an orthogonal axis, a principle for rotating a FV-model is introduced. This principle enables the construction of a spatial FV-model of a surface of revolution derived from a planar FV-model of a projection function. The developed FV-modeling tools can thus serve as an auxiliary means for addressing the core problem of generating three-dimensional models from two-dimensional projections (drawings).

Keywords: *R-function, projection, functional voxel model, M-image, local function, intersection, law for rotation.*

For citation: Tolok AV, Tolok NB. 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.

Authors' contributions: Tolok A.V. – developed the theoretical principles of the projection approach in analytical modeling of geometric objects; Tolok N.B. – carried out practical validation of the principles with computer implementation in the presented examples.

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

List of figures

- Figure 1 – Graph of function $y = \cos x$
- Figure 2 – Graph of function $z = \cos x - y$
- Figure 3 – Values of function domain $u = \cos x - y - z$
- Figure 4 – Principles of graphic encoding of the function domain using a set of M-images, followed by obtaining the local function $L(x, y, z, N_4) = 0$
- Figure 5 – Principles of graphic encoding of the function domain using a set of M-images, followed by obtaining the local function $L(x, y, z, u, N_5) = 0$
- Figure 6 – Sequential arrangement of M-images according to the five components of local function with four arguments (x, y, z, u)
- Figure 7 – Filled sequential arrangement of M-images according to the five components of local function with four arguments (x, y, z, u)
- Figure 8 – Figure constructed by R-function of intersection according to the positive values of $u = u_1 + u_2 - \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$
- Figure 9 – A composite arrangement of five three-dimensional M-images and the resulting cylinder generated from them
- Figure 10 – A composition of three projections of M-images and the figure derived from them
- Figure 11 – A composition of five three-dimensional M-images and the resulting sphere generated from them
- Figure 12 – A composition of an M-image projection and the figure derived from it
- Figure 13 – Drawing of the part considered in the work [3]
- Figure 14 – Surface of positive z values with node numbering along the zero boundary
- Figure 15 – A composition of an M-image projection and the figure derived from it
- Figure 16 – A composition of an M-image projection and the figure derived from it
- Figure 17 – A composition of a projection of the cutting M-image and the final figure derived from it

References

- [1] Polozov VS, Budekov OA. Computer-aided design. Geometric and graphic problems [In Russian]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 277 p.

- [2] **Romensky S.A., Rotkov S.I., Burtsev Yu.P. [and others]** Restoration of a wireframe model of a 3D object from a paper archive drawing [In Russian]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Construction Engineering and Architecture*. 2022; 22(4): 66-75. DOI 10.14529/build220407.
- [3] **Moshkova TV, Rotkov SI, Smychok MM, Tyurina VA.** The problem of transforming a wireframe model of a 3D object reconstructed from its technical drawing [In Russian]. *Scientific Visualization* 2018. 10.5: 13-31. DOI: 10.26583/sv.10.5.02.
- [4] **Zakharov AA.** Study of algorithms for forming a three-dimensional model based on orthogonal views [In Russian]. *Collection of scientific articles: Algorithms, methods and systems for data processing*. Moscow: OOO "Center for Information Technologies in Nature Management", 2010. P.4-9.
- [5] **Nikanorov AA.** Development of a program for restoring 3D wireframe objects from 2D projections [In Russian]. *Almanacs of modern science and education*. Tambov: Gramota, 2014; 8: 117-128.
- [6] **Lee H, Han S.** Reconstruction of 3D interacting solids of revolution from 2D orthographic views. *Computer-Aided Design*. 2005. 37: 1388-1398. DOI: 10.1016/j.cad.2005.01.007.
- [7] **Wang Z, Latif M.** Reconstruction of 3D Solid Models Using Fuzzy Logic Recognition. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2007; 1: 37-42.
- [8] **Governi L, Furferi R, Palai M, Volpe Y.** 3D Geometry Reconstruction from Orthographic Views: a Method Based on 3D Image Processing and Data Fitting. *Computers in Industry*. 2013; 64: 1290-1300. DOI: 10.1016/j.compind.2013.02.003.
- [9] **Basov OO, Noskov DA.** Construction of a Geometric Model of a Product Based on Multimodal Processing of Paper Design Documentation [In Russian]. *Economics. Information technologies*, 2025, 52(1): 137-144. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-137-144.
- [10] **Rvachev VL.** On the analytical description of some geometric objects [In Russian]. *Reports of Ukrainian Academy of Sciences*. 1963; 153(4): 765-767.
- [11] **Maksimenko-Sheiko KV.** R-functions in mathematical modeling of geometric objects and physical fields [In Russian]. Kharkov: IPMesh NAS of Ukraine, 2009. 306 p.
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **Tolok AV.** Functional-voxel method in computer modeling [In Russian]. Moscow: Fizmatlit. 2016. 112 p.
- [15] **Tolok AV, Tolok NB.** Local computer geometry [In Russian]. Moscow: IP R Media, 2025. 228 p.
- [16] **Tolok AV, Tolok NB.** Mathematical Programming Problems Solving by Functional Voxel Method. *Automation and Remote Control*. 2018; 79 (9): 1703-1712. DOI: 10.1134/S0005117918090138.
- [17] **Loktev MA.** Features of applying functional-voxel modeling to pathfinding problems with obstacles [In Russian]. *Information technologies in design and production*. 2016; 1: 45-49.
- [18] **Lotorevich EA.** Principles of spatial visual layout of analytical models displayed in voxel graphic space [In Russian]. *Mechanical engineering technology*. 2013; 11: 59-63.
- [19] **Plaksin AM, Pushkarev SA.** Geometric modeling of thermal characteristics of objects using the functional-voxel method [In Russian]. *Geometry and graphics*. 2020; 8(1): 25-32. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-25-32.

About the authors

Alexey Vyacheslavovich Tolok (b. 1961), Doctor of Engineering (2004); Professor, Head of the Computer Graphics Laboratory at the Institute of Control Systems of the Russian Academy of Sciences. Research interests include functional-voxel modeling in computer technology, R-functional modeling, CAD technologies, graphics kernel, control systems, and graph theory. Researcher ID (WoS): V-7594-2019, Author ID (Scopus): 28268055700, Author ID (РИИЦ): 452677. ORCID: 0000-0002-7257-9029. tolok_61@mail.ru ✉

Nataliya Borisovna Tolok (b. 1974), Candidate of Engineering (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 452678. ORCID: 0000-0002-5511-4852. SPIN-код: 8581-0422, nat_tolok@mail.ru.

Received July 11, 2025. Revised August 26, 2025. Accepted August 29, 2025.



Онтологии в проектировании индустриальных цифровых платформ

© 2025, И.Н. Фомин

*Институт проблем точной механики и управления Федерального исследовательского центра
«Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия*

Аннотация

Рассматривается применение онтологического подхода в проектировании индустриальных цифровых платформ в контексте концепции «Индустрия 4.0». Предложен подход к созданию баз знаний об элементах технических систем с использованием онтологических моделей и аппарата нечёткой логики. Эталонная модель Индустрии 4.0 представлена в виде онтологий с учётом стандартов из сфер «умного производства» и проектирования онтологий, применяемых для построения бизнес-моделей. Классифицированы свойства и отношения элементов технических систем, имеющих цифровое представление в индустриальных цифровых платформах. Представлена многоуровневая система онтологий, включающая мета-онтологию, прикладные онтологии и онтологии предприятий, обеспечивающая стандартизацию и интеграцию данных в экосистемах цифровых платформ. Определены функции интеллектуального ассистента для автоматизированного ввода элементов в онтологическую модель в концепции «Индустрия 4.0». Разработан инструмент структурирования данных для корпоративных информационных систем в машиностроении и энергетике на базе «1С: Предприятие». Показано, что для управления индустриальными цифровыми платформами и в задачах формирования цифровых моделей изделий и процессов их производства использование онтологического подхода позволяет обеспечить единое понимание данных всеми субъектами, входящими в производственные экосистемы, совместимость и автоматизацию обработки знаний в течение жизненного цикла, гибкость интеграции новых элементов и соответствие стандартам Индустрии 4.0.

Ключевые слова: онтологический подход, техническая система, производственная система, цифровая платформа, проектирование, интеллектуальный ассистент, Индустрия 4.0.

Цитирование: Фомин И.Н. Онтологии в проектировании индустриальных цифровых платформ. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №4(58). С.535-551. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-535-551.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Под производственной системой (ПС) в данной работе понимается совокупность ресурсов, процессов и организационно-технических средств, предназначенных для выпуска продукции или оказания производственных услуг. ПС включают разнообразные «активы»: технические системы (ТС); технологические процессы; информационные системы (ИС), базы данных (БД) и базы знаний (БЗ); организационную структуру управления производством.

ТС включают совокупность технических средств, организованных для выполнения определённой функции. ТС – это элемент ПС (машины, механизмы, оборудование, контроллеры, сенсоры и др.), а также ТС может являться производимая продукция. ИС на предприятиях включают все уровни управления (стратегический, тактический, оперативный): системы планирования ресурсов предприятия (*Enterprise Resource Planning, ERP*), системы управления жизненным циклом (ЖЦ) продукта (*Product Lifecycle Management, PLM*), корпоративные БД, аналитические системы, которые применяются для проектирования ПС [1]. Организация информационных потоков между этими системами и индустриальными цифровыми плат-

формами (ИЦП) также может быть стандартизирована в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020, который определяет способы информационных взаимодействий между системами моделирования, симуляции, *PLM* и *ERP* в процессах производственного планирования [1].

Для ПС, ориентированных на концепцию «Индустрия 4.0», требуется создание промышленных экосистем, объединяющих предприятия, обменивающиеся данными через ИЦП. Объединение информации об элементах ТС, производственных процессах и продукции обеспечивается за счёт стандартизации данных и их семантической связанности. Онтологический подход является ключевым инструментом для структурирования и классификации данных [2]. Он соответствует стандартам системной инженерии [3-5], которые описывают модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0. В частности, он соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021, который устанавливает общие принципы построения и интеграции верхнеуровневых онтологий, обеспечивая их совместимость и интероперабельность в рамках ИЦП [6].

В данной статье рассматривается онтологический подход при проектировании ИЦП, включая создание БЗ, разработку многоуровневых онтологических моделей (ОМ), автоматизацию ввода данных с помощью интеллектуальных ассистентов (ИА), интеграцию ОМ с ИС предприятий для планирования производственных ресурсов (*ERP*-системы).

1 Постановка задачи

В стандартах [3-5] определено, что в рамках концепции «Индустрия 4.0» каждый элемент интеллектуальной ПС должен содержать информацию о свойствах, которые характеризуют связанность элемента с другими объектами ТС, информация о которых содержится в БД и в БЗ в ИЦП. Производственные элементы различных видов могут взаимодействовать с другими элементами ПС или ТС (активов), создаваемых смежными предприятиями. Для стандартизации представления сведений об элементах ТС в ИЦП применяются стандарты системной инженерии (примеры см. в таблице 1).

Разработаны десятки стандартов для различных отраслей экономики, применяемых технологий и назначений ИЦП. Они содержат подходы к организации информационного взаимодействия между предприятиями, входящими в промышленную экосистему, между компонентами производственных процессов и выпускаемой продукции в составе ПС и ТС предприятий. Применяемые подходы основаны на принципах построения ИЦП, на правилах обработки, хранения и структурирования данных, используемых для создания моделей системных архитектур и процессов [7]. Среди этих подходов можно выделить референтную модель архитектуры Индустрии 4.0 *RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industry 4.0)* [3, 8].

В стандартах [3, 5] предлагается описывать все ТС через компоненты Индустрии 4.0 (*Asset Administration Shell, AAS*), которые содержат описание физических объектов (*Asset*) и их цифровых представлений (свойства, параметры, требования и функциональные связи) на основе коммуникационных характеристик и способов представления. Согласно [3, 5] эти представления выражаются через концепцию «структура-взаимодействие» или «представление-связь», которые определяют параметры элементов ПС и ТС в модели ИЦП. Каждый элемент цифровой модели (ЦМ) в зависимости от его связей с другими элементами ТС и ПС проецируется на: ось цифрового представления производственных активов; ось функциональной иерархии предприятия; ось этапов ЖЦ элемента ТС [3, 5].

Характеристики ЦМ изделия, создаваемого из набора компонентов, состоящих из элементов ТС, могут быть описаны лингвистически с использованием унифицированного тезауруса по правилам описания компонентов Индустрии 4.0. В этом случае тезаурус для конкретного элемента ТС формируется как совокупность терминов, описывающих его состав-

ные части, их свойства, параметры, требования и функциональные связи. Тезаурус создаётся специалистами разных предприятий в рамках единой ИЦП, поэтому термины и параметры элементов должны быть систематизированы в соответствии с правилами стандартов.

Таблица 1 - Стандарты системной инженерии в проектировании промышленных цифровых платформ (пример)

Стандарт	Назначение	Особенности
IEC 81346; ГОСТ Р МЭК 81346-1	Обозначение и структурирование объектов	Вводит правила для иерархии и структурирования в инженерных системах
IEC 61512-1; ГОСТ Р МЭК 61512-1	Определяет модель управления пакетными процессами в процессных производствах, включая архитектуру управления, иерархию процессов и функции управления	Вводит многоуровневую модель управления пакетными процессами, включая рецепты, процедуры, этапы и операции; обеспечивает основу для стандартизации автоматизации и интеграции с <i>ERP</i> и другими системами
IEC 62264; ГОСТ Р МЭК 62264-1-2010	Интеграция производства и предприятия	Модель интеграции информационных систем для управления процессами и для управления ресурсами, поддерживает операции, ресурсы и события
IEC 62890-1-07	Управление жизненным циклом производственных систем и их элементов	Поддерживает жизненный цикл элементов систем, включая разработку и эксплуатацию
IEC 63088; ГОСТ Р 59799-2021	Определение концепций архитектуры промышленного Интернета вещей и «Индустрия 4.0»	Сопоставляет концепцию Индустрии 4.0 с архитектурами цифровых платформ технических систем
ISO 23247; ГОСТ Р 57700.37-2021	Цифровые двойники в производстве	Архитектура цифровых двойников для взаимодействия с физическими объектами
ISO/IEC 21838-1; ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1	Создание единых основ построения и интеграции верхнеуровневых онтологий для информационных систем	Обобщённая модель реальности, независимость от конкретной предметной области, описание фундаментальных категорий: объект, процесс, свойство, событие, время и т.д.
ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020 (ISO 18828-3-2017)	Устанавливает процедуры моделирования информационных потоков при интеграции моделирования и симуляции в производственную среду	Определяет методологию моделирования информационных потоков между системами моделирования, симуляции и другими информационными системами (<i>PLM, ERP</i>)
ГОСТ Р 58908.1 IEC 81346-1	Определяет принципы структурирования компонентов технических и промышленных систем, включая создание иерархий элементов, функций и мест установки	Устанавливает правила классификации, идентификации объектов, обеспечивает основу для создания цифровых моделей, интеграции инженерных данных и построения онтологий оборудования и производственных систем.

Для обеспечения классификации и приоритизации технических требований к параметрам и характеристикам элементов ТС используется многомерная модель с осями, задающими уровни: иерархии, ЖЦ, представлений. Требования могут быть формализованы через тезаурус, где каждому требованию соответствует множество: $R_i = \{r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_L\}$, где: R_i — множество параметров и характеристик, описывающих i -е требование; L — количество терминов, описывающих в тезаурусе данное требование; r_l — элемент множества, который может интерпретироваться как параметр, входящий в требование (например, температура, давление), или как характеристика параметра (например, точность $\pm 0,1^\circ\text{C}$, диапазон $0-200^\circ\text{C}$). Такая формализация подразумевает фиксирование различий на уровне описания не только множества требований, но и параметров и их характеристик, входящих в требование, которые составляют элементы множества R_i , формирующие его семантическую структуру.

При этом структура взаимосвязи элементов многомерной модели имеет следующий вид: элемент ТС $\rightarrow$ параметры и характеристики элемента $\rightarrow$ требования к параметрам и характеристикам.

В промышленную экосистему входят различные смежные предприятия или консорциумы, поэтому одно и то же требование может формулироваться разными специалистами по-разному и содержать неполные или противоречивые элементы множества R_i . В этих услови-

ях ЦМ ТС или её элементов можно представить как объединение определений и свойств: $M_{\text{изд}} = \bigcup_i^n R_i$, где $M_{\text{изд}}$ – многомерная модель элемента ТС, а n – количество бинарных соотношений «представление-связь», с помощью которых описываются связи элемента с другими абстрактными и реальными элементами ПС по правилам описания AAS [3-5].

Целью данного исследования является разработка подхода к интеграции информации об элементах ТС в ИЦП с использованием ОМ и методов обработки естественного языка. Для достижения цели требуется решить следующие задачи:

- представить эталонную модель RAMI 4.0 в виде ОМ, определить её основные концепты, предикаты и их отношения, в соответствии со стандартами [3-5];
- разработать структуру многоуровневой системы онтологий, обеспечивающей смежное использование ИЦП;
- разработать метод преобразования лингвистических описаний элементов ТС в формализованное объектно-предикатное описание и процедуру определения координат элементов в многомерной модели RAMI 4.0 на основе связей и предикатов;
- определить функционал инструментов ввода информации об элементах ТС в структуру данных ИЦП с автоматическим определением координат многомерной модели RAMI 4.0.

Решение этих задач позволит обеспечить автоматизацию наполнения БД и БЗ ИЦП, повысить согласованность и точность представления информации об элементах ТС, создать основу для построения ЦМ изделий и производственных процессов смежных предприятий.

2 Система онтологий на основании тезаурусов

Важная этап создания ИЦП - формирование ЦМ изделий и производственных процессов для использования моделей в ИС предприятий, входящих в экосистему ИЦП. Процесс формирования ЦМ можно описать в терминах многомерных моделей «Индустрии 4.0» как процесс создания БЗ об изделии посредством применения ОМ и аппарата нечёткой логики.

Как правило, первичные технические требования к элементам ТС и их характеристики формулируются лингвистически. Для их формализации вводится лингвистическая переменная (R, N, Y) , где: N — наименование переменной, извлечённое из тезауруса требований (например: температура, точность, давление); R — множество терминов, связанных с данной переменной и отражающих её различные формулировки; Y — параметр, задающий уровень соответствия «представление-связь» в модели RAMI 4.0, т.е. степень, с которой лингвистическая формулировка может быть отнесена к определённой координате модели (например, к конкретному уровню иерархии, фазе ЖЦ или уровню представления) [3, 5].

Для получения лингвистической переменной можно применять различные методы в зависимости от доступных инструментов, обычно они сводятся к следующим этапам:

- 1) предобработка текстовых требований (приведение к нормальной форме, удаление стоп-слов, выделение ключевых терминов);
- 2) извлечение из тезауруса требований соответствующих наименований N ;
- 3) определение множества R , включающего различные варианты формулировок этого требования (синонимы, уточнения, допустимые диапазоны);
- 4) вычисление параметра Y с помощью методов нечёткой логики, отражающего степень принадлежности данного описания выбранной оси RAMI (например, «эксплуатация» в оси ЖЦ или «уровень *Field Device*» в оси иерархий).

Лингвистическая переменная (R, N, Y) позволяет переводить исходные текстовые описания в формализованную форму, которая может быть использована как для классификации объектов в ОМ, так и для размещения элементов в структуре RAMI 4.0. Для каждого параметра определяется диапазон допустимых значений согласно требованиям технического за-

дания на разработку и конструктивное исполнение изделия [9]. В формулировке требования к элементу ТС указывают параметр «представление–связь» по правилам, описанным в [3, 5], выбирая его из тезауруса требований множества R . В терминах *RAMI* 4.0 этот параметр отражает позицию элемента в многомерной модели (например, уровень иерархии, фазу ЖЦ или уровень представления). Далее указанный параметр интерпретируется как элемент нечёткого множества требований $\tilde{R}$, поскольку формулировки специалистов из разных организаций могут отличаться по точности, полноте и терминологии.

Для установления степени связи между конкретным требованием и множеством $\tilde{R}$, применяется функция принадлежности $\mu(R_i)$, которая задаёт степень соответствия значения параметра «представление–связь» конкретной координате в модели *RAMI*.

В качестве функций принадлежности могут использоваться стандартные типы нечёткой логики: треугольные функции — для представления диапазонных характеристик (например, рабочая температура от -40 до $+120^\circ\text{C}$ с плавным снижением принадлежности за пределами диапазона); трапециевидные функции — для описания параметров с областью стабильных значений и переходными зонами; гауссовские функции — для характеристик с нормальным распределением возможных значений.

Таким образом, формируется общее нечёткое множество требований $\tilde{R}$, в котором каждый параметр «представление–связь» имеет свою степень принадлежности к координатам *RAMI*. Такой подход позволяет согласовать разнородные формулировки требований и объединить их в единую ОМ.

Степень принадлежности в предлагаемой модели отражает не только точность формулировки одного требования, но и согласованность различных требований между собой, а также степень принадлежности одного требования другому. Это означает, что если два требования описывают близкие параметры или характеристики (например, диапазон рабочих температур и требование к термостойкости корпуса), то между ними можно установить определённый уровень совпадения.

Для формализации таких связей используется понятие фундаментального множества пространства суждений [10]. Под ним понимается множество всех возможных требований и параметров, извлечённых из тезауруса предметной области и отнесённых к координатам многомерной модели *RAMI*. Пространство суждений включает все варианты формулировок и интерпретаций этих требований, которые могут появиться при совместной работе специалистов из разных предприятий, подключённых к ИЦП. В этом пространстве степень согласованности между двумя требованиями R_i и R_j может быть выражена через вероятность p_{ij} их совпадения, которая может быть определена путём статистического анализа совпадения терминов в тезаурусах (например, по метрике *TF-IDF* или косинусному сходству в векторном пространстве терминов [11]) или экспертной оценки (в случаях, когда требование задаётся нечисловыми характеристиками или неформальными суждениями). Таким образом, параметр p_{ij} является формальной мерой близости требований и используется для определения качества данных, выявления избыточности, противоречивости или неполноты спецификаций при формировании цифровой оболочки компонентов Индустрии 4.0.

Для управления качеством данных, представленных в онтологиях в условиях неопределённости и разночтений между участниками экосистемы, может быть применён ГОСТ Р 70846.3-2023, который устанавливает требования к онтологиям, используемым для описания и контроля качества данных [12]. Это позволяет формализовать метаданные о достоверности, полноте и актуальности информации в ИЦП.

Степень соответствия термина N требованию R определяется с использованием функции принадлежности $\mu(N, R) = Y$, принимающей значения в диапазоне $[0, 1]$, где 0 означает отсутствие соответствия, а 1 — полное совпадение. Сопоставление пар (R, N) с понятиями мета-онтологии (онтологии верхнего уровня) позволяет определить уровень обобщения и обеспечить корректную классификацию объекта в ОМ предприятия или в прикладной онтологии.

Множество $\tilde{R}$ с различными значениями R_i определяет нечёткие переменные, которые отражают нечёткие значения требований, параметров или характеристик элемента ТС. Степень соответствия между требованиями выражается через вероятности совпадения p_{ij} : $R_i = \{p_{ij} | p_{ij} \in P, j = \overline{1, n_i}\}$, $i = \overline{1, L}$, где P — множество вероятностей соответствия требований представляет собой совокупность значений вероятностей, которые описывают степень согласованности или совпадения различных формулировок требований. Его можно использовать для построения нечётких переменных и дальнейшего согласования требований в рамках многомерной RAMI-модели.

При использовании онтологий в проектировании ИЦП можно допустить, что имена нечётких переменных, определяемые специалистами при формировании требований, принадлежат непересекающимся множествам: $R_{i_1} \cap R_{i_2} \neq \emptyset$; $i_1, i_2 = \overline{1, L}$. В прикладных ОМ формулировки и набор количественных требований и характеристик определяются тезаурусом. При этих допущениях и использовании средств, применяемых при описании методов функционирования систем поддержки принятия решений в [13], нечёткое требование или характеристику можно представить в виде $\tilde{r} = \{\langle \mu(p_{ij}), p \rangle | p \in R, R = \bigcup_{i=1}^n R_i\}$. Здесь p_{ij} — вероятность совпадения требования R_i с параметром или характеристикой, $\mu(p_{ij})$ — функция принадлежности интерпретирует значение вероятности как степень соответствия требованию и связывает его с другими параметрами и характеристиками из набора $\tilde{R}$ с вероятностью p .

Принадлежность некоторого параметра из тезауруса множеству требований можно выразить через логическую операцию (например, квантор существования), указывающую область истинности предикатов, которые связывают эти требования или параметры с элементами ТС. Тогда подмножество нечётких требований в тезаурусе R имеет вид:

$$R' = \left\{ \tilde{r} \mid \forall r \in R (\mu(r) = 0 \vee \mu(r) = 1) \right\} \quad (1)$$

Это означает, что для любого требования $\tilde{r}$ из множества $\tilde{R}$ функция принадлежности должна принимать чёткие значения: либо 0 (не принадлежит), либо 1 (принадлежит), т.е. на этом шаге отбрасываются промежуточные степени принадлежности и остаются только «однозначные» требования. Символ $\exists!$ определяет квантор существования, который означает, что в каждом наборе требований R_i должен существовать ровно один элемент r , для которого $\mu(r) = 1$. Это условие гарантирует, что в подмножестве R' остаётся только уникальное требование из каждого R_i , которое однозначно соответствует заданному параметру.

При использовании интеллектуальных ИС сложные ЦМ формируются с помощью ИА и выражение (1) может описывать правило выбора более подходящего описания параметра, а также правило запуска действий ИА по согласованию требований, входящих в ЦМ.

Современные ИЦП основаны на проектных репозиториях, в которых каждый элемент ТС может иметь разное значение функции принадлежности, выраженное через предикат соответствия «представление-связь». Такие репозитории, где элементы заданы лингвистически, можно создать посредством системы управления знаниями, которая выражается системой взаимосвязанных онтологий. Для обеспечения функционирования производственных предприятий, находящихся в единой цифровой экосистеме на базе эталонной модели, реализуется многоуровневая система иерархически связанных онтологий, включающая:

- мета-онтологию, задающую язык описания элементов многомерной модели ИЦП;
- набор прикладных онтологий, определяющих структуру информации в соответствии с концепцией «Индустрии 4.0»;
- онтологии предприятий, отражающие локальные модели систем, процессов и изделий.

Такой подход находит отражение во многих исследованиях, где онтологии индустрии рассматриваются как средство формализации знаний в рамках ПС и обеспечения семантической совместимости [14].

Многоуровневая система онтологий представлена на рисунке 1, иллюстрирующем взаимодействие мета-онтологии, прикладных онтологий и онтологий предприятий.

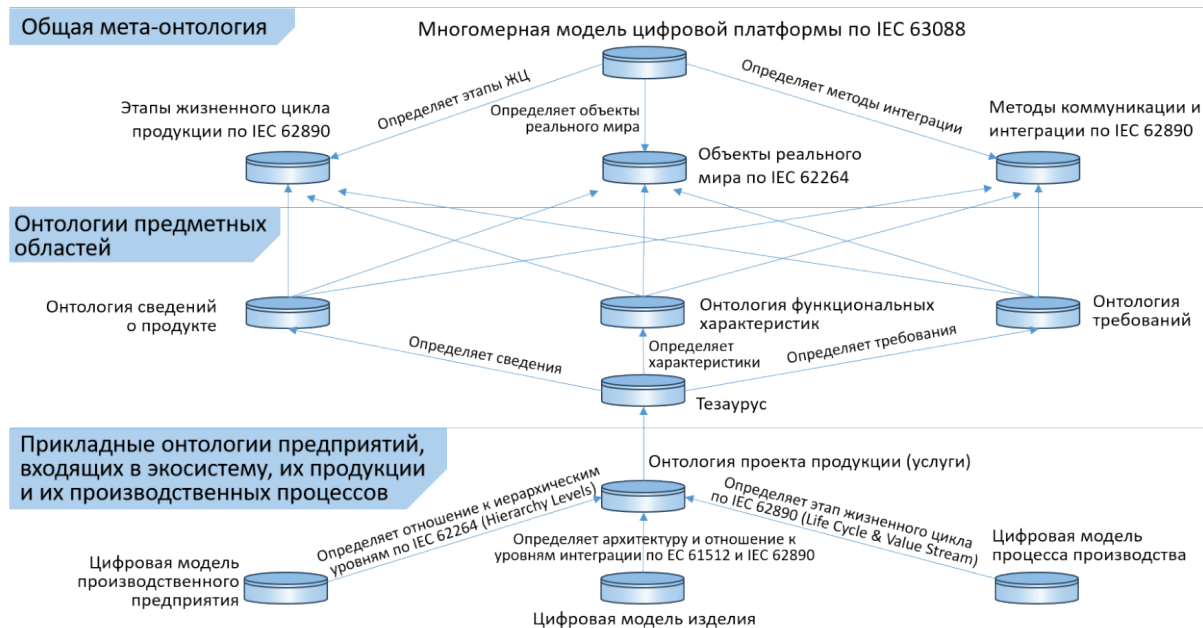


Рисунок 1 - Многоуровневая система онтологий для организации промышленных цифровых платформ

Система онтологий на основании тезаурусов позволяет подготовить данные для отражения их в мета-модели сверху, для классификации данных из онтологий проектов предприятий, входящих в экосистему снизу, а также способствует разработке и отладке механизмов сбора, обработки и анализа данных на всех уровнях ПС. Построение мета-онтологии может быть осуществлено в соответствии с требованиями стандарта [6], который определяет критерии корректности верхнеуровневых онтологий, включая непротиворечивость, полноту и возможность сопоставления категорий. Это обеспечивает возможность интеграции предложенной модели с другими онтологическими системами, используемыми в экосистемах «Индустрии 4.0».

С помощью подобной системы можно регламентировать определение правил и протоколов взаимодействия между различными элементами ПС, соблюдая требования информационной безопасности. Оценка эффективности мер по защите информации в ИЦП может быть реализована в соответствии с ГОСТ Р 59798-2021, который устанавливает методы измерения и анализа эффективности систем управления информационной безопасностью на основе показателей производительности [15]. Это позволяет интегрировать процессы управления безопасностью в общую архитектуру цифровой платформы.

Такой подход к организации ИЦП и ИС сетевых предприятий часто применяется различных в технических решениях [16, 17]. Система онтологий может включать L множеств терминов в виде схем соотношений, формирующих тезаурусы с наименованиями N_i , содержащие переменные R и R' , связанные функцией принадлежности, в соответствии с [6].

3 Онтологическая модель промышленных цифровых платформ

Мета-онтологии ИЦП направлены на достижение соответствия между классами, свойствами и отношениями элементов, а также на нормализацию разнообразных данных из онто-

логий нижнего уровня. Онтология предприятия включает описание процессов, представление целей, ценностей, мотивации, организационной культуры и смыслов деятельности [18].

Онтология *SUMO* (*Suggested Upper Merged Ontology*) является гибким средством для представления знаний об элементах систем, заданных в виде БЗ [19]. Его использование позволяет отражать в структуре данных компоненты Индустрии 4.0, являющиеся элементами ПС. Обмен данными между ИС смежных предприятий можно наладить с помощью специальных методов описания онтологий, к которым относится стандарт *OWL*.

Администрирование онтологий предметных областей в экосистемах промышленных цифровых платформ предполагает не только согласование терминологии и концепций между участниками, но и формализацию правил обмена данными между их информационными системами. Для этого используются унифицированные тезаурусы и процедуры семантической валидации, а также автоматизированные средства устранения двусмысленности и неполноты информации.

В качестве таких средств в работе предложен интеллектуальный ассистент, обеспечивающий автоматическое определение координат элементов в многомерной модели *RAMI 4.0* и синхронизацию онтологий разных уровней (мета-, прикладных и корпоративных). Это позволяет достигать консенсуса при интеграции знаний, поддерживать актуальность тезаурусов и регламентировать информационный обмен между предприятиями.

Для построения системы онтологий, представленной на рисунке 1, применён редактор онтологий *Protégé*, который использован для установления соответствий между классами и сущностями разных онтологий. Проведена эмуляция процесса приведения элементов, созданных в прикладных онтологиях предприятий, входящих в экосистему, к мета-онтологии ИЦП. Определён набор классов и предикатов, которые могут автоматически формировать ЦМ элемента ПС в виде онтологии (рисунок 2), в соответствии с требованиями стандартов, перечисленными в таблице 1.

На рисунке 2 представлены основные классы ОМ, такие как *PhysicalAsset*, *DigitalAsset*, *LifeCycleStage* и др., которые определяют типы элементов, используемых при моделировании ИЦП. Определены и классифицированы свойства и отношения выявленных концептов в соответствии с эталонной моделью *RAMI 4.0* и определены основные свойства предикатов для отражения процессов, протекающих на предприятиях, входящих в экосистему ИЦП. Некоторые предикаты, которые связывают эти классы между собой, обеспечивая семантическую целостность

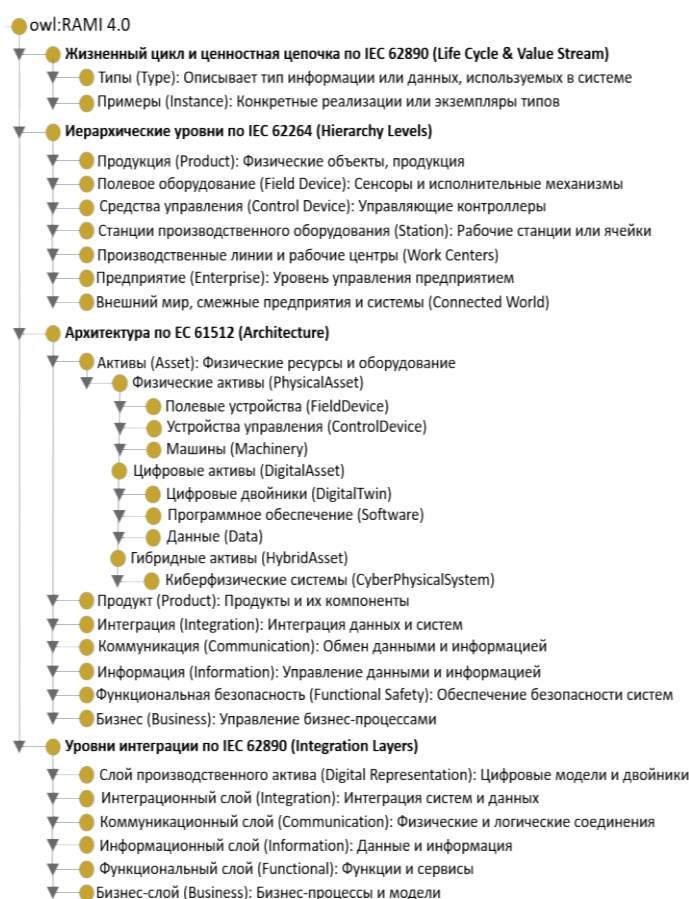


Рисунок 2 - Основные концепты онтологической модели, поддерживающие учёт компонентов Индустрии 4.0

модели согласно трёхмерной структуре *RAMI 4.0*, показаны на рисунке 3. Рисунки 2 и 3 вместе формируют онтологическую структуру, где классы задают понятийный аппарат, а предикаты — правила взаимодействия между элементами модели. Определены предикаты, которые связывают классы и описывают их характеристики. Для каждого из предполагаемых предикатов определены квантор существования и квантор общности в соответствии с (1).

На рисунке 3 представлены ключевые предикаты, используемые в *RAMI 4.0*. Каждый предикат интерпретируется как элемент p_{ij} нечёткого множества требований R_i , определённого выражением (1). Например, предикат *hasPhysicalConnection* характеризует связь между двумя объектами *PhysicalAsset* и относится к множеству R_1 , связанному с этапом ЖЦ *Operation*. Предикат *synchronizesWith*, связывающий *HybridAsset* с *DigitalAsset*, относится к множеству R , которое описывает взаимодействие в слое *CommunicationLayer*. Таким образом, на рисунке 3 представлена модель нечётких требований в структуре ОМ *RAMI 4.0*. Основываясь на принципах применения онтологического подхода в различных областях [20, 21], проведено соотнесение предикатов с классами и определены домен и диапазон для каждого предиката. Например, определено, что предикат *hasPhysicalConnection* имеет домен *PhysicalAsset* и диапазон *PhysicalAsset*, а предикат *synchronizesWith* имеет домен *HybridAsset* и диапазон *DigitalAsset*.

Для включения созданных концептов в структуру *RAMI 4.0* произведено отнесение классов и предикатов согласно требованиям стандартов (таблица 1):

- распределение предикатов по этапам ЖЦ (IEC 62890);
- распределение предикатов по уровням иерархии (IEC 62264);
- распределение предикатов по слоям архитектуры (IEC 61512).

В результате сформирована структура предикатов, которая вместе со структурой классов формирует ОМ (см. рисунок 4).

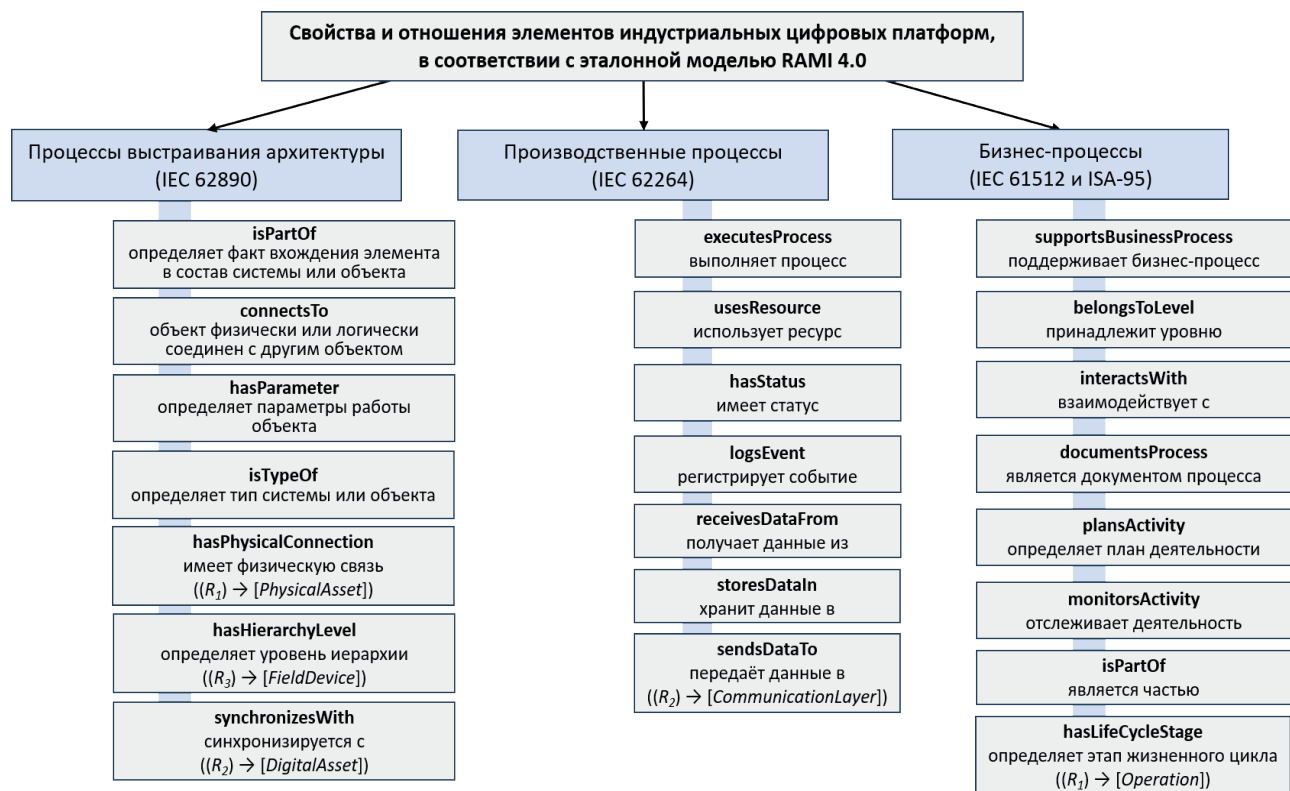


Рисунок 3 - Свойства и отношения элементов промышленных цифровых платформ в соответствии с многомерной моделью *RAMI 4.0*

Рисунок 4 дополняется перечнем классов предикатов OM RAMI 4.0, который представлен в таблице 2 (в него не вошли предикаты OM ИЦП, распределённых по категориям согласно эталонной модели RAMI 4.0).

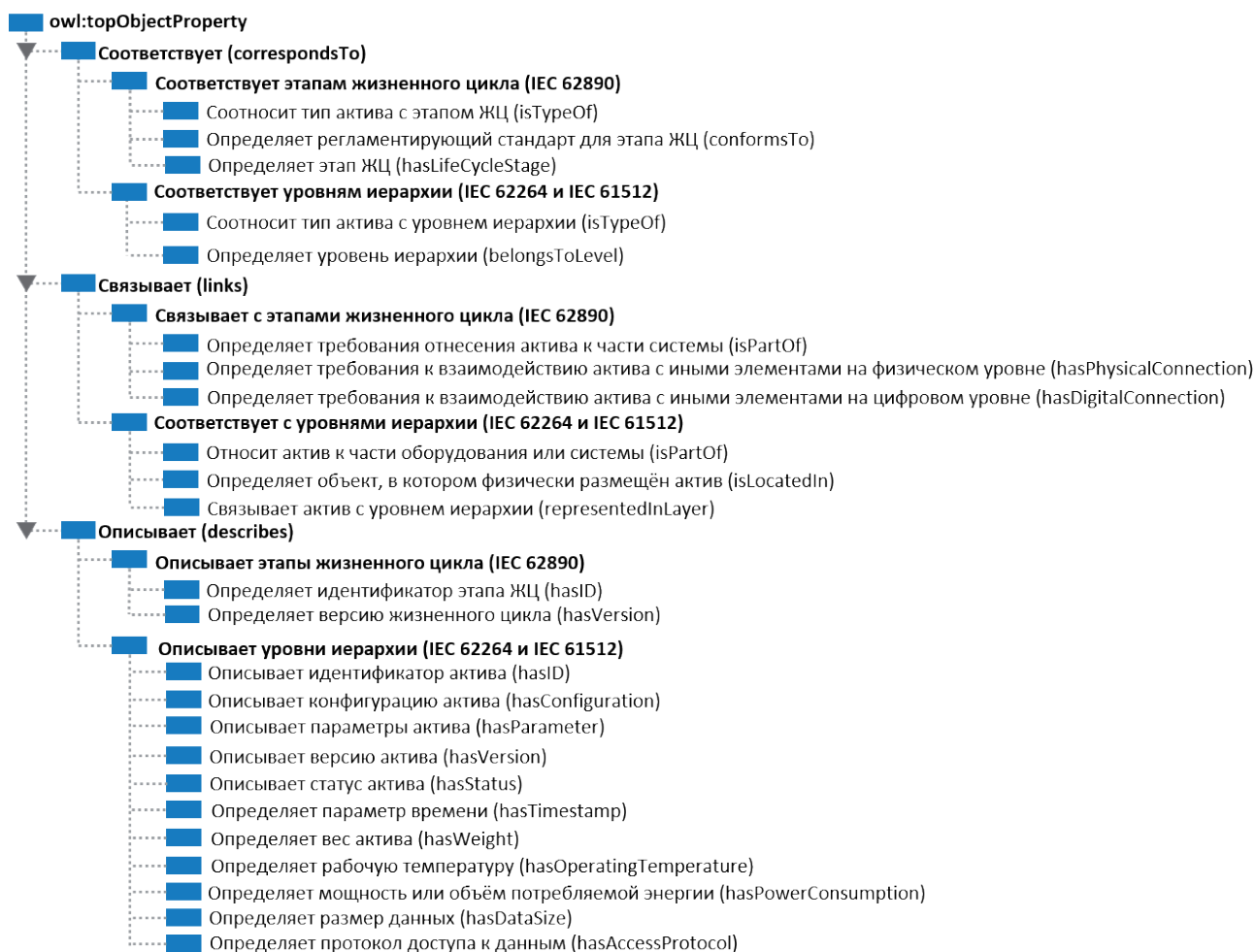


Рисунок 4 - Структура основных предикатов онтологической модели в концепции RAMI 4.0.

Таблица 2 – Классы предикатов онтологической модели RAMI 4.0

Класс предиката	Назначение	Пример
Соответствует (<i>Corresponds</i>)	связывают элементы с их характеристиками или классами	<i>correspondsTo, hasLifeCycleStage</i>
Связывает (<i>Links</i>)	устанавливают связи между элементами	<i>isPartOf, hasPhysicalConnection</i>
Описывает (<i>Describes</i>)	описывают свойства элементов	<i>hasID, hasConfiguration u hasParameter</i>
Взаимодействует (<i>InteractsWith</i>)	устанавливают отношения между элементами	<i>interactsWith, hasPhysicalConnection, synchronizesWith</i>
Управляет (<i>Controls</i>)	описывают механизмы управления	<i>executesProcess, controlledBy</i>
Поддерживает (<i>Supports</i>)	описывают процессы поддержки функционирования объектов	<i>usesResource, supportsBusinessProcess</i>
Оптимизирует (<i>Optimizes</i>)	описывают функции оптимизации процессов	<i>tracksPerformance, plansLeadTime</i>
Получает данные (<i>Receives Data From</i>)	описывают функции получения данных	<i>receivesDataFrom</i>
Передаёт данные (<i>Transfers Data To</i>)	описывают функции передачи данных	<i>sendsDataTo</i>
Запускает (<i>Triggers</i>)	описывают функции запуска процессов и события	<i>triggersProcess, triggersEvent</i>

Предложенная классификация позволяет разделить роли предикатов в рамках модели *RAMI 4.0*, что позволит обеспечить более эффективное управление данными в ИЦП. При такой организации данных заказчик или производитель изделий, находящийся в экосистеме ИЦП, может определить основные сведения о требуемой или производимой продукции, задав её лингвистическое описание, этапы ЖЦ, элементы изделия и связанные с ними элементы ТС согласно п.4.1 стандартов ИЕС 63088 и ГОСТ 59799, включая средства и методы производства.

Для учёта неопределённости требований предложенную структуру предикатов можно представить в виде нечёткой онтологии, где классы и отношения дополняются функциями принадлежности. В таком решении можно использовать динамические концепты, а также концепты в виде разношкальных числовых и лингвистических переменных [22].

Для определения параметров элементов ТС в созданной ОМ на основе лингвистических переменных (R_i , N_i , Y_i), которые могут задавать значения уровня соответствия «представление-связь», разработан ИА, помогающий внести любой элемент ТС в структуру данных ИЦП.

4 Инструменты управления индустриальными цифровыми платформами

Сдерживающими факторами развития ИЦП и концепции «Индустрия 4.0» на современном этапе является отсутствие практических инструментов ввода информации об элементах ТС в структуру данных ИЦП с автоматическим определением координат многомерной модели и показателей семантической связанности понятий, формирующих тезаурусы.

Для применения онтологического подхода управления данными разработан способ автоматизированного ввода новых элементов ТС в ОМ *RAMI 4.0* с использованием ИА, реализованного на открытой программной платформе, позволяющей применять инструменты *Python*. Применение ИА, основанных на искусственных нейронных сетях, помогает анализировать и раскрывать причины аномалий в отдельных образцах, входящих в тезаурусы и в выборке данных, использовать автокодировщики, а также снижать трудозатраты администраторов ИЦП [23].

В ИА использованы библиотеки *Python*: *owlready2* для работы с онтологией *RAMI 4.0*, *spaCy* и *py morphology2* для предобработки текста, *TfidfVectorizer* и *LinearSVC* для классификации элементов, *Streamlit* для построения интерфейса. Все компоненты системы интегрированы в облачную платформу, что позволило реализовать прототип ИА, способный автоматически добавлять новые элементы в ОМ на основе естественно-языковых описаний. ИА выполняет ряд ключевых функций.

- 1) **Настройка среды и загрузка онтологии:** инициализирует программную среду, устанавливает необходимые библиотеки (например, *owlready2*, *scikit-learn*, *py morphology2*), загружает или создаёт базовую ОМ *RAMI 4.0* в хранилище, включая концепты (рисунок 2), предикаты (рисунок 4) и их иерархические отношения.
- 2) **Предобработка текстовых описаний:** выполняет предварительную обработку текстового описания нового элемента (например, «интеллектуальный сенсор температуры в эксплуатации») и описаний категорий ОМ (например, «*Operation*: эксплуатация, использование, работа»), включая приведение к нижнему регистру, лемматизацию и удаление стоп-слов, построение *TF-IDF* векторов для числового представления терминов и понятий при обработке естественного языка, для поиска информации, для определения важности слова по отношению к другим терминам [11]. Процедуры предобработки и интерпретации данных могут быть дополнены метриками качества, определёнными в [12], что

обеспечит количественную оценку достоверности автоматически извлекаемых концептов.

- 3) **Классификация элемента:** определяет тип элемента (*PhysicalAsset*, *DigitalAsset*, *HybridAsset*) путём сравнения *TF-IDF* вектора описания элемента с векторами категорий типов активов с использованием косинусного сходства [11, 24].
- 4) **Определение координат в многомерной модели:** устанавливает координаты элемента по трём осям в соответствии с концепцией *RAMI 4.0* на основе сравнения *TF-IDF* векторов описания элемента с векторами соответствующих категорий.
- 5) **Интеграция элемента в онтологию:** добавляет новый элемент как экземпляр в онтологию (например, «интеллектуальный сенсор» как экземпляр *PhysicalAsset*), присваивает предикаты (например, *hasLifeCycleStage Operation*) и связи (например, *sendsDataTo CommunicationLayer*) на основе координат, сохраняя обновлённую онтологию.
- 6) **Валидация соответствия стандартам:** проверяет корректность интеграции элемента, сравнивая координаты и связи с требованиями стандартов [3-5], и вносит корректировки при необходимости. В перспективе, механизм валидации может быть расширен за счёт внедрения показателей безопасности в соответствии [14], что позволит оценивать не только семантическую корректность, но и защищённость данных в онтологии.
- 7) **Представление результатов:** форматирует и отображает итоговые координаты (например, *Operation*, *FieldDevice*, *Asset*) и создаёт описание элемента.
- 8) **Корректировка на основе обратной связи:** принимает уточнённое описание элемента от пользователя (например, «умный сенсор в разработке»), повторно выполняет классификацию и интеграцию, обновляя онтологию при необходимости.

ИС ИЦП, *ERP*-система и ИА формируют систему интеллектуального обмена данными и синхронизации сведений об используемых активах для всех субъектов экосистемы. На рисунке 5 показана модель бизнес-процесса в случае, когда один из участников ИЦП создаёт новый элемент ТС в корпоративной *ERP*-системе, который должен занять своё место в структуре данных ИЦП и получить свой адрес в многоуровневой модели *RAMI*.

Такие процессы включают процедуры передачи сведений о новых элементах из корпоративных *ERP*-систем участников ИЦП в её онтологию (процесс «туда») и процедуры записи в корпоративные *ERP*-системы новых элементов, содержащихся в мета- и прикладных онтологиях ИЦП (процесс «обратно»). При создании нового объекта в *ERP*-системе (в процессе «туда») оператор выбирает или создаёт объект в справочнике (например, «Номенклатура») и подбирает связи с другими объектами посредством предикатов, используя справочник «Предикаты». При этом объект описывается в виде набора триплетов: «объект – предикат – цель».

Если новый объект описан на естественном языке, то ИА проводит предобработку текста (лемматизация, удаление стоп-слов, построение *TF-IDF*), интерпретацию терминов через унифицированный тезаурус и производит формирование триплетов характеристик этого элемента (R_i , N_i , X_i). Задача ИА – запросить мета-онтологию для сопоставления понятий, определить класс объекта по прикладной онтологии и обновить корпоративную онтологию предприятия. На основе предикатов и связей вычисляются координаты *RAMI*, т.е. определяется иерархия, ЖЦ и уровень абстракции элемента. ИА формирует *OWL/RDF*-граф объекта и экспортирует его в ИЦП, где он связывается с верхнеуровневыми и прикладными онтологиями ИЦП (см. рисунок 5).

В случае появления нового элемента ТС в ИЦП (в процессе «обратно») платформа инициирует автоматическую рассылку участникам цифровой экосистемы уведомлений с вложением в формате *TXT* или *XML*, а ИА осуществляет интерпретацию параметров элемента (координаты *RAMI*, связи, предикаты, атрибуты) и производит проверку уникальности для автоматического формирования объектов *ERP*-системы. Если оператор *ERP*-системы на осно-

вании своих задач и практического опыта принимает решение об отображении в его системе нового элемента, то он запускает процедуру формирования новых объектов БД в *ERP*-системе, которые могут быть включены в состав ЦМ изделия, предприятия или производственного процесса (см. нижний уровень рисунка 1).

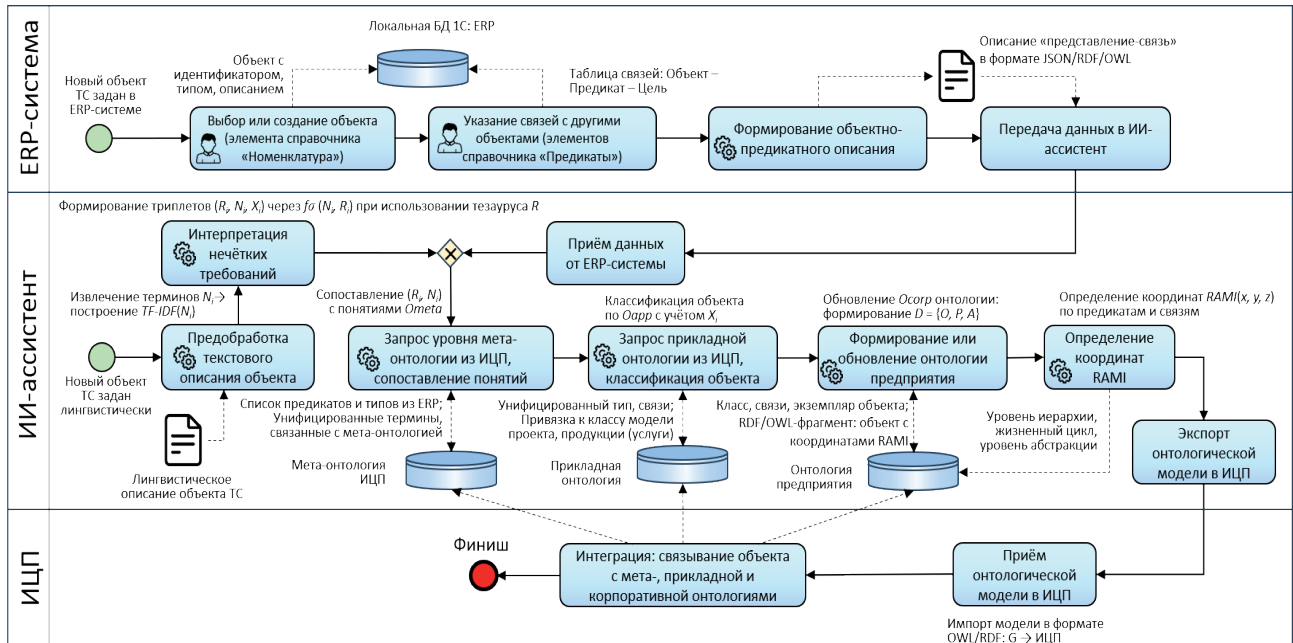


Рисунок 5 – Процесс автоматического определения координат модели *RAMI* для элементов технической (производственной) системы с использованием интеллектуального ассистента

Предложенный способ позволяет обрабатывать лингвистические данные без предварительного структурирования, а также управлять процессом добавления элементов ИЦП, которые могут вноситься операторами *ERP*-систем предприятий. Это достигается благодаря автоматическому извлечению концептов и связей из естественно-языковых описаний.

Для применения операторами *ERP*-систем совместно с ИА предложенного подхода разработана структура данных *ERP*-системы на платформе «1С: Предприятие». При определении свойств объекта в специализированном справочнике оператор имеет возможность подставить набор предикатов, описывающих его связь с осями многомерной модели, из другого специализированного справочника. При выгрузке данных на ресурсы ИЦП они занимают своё место в её структуре. Таким образом, предикаты, отражённые на рисунках 3 и 4, становятся элементами соответствующих справочников 1С с наборами дополнительных реквизитов, которые являются предикатами разработанной ОМ. Информация, сформированная аналитиками в онтологии с помощью ИА, может использоваться операторами *ERP*-систем.

Применение описанного подхода возможно в ПС, использующих методы автоматического лингвистического анализа для формирования онтологий без ручной структуризации исходных данных.

Заключение

Предложенный подход онтологического проектирования ИЦП основан на стандартизации, интеграции и автоматизации управления данными в экосистемах Индустрии 4.0. Операторы *ERP*-систем предприятий имеют возможность создавать объекты систем в БЗ или подбирать предикаты ОМ в ИС в соответствии с требованиями стандартов, на которых базиру-

ется концепция *RAMI*. Многоуровневая система онтологий, включающая мета-онтологию, прикладные онтологии и онтологии предприятий, обеспечивает формализацию знаний об элементах ТС и их связях, соответствующую требованиям действующих стандартов. Применение ИА позволит автоматически формировать структуру данных о ТС, корректируя сведения о них методами нечёткой логики.

Список источников

- [1] ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Стандартизованные процедуры проектирования производственных систем. Часть 3. Информационные потоки в процессах производственного планирования. М.: Стандартинформ, 2020. 44 с.
- [2] **Gruber T.R.** A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993.
- [3] IEC/PAS 63088:2017. Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. 58 p.
- [4] IEC 62264-1:2013. Enterprise-control system integration. Part 1: Models and terminology. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. 82 p.
- [5] ГОСТ Р 59799-2021. Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0). М.: Российский институт стандартизации. 2021. 30 с. Введён в действие: 25.10.2021.
- [6] ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1—2021. Информационные технологии. Верхнеуровневые онтологии (TLO). Часть 1. Требования. М.: Стандартинформ, 2021. 36 с.
- [7] **Frechette S.** Model Based Enterprise for Manufacturing, 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems, Madison, WI, 2011. 11 p. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=908343.
- [8] **Bär M.A., Colombo A.W.** Engineering ICPS for small and medium enterprises: A Novel Din Spec 91345 Compliant Digitalization Approach. *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*. 2023. V.1. P.307-321. DOI: 10.1109/TICPS.2023.3328840.
- [9] **Массель Л.В., Ворожцова Т.Н.** Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №3 (37). С.327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [10] **Рутковский Л.** Методы и технологии искусственного интеллекта. М.: Горячая линия–Телеком, 2010. 520 с.
- [11] **Gulić M., Magdalenic I., Vrdoljak B.** Ontology Matching Using TF/IDF Measure with Synonym Recognition. In: Skersys, T., Butleris, R., Butkiene, R. (eds) Information and Software Technologies. ICIST 2013. Communications in Computer and Information Science. (2013), vol 403. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-41947-8_3
- [12] ГОСТ Р 70846.3-2023. Качество данных. Часть 115. Онтологии для управления качеством данных. М.: Стандартинформ, 2023. 28 с.
- [13] **Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я.** Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
- [14] **Sampath Kumar V.R., Khamis A.L., Fiorini S. and other authors.** Ontologies for Industry 4.0. *The Knowledge Engineering Review*, 2019. Vol.34, e 1-14. DOI:10.1017/S0269888919000109.
- [15] ГОСТ Р 59798-2021. Информационные технологии. Контроль и управление рисками в области информационной безопасности. Практические рекомендации. — М.: Стандартинформ, 2021. — 40 с.
- [16] **Тельнов Ю.Ф., Трёмбач В.М., Данилов А.В., Ярошенко Е.В., Казаков В.А., Козлова О.А.** Построение структуры сетевого предприятия для создания инновационных продуктов. *Открытое образование*. 2019. Т.23. №6. С.59-73. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73.
- [17] **Шполянская И.Ю.** Референтная онтологическая модель бизнеса как основа создания web-ориентированных систем и сервисов. *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)*. 2015. №2(50). С.220-226.
- [18] **Шведин Б.Я.** Онтология предприятия: экспириентологический подход. Технология построения онтологической модели предприятия на основе анализа и структурирования живого опыта. М.: ЛЕНАНД, 2010. 240 с.
- [19] **Пасек Т.** Введение в Suggested Upper Merged Ontology (SUMO). М.: Изд-во МГУ, 2015. 156 с.
- [20] **Фомин И.Н.** Применение инструментов онтологического анализа для формирования расчётных моделей электроснабжения. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №4(38). С.477-488. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-477-488.
- [21] **Похабов Ю.П.** Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №1 (31). С.24-35. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-24-35.

- [22] Дли М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М., Моргунова Э.В. Нечёткая динамическая онтологическая модель для поддержки принятия решений по управлению энергоёмкими системами на основе прецедентов. *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18. № 5 (107). С.59-76.
- [23] Левшун Д.А., Левшун Д.С., Котенко И.В. Обнаружение и объяснение аномалий в промышленных системах Интернета вещей на основе автокодировщика. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №1(55). С.96-113. DOI 10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.
- [24] Яшина А.Г., Прозоров Д.Е. Модель информационного поиска речевых документов по текстовому запросу на основе фонемного транскрибирования и TF-IDF-меры // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. - 2014. - № 1 (26). - С. 69-78.

Сведения об авторе



Фомин Игорь Николаевич, 1969 г. рождения. Окончил в 1995 году Московский государственный открытый университет по специальности электропривод и автоматизация производственных предприятий, в 2012 году окончил магистратуру Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина (СГТУ) по специальности информатика и вычислительная техника, к.т.н. (2016). Член Национальной палаты инженеров России, доцент СГУ имени Н.Г. Чернышевского, доцент СГТУ, старший научный сотрудник Института проблем точной механики и управления Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук». В списке научных работ более 60 публикаций в области структурирования информации, цифровизации энергетики и системного анализа. AuthorID (РИНЦ): 748971. ORCID: 0000-0003-3491-6888. www.infomin.ru. ignik16@yandex.ru.

Поступила в редакцию 13.03.2025, после рецензирования 22.08.2025. Принята к публикации 29.08.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-535-551

Ontologies in designing industrial digital platforms

© 2025, I.N. Fomin

Institute of Precision Mechanics and Control – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, (IPMC RAS), Saratov, Russia

Abstract

The article explores the use of an ontological approach in designing industrial digital platforms within the framework of the Industry 4.0 paradigm. An approach to creating knowledge bases of technical system components using ontological models and fuzzy logic is proposed. The Industry 4.0 reference model is represented through ontologies, incorporating standards from smart manufacturing and ontology engineering applied to business model development. The study classifies the properties and interrelations of technical system elements that possess digital representations within industrial digital platforms. A multi-level ontology framework is introduced, comprising a meta-ontology, applied ontologies, and enterprise ontologies, which together enable data standardization and integration within digital platform ecosystems. The functions of an intelligent assistant for automated input of elements into ontological models in the context of Industry 4.0 are defined. A data structuring tool for corporate information systems in mechanical engineering and energy, based on the 1C: Enterprise platform, has been developed. The results demonstrate that applying an ontological approach to the management of industrial digital platforms and the creation of digital models of products and their manufacturing processes ensures a unified interpretation of data across all entities within production ecosystems, promotes interoperability and automation of knowledge processing throughout the product life cycle, facilitates the integration of new elements, and supports compliance with Industry 4.0 standards.

Keywords: ontological approach, technical system, production system, digital platform, design, intelligent assistant, Industry 4.0.

Citation: Fomin IN. Ontologies in designing industrial digital platforms [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(4): 535-551. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-535-551.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Multi-level ontology framework for organizing industrial digital platforms

Figure 2 – Key concepts of the ontological model supporting the representation of Industry 4.0 components

Figure 3 – Properties and relationships of industrial digital platform elements in accordance with the multidimensional RAMI 4.0 model

Figure 4 – Structure of the main predicates of the ontological model within the RAMI 4.0 framework

Figure 5 – Process of automatic determination of RAMI model coordinates for elements of a technical (production) system using an intelligent assistant

Table 1 – Systems engineering standards in the design of industrial digital platforms (example)

Table 2 – Predicate classes of the RAMI 4.0 ontological model

References

- [1] GOST R ISO 18828-3–2020. Industrial automation systems and integration. Standardized design procedures for manufacturing systems. Part 3. Information flows in manufacturing planning processes [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2020. 44 p.
- [2] **Gruber TR**. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition. 1993.
- [3] IEC/PAS 63088:2017. Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. 58 p.
- [4] IEC 62264-1:2013. Enterprise-control system integration. Part 1: Models and terminology. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. 82 p.
- [5] GOST R 59799–2021. Industry 4.0. Smart manufacturing. Reference architecture model of Industry 4.0 (RAMI 4.0) [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2021. 30 p.
- [6] GOST R ISO/IEC 21838-1–2021. Information technology. Top-level ontologies (TLO). Part 1. Requirements [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2021. 36 p.
- [7] **Frechette S**. Model Based Enterprise for Manufacturing. 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems, Madison, WI, 2011. 11 p. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=908343.
- [8] **Bär MA, Colombo AW**. Engineering ICPS for small and medium enterprises: A novel Din Spec 91345 compliant digitalization approach. IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems. 2023; 1: 307-321. DOI: 10.1109/TICPS.2023.3328840.
- [9] **Massel LV, Vorozhtsova TN**. Ontological approach to the construction of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(3): 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [10] **Rutkovskiy L**. Methods and technologies of artificial intelligence [In Russian]. Moscow: Goryachaya Liniya–Telecom, 2010. 520 p.
- [11] **Gulić M, Magdalenic I, Vrdoljak B**. Ontology matching using TF/IDF measure with synonym recognition. In: Skersys T, Butleris R, Butkiene R. (eds). Information and Software Technologies. ICIST 2013. Communications in Computer and Information Science. Vol. 403. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41947-8_3
- [12] GOST R 70846.3–2023. Data quality. Part 115. Ontologies for data quality management [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2023. 28 p.
- [13] **Melikhov AN, Bershteyn LS, Korovin SYa**. Situational advisory systems with fuzzy logic [In Russian]. Moscow: Nauka, 1990. 272 p.
- [14] **Sampath Kumar VR, Khamis AL, Fiorini S. et al**. Ontologies for Industry 4.0. The Knowledge Engineering Review. 2019; 34: e1–14. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S0269888919000109>. DOI: 10.1017/S0269888919000109.
- [15] GOST R 59798–2021. Information technology. Risk control and management in the field of information security. Practical recommendations [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2021. 40 p.
- [16] **Telnov YuF, Trembach VM, Danilov AV, Yaroshenko EV, Kazakov VA, Kozlova OA**. Building the structure of a network enterprise for developing innovative products [In Russian]. *Open Education*. 2019; 23(6): 59–73. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73.

-
- [17] **Shpolyanskaya IYu.** Reference ontological business model as a basis for creating web-oriented systems and services [In Russian]. Bulletin of Rostov State Economic University (RINH). 2015; 2(50): 220–226.
 - [18] **Shvedin BYa.** Ontology of enterprise: An experientological approach. Technology of constructing an ontological model of the enterprise based on analysis and structuring of living experience [In Russian]. Moscow: LENAND, 2010. 240 p.
 - [19] **Pasek T.** Introduction to Suggested Upper Merged Ontology (SUMO) [In Russian]. Moscow: MSU Press, 2015. 156 p.
 - [20] **Fomin IN.** Application of ontological analysis tools for the formation of calculation models of power supply [In Russian]. Ontology of Designing. 2020; 10(4): 477–488. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-477-488.
 - [21] **Pokhabov YuP.** Designing complex products with small probability of failure in the context of Industry 4.0 [In Russian]. Ontology of Designing. 2019; 9(1): 24–35. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-24-35.
 - [22] **Dli MI, Chernovalova MV, Sokolov AM, Morgunova EV.** Fuzzy dynamic ontological model for decision support in managing energy-intensive systems based on precedents [In Russian]. Applied Informatics. 2023; 18(5): 59–76.
 - [23] **Levshun DA, Levshun DS, Kotenko IV.** Detecting and explaining of anomalies in industrial IoT systems using an autoencoder [In Russian]. Ontology of Designing. 2025; 15(1): 96–113. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.
 - [24] **Yashina AG, Prozorov DE.** Model of information retrieval of speech documents based on text query using phoneme transcription and TF-IDF measure [In Russian]. Algorithms, Methods and Data Processing Systems. 2014; 1(26): 69–78.
-

About the author

Igor Fomin (b. 1969) graduated in 1995 from Moscow State Open University with a specialist degree in Electric Drives and Automation of Industrial Enterprises. In 2012, he obtained a Master's degree in Computer Science and Engineering from Gagarin Saratov State Technical University, and in 2016 completed postgraduate studies at the same university in the field of Systems Analysis. He is a member of the National Chamber of Engineers of Russia, an associate Professor at N.G. Chernyshevsky Saratov State University and Gagarin Yu. A. Saratov State Technical University, and a senior researcher at the Institute for Problems in Precision Mechanics and Control, a division of the Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. He is the author of more than 60 scientific publications in the fields of information structuring, energy digitalization, and systems analysis. AuthorID: 748971. ORCID: 0000-0003-3491-6888. www.infomin.ru. ignik16@yandex.ru.

Received March 13, 2025. Revised August 22, 2025. Accepted August 29, 2025.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 001.92

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-552-565

МП-целостность при проектировании реляционных моделей баз данных

© 2025, В.В. Миронов ✉, К.В. Миронов

Уфимский университет науки и технологий (УУНТ), Уфа, Россия

Аннотация

Обсуждается особый вид целостности в базах данных – целостность «множественности предка» (МП-целостность), понятие которого было введено авторами на концептуально-онтологическом уровне применительно к моделям «сущность–связь». В данной статье это понятие распространяется на реляционную модель с целью практического применения при создании баз данных. Рассматриваются связанные с этим видом целостности понятия: линия восходящего родства, отношение и ограничение множественности предка. Для перехода к реляционной модели требуется учёт также первичных и внешних ключей, ссылочной целостности, табличных триггеров. В качестве универсального средства обеспечения целостности в реляционной среде предлагается подход на основе применения триггеров базы данных. Триггеры обнаруживают и блокируют операции вставки и обновления строк в таблицах, которые ведут к нарушению целостности. Отмечается необходимость процедурного программирования триггеров, а также сложность переноса данных между системами баз данных разного вида из-за различий языков процедурного программирования. Предлагается подход на основе использования возможностей поддержания ссылочной целостности. В этом случае целостность множественности предка обеспечивается как часть ссылочной целостности. Конкретное решение зависит от использования простых/составных, натуральных/суррогатных ключей, а также от технических ограничений среды реализации базы данных. Может потребоваться введение избыточных компонентов в состав ключей для отслеживания экземпляра предка вдоль линий восходящего родства. Приведены тестовые примеры реляционных моделей в различных реляционных средах (полностью – в *MySQL* и *MariaDB*, и частично в *PostgreSQL*, *MS SQL Server*, *Oracle Database*).

Ключевые слова: модель «сущность–связь», реляционная модель, множественность предка, линия восходящего родства, триггеры базы данных, внешние ключи, ссылочная целостность.

Цитирование: Миронов В.В., Миронов К.В. МП-целостность при проектировании реляционных моделей баз данных. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.552-565. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-552-565.

Вклад авторов: Миронов В.В. – идея, концепция, формализм; Миронов К.В. – модели, алгоритмы, программирование и отладка в различных средах.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Онтологический подход при проектировании баз данных (БД) [1, 2] позволяет задавать целевые информационные потребности и ограничения целостности на этапе концептуального проектирования БД [3, 4]. В работе [5], базируясь на онтологическом подходе, введена целостность множественности предка (МП-целостность) – специфическое ограничение целостности, которое часто встречается на практике. Рассмотрение МП-целостности выполнено в рамках модели «сущность–связь» (СС-модель) – модели концептуального уровня абстракции, отражающей онтологические особенности предметной области в виде системы классов

сущностей и связей. Подобные модели разрабатываются на начальной стадии проектирования БД независимо от способа её реализации. На следующей стадии создаются логические модели, учитывающие возможности и ограничения используемой системы управления БД (СУБД) [6–8]. Наиболее распространённой основой для построения БД являются реляционные СУБД [9].

Данная статья посвящена исследованию практического применения МП-целостности в реляционной среде. Обсуждаются базовые положения МП-целостности, существенные особенности реляционной модели (РМ), обеспечение МП-целостности на основе суррогатных и натуральных ключей. На это исследование значительное влияние оказали работы в области философия «реляционной онтологии» [10, 11], онтологических аспектов системного анализа [12–14], применение онтологического подхода [15, 16].

1 Базовые положения МР-целостности

Здесь представлено развитие базовых понятий и положений МР-целостности, введённых в [5] (см. рисунок 1).

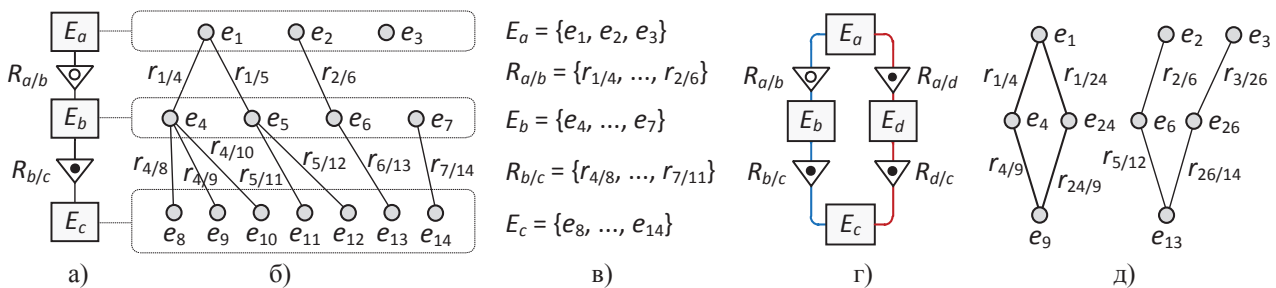


Рисунок 1 – К понятию МП-целостности:

- а) – пример СС-модели как модели классов; б) – пример экземпляров сущностей и связей;
 в) – сущности и связи как множества экземпляров; г) – МП-отношение двух ЛВР;
 д) – экземпляры с несогласованной МП-целостностью

СС-модель задаёт онтологию БД в виде множества классов сущностей и множества классов бинарных связей типа «родитель–ребёнок» («один-ко-многим»). Рассматривается связка «класс–экземпляр», в которой каждый класс содержит множество экземпляров.

Линия восходящего родства (ЛВР) – цепочка «ребёнок–родитель», ведущая от некоторого потомка к некоторому предку («снизу вверх»). ЛВР L представляет собой последовательность классов сущностей E , в которой каждая последующая сущность является родителем своей предшествующей сущности через некоторую связь R из множества классов связей (см. рисунок 1а):

$$L = E_c \xrightarrow{R_{b/c}} E_b \xrightarrow{R_{a/b}} E_a.$$

ЛВР как класс представляет собой множество экземпляров l , где экземпляры – это цепочки экземпляров сущностей e , ведущих от экземпляра потомка к экземпляру своего предка (см. рисунок 1б):

$$L = \{l_{8\backslash 1}, l_{9\backslash 1}, l_{10\backslash 1}, l_{11\backslash 1}, l_{12\backslash 1}, l_{13\backslash 2}, l_{14\backslash \text{null}}\}.$$

Например, ЛВР-экземпляры $l_{8\backslash 1}$ и $l_{14\backslash \text{null}}$ представляют собой цепочки

$$l_{8\backslash 1} = e_8 \xrightarrow{r_{4/8}} e_4 \xrightarrow{r_{1/4}} e_1 \quad \text{и} \quad l_{14\backslash \text{null}} = e_{14} \xrightarrow{r_{7/14}} e_7 \rightarrow \text{null}.$$

ЛВР как функция для каждого аргумента – экземпляра потомка – задаёт экземпляр предка (или null-значение). Например, на рисунке 1б

$$L(e_8) = L(e_9) = L(e_{10}) = L(e_{11}) = L(e_{12}) = e_1, \quad L(e_{13}) = e_2, \quad L(e_{14}) = \text{null}.$$

МП-отношение – это совокупность M нескольких ЛВР, ведущих разными путями от общего потомка (МП-потомка) к общему предку (МП-предку). На рисунке 1г представлено МП-отношение, содержащее две ЛВР:

$$M = \{L_1 | L_2\}, \quad L_1 = E_c \xrightarrow{R_{b/c}} E_b \xrightarrow{R_{a/b}} E_a, \quad L_2 = E_c \xrightarrow{R_{d/c}} E_d \xrightarrow{R_{a/d}} E_a.$$

МП-ограничение – это условие (предикат), заданное на МП-отношении, которое накладывается на совместные значения экземпляров МП-предка, полученные для каждого экземпляра МП-потомка через различные ЛВР. Это может быть:

- МП-равенство ($МП^+$), если требуется, чтобы у каждого экземпляра МП-потомка был один и тот же экземпляр МП-предка для всех ЛВР;
- МП-неравенство ($МП^-$), если требуется, чтобы у каждого экземпляра МП-потомка были разные экземпляры МП-предка всех ЛВР;
- более сложное условие.

Таким образом, МП-целостность СС-модели соответствует выполнению всех установленных МП-ограничений. В примере на рисунке 1д приведены два экземпляра МП-отношения, которые не удовлетворяют условиям $МП^+$ / $МП^-$. Если в этом примере требуется $МП^+$ -целостность, то у экземпляров e_6 и e_{26} должен быть один общий экземпляр МП-предка; если же требуется $МП^-$ -целостность, то у экземпляров e_4 и e_{24} должно быть два разных экземпляра МП-предка.

2 Особенности реляционной модели для МП-целостности

Для выполнения МП-целостности в РМ требуется учитывать их особенности [10]. В РМ классам сущностей соответствуют таблицы реляционной БД. Атрибутам сущностей соответствуют столбцы таблицы. Экземплярам сущностей соответствуют строки таблицы. Строки идентифицируются значениями столбцов, составляющих первичный ключ (*Primary Key* – *PK*). *PK* может быть задан двумя способами:

- в виде суррогатного ключа (*Surrogate Key* – *SK*) – дополнительного числового столбца в таблице, для которого при вставке новой строки автоматически генерируются уникальные значения (значения *SK* неизменны в течение жизни строки таблицы);
- в виде натурального ключа (*Natural Key* – *NK*) – одного или нескольких столбцов таблицы, соответствующих первичным атрибутам сущности (*NK* могут быть составными, значения *NK* могут изменяться в течение жизни строки таблицы).

Помимо *PK* в таблице может быть задано несколько альтернативных ключей (*Unique Key* – *UK*), каждый из которых тоже идентифицирует строки таблицы. Связи между сущностями реализуются с помощью внешних ключей (*Foreign Key* – *FK*), которые представляют собой *PK* (или *UK*) таблицы-родителя, скопированные в таблице-ребёнке. Таким образом, *FK* является ссылкой из таблицы-ребёнка на таблицу-родителя. Для идентифицирующих связей *FK* входит в состав *PK* таблицы, а для неидентифицирующих не входит.

В БД автоматически поддерживается ссылочная целостность (*Referential Integrity* – *RI*), основанная на принципе: не должно быть детей несуществующих родителей, т.е. для каждого значения *FK* должно существовать такое же значение *PK* (*UK*) в таблице-родителе. В СУБД реализуется *RI* путём контроля операций обработки данных в соответствии с выбранными типами *RI*-правил, например:

- правило *RESTRICT* («строгое», действует по умолчанию) блокирует операцию вставки, удаления или обновления, если она ведёт к нарушению ссылочной целостности;
- правило *ON UPDATE CASCADE* («каскадное обновление») автоматически обновляет значения *FK* при обновлении соответствующего *PK/UK* и др.

Для обеспечения нестандартных требований целостности предусмотрены триггеры БД (*DB Triggers*) – особые процедуры, хранимые в БД. Триггер связан с таблицей и автоматически запускается при работе с данными в этой таблице. Например, триггер типа *BEFORE INSERT* запускается перед выполнением операции вставки в таблицу новой записи, а триггер типа *BEFORE UPDATE* – перед выполнением операции обновления существующей записи. Процедура триггера может в т.ч. проверять текущее содержимое таблиц БД и на этом основании блокировать выполнение операции.

3 МП-целостность при использовании суррогатных ключей

При обеспечении МП-целостности в реляционной БД на основе *СК* необходимо учитывать две особенности: неидентифицирующий характер связей между таблицами; неизменность значений ключей – идентификаторов строк таблицы.

Первая особенность выражается в том, что экземпляры дочерних сущностей идентифицируются независимо от своих родителей. На концептуальной модели это обстоятельство отражается наличием светлых квадратиков в символах связи (рисунок 2а). В этом примере все сущности, кроме сущности Сдача, самоидентифицирующиеся, т.е. идентификация их экземпляров не зависит от того, с какими экземплярами других сущностей они связаны.

Сущность Сдача не является самоидентифицирующейся, каждый её экземпляр соответствует некоторой паре экземпляров сущностей Студент и Предмет, т.е. является полным «иждивенцем» своих «кормильцев» Студент и Предмет. Это обстоятельство отражено в модели наличием темных квадратиков у символов связи.

При переходе к РМ сущности становятся таблицами (см. рисунок 2б). В каждой таблице, если она не является полным иждивенцем, размещается *СК* (*СК* обозначены звёздами, а имена содержат префикс «Ид» – идентификатор). Связи преобразуются в *FK* (*FK* обозначены треугольниками, указывающими на соответствующий ключ родительской таблицы).

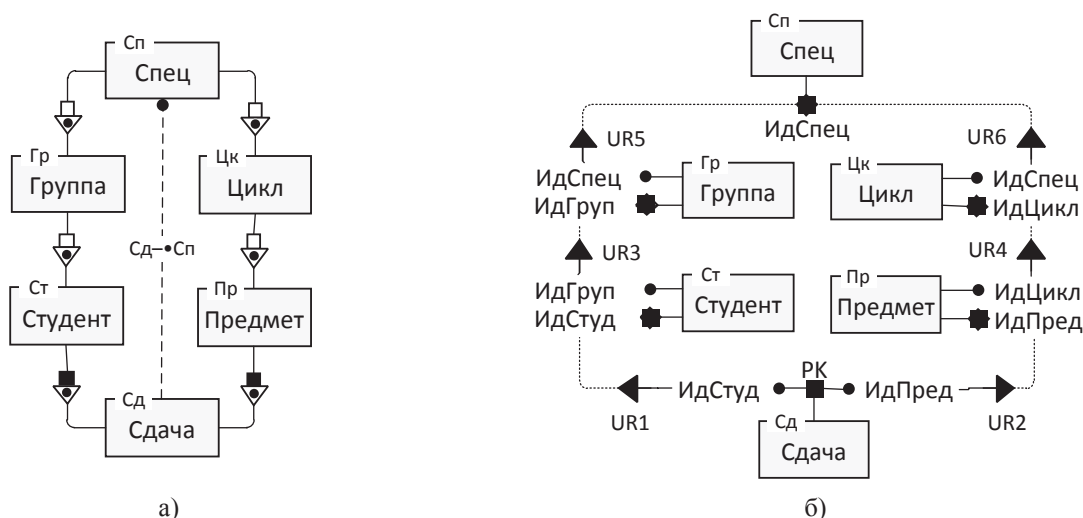


Рисунок 2 – Пример моделей с неидентифицирующими связями:
а) – СС-модель; б) – реляционная модель на основе суррогатных ключей

Таблицы, являющиеся полными иждивенцами (таблица Сдача), получают составной *РК* (отмечен тёмным квадратом), компонентами которого являются *FK*, ссылающиеся на родителей-кормильцев. Для *FK* задаются *RI*-правила (поскольку значения *СК* не изменяются в течение жизненного цикла (ЖЦ), это RESTRICT-правило). На рисунке 2а МП-отношение $Сд \rightarrow Сп$ запрещает студенту сдачу «чужих» предметов и содержит две ЛВР, заданные цепочками ссылок *FK*:

$$Сд \rightarrow Сп = \left\{ Сд \xrightarrow{UR1} Ст \xrightarrow{UR2} Гр \xrightarrow{UR3} Сп \mid Сд \xrightarrow{UR2} Пр \xrightarrow{UR4} Цк \xrightarrow{UR6} Сп \right\}.$$

Здесь стрелка обозначает *RI*-ограничение; слева от стрелки – таблица, в которой определено это ограничение; справа – родительская таблица, на которую ссылается ограничение; над стрелкой указано имя ограничения.

Операции, которые потенциально могут привести к нарушению МП-целостности, связаны с операциями работы с данными *FK* во всех таблицах МП-отношения, за исключением таблицы МП-предка (таблицы Спец).

- Для таблицы, являющейся МП-потомком, – это операции вставки новой строки (INSERT) или изменения (UPDATE) в существующей строке значений *FK*, являющихся компонентами *PK*. В примере на рисунке 2б это относится к таблице Сдача, в которую может быть добавлена новая или изменена имеющаяся строка так, что появляется сдача студентом «чужого» предмета. Такие операции возможны без нарушения *RI*-целостности: для этого достаточно, чтобы новые значения *FK* соответствовали какому-нибудь студенту из таблицы Студент и какому-нибудь предмету из таблицы Предмет.
- Для промежуточных таблиц МП-отношения – это изменение в существующей строке значения *FK*. Например, при переводе некоторого студента в группу, обучающуюся на другой специальности, путём изменения значения *FK* UR3 *RI*-целостность сохранится, но МП-целостность будет нарушена.

Предлагаются два подхода к обеспечению МП-целостности в этом случае: с помощью табличных триггеров или с помощью избыточных *FK*.

3.1 Обеспечение МП-целостности на основе триггеров базы данных

Этот подход предполагает создание БД-триггеров, контролирующих ситуации нарушения МП-целостности и блокирующих соответствующие операции обработки данных. Это BEFORE-триггеры, срабатывающие перед исполнением операции.

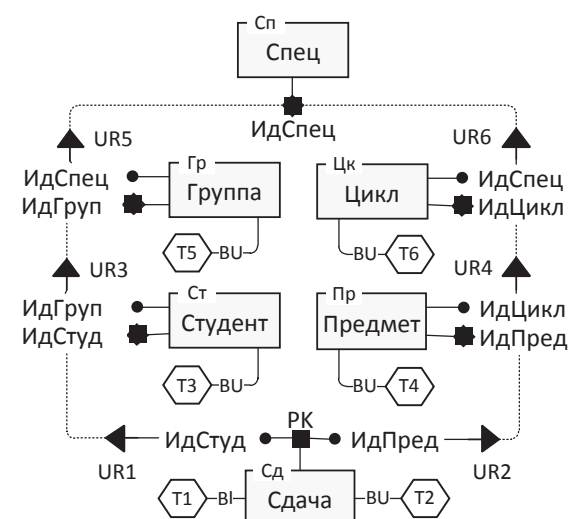


Рисунок 3 – Пример использования суррогатных ключей и триггеров для обеспечения МП-целостности

На рисунке 3 приведён пример РМ на основе *SK* (см. рисунок 2б), дополненной триггерами для обеспечения МП-целостности. Триггеры обозначены шестиугольниками, тип триггера указан в разрыве линии, соединяющей его с родительской таблицей:

- BI – триггер T1 BEFORE INSERT, привязан к таблице Сдача;
- BU – триггеры T2–T6 BEFORE UPDATE, привязаны к таблицам Сдача, Студент, Предмет, Группа и Цикл соответственно.

Триггер T1 срабатывает перед вставкой новой строки в таблицу Сд (Сдача), соответствующую МП-потомку. Процедура триггера, основываясь на вставляемых значениях столбцов-атрибутов сдачи ИдСтуд и ИдПред, должна определить значения атрибутов ИдСпец по разным ЛВР (т.е. соответствующие сдававшему студенту и сданному предмету) и в случае их

несовпадения выдать команду блокирования операции вставки.

Триггер T2 срабатывает перед изменением строки в МП-потомке в таблице Сд. Процедура триггера должна выполнить те же действия, что и в триггере T1, т.е. для изменяемых значений атрибутов сдачи ИдСтуд и ИдПред определить значения атрибутов ИдСпец сдававшего студента и сданного предмета и при несовпадении заблокировать операцию обновления.

Триггеры T3–T6 срабатывают перед изменением строки в промежуточных таблицах МП-отношения (в таблицах Ст, Пр, Гр и Цк соответственно). Особенность этих таблиц в том, что модифицируемой строке в общем случае может соответствовать ноль, одна или несколько дочерних строк в МП-потомке (в таблице Сд). Поэтому процедуры этих триггеров должны

отыскивать строки, являющиеся МП-потомками модифицируемой строки, и проверять для них МП-целостность (отсутствие сдачи студентами «чужих» предметов), в противном случае блокировать модификацию.

Языки процедур для триггеров различаются в различных реляционных СУБД. В данном случае используется язык *PL/SQL* (диалект *MySQL 8.0 / MariaDB 10*).

Программный код триггера T1 (см. листинг 1) создаёт триггер BEFORE INSERT с именем T1, привязанный к таблице Сдача (строка 1). Опция FOR EACH ROW (строка 2) задаёт выполнение процедуры триггера для каждой вставляемой строки («строчный» триггер). Объявляются две целочисленные переменные (строка 3). В переменную ИдСпецСтуд заносится значение идентификатора специальности сдавшего студента, извлечённое по ЛВП Сд → Ст → Гр → Сп командой SELECT (строки 4–7), а в переменную ИдСпецПред – значение идентификатора специальности сданного предмета, извлечённое аналогичным образом по ЛВП Сд → Пр → Цк → Сп (строки 8–11). Значения этих переменных сравниваются (строка 11) и в случае неравенства возбуждается исключительное состояние SQLSTATE '45000', которое отменяет вставку новой строки в таблицу и выдаёт сообщение MESSAGE_TEXT (строка 13).

Листинг 1 – Программный код INSERT-триггера для контроля вставки в таблицу Сдача

```

1 CREATE TRIGGER T1 BEFORE INSERT ON Сдача
2   FOR EACH ROW BEGIN
3     DECLARE ИдСпецСтуд, ИдСпецПред INT;
4     SET ИдСпецСтуд = (
5       SELECT Спец.ИдСпец FROM Группа NATURAL JOIN Студент
6       WHERE Студент.ИдСтуд = NEW.ИдСтуд );
7     SET ИдСпецПред = (
8       SELECT Спец.ИдСпец
9       FROM Спец NATURAL JOIN Цикл NATURAL JOIN Предмет
10      WHERE Предмет.ИдПред = NEW.ИдПред );
11    IF ИдСпецСтуд != ИдСпецПред THEN
12      SIGNAL SQLSTATE '45000' SET MESSAGE_TEXT =
13        "Триггер T1: ОТМЕНА вставки — нарушение МП-целостности «Сдача→Спец»";
14    END IF;
15  END;
```

Программный код триггера T2 имеет аналогичный вид с той разницей, что опция INSERT заменена на опцию UPDATE, «T1» – на «T2», «вставки» – на «обновления».

Программный код триггера T3 (см. листинг 2) содержит две числовые переменные (ИдСпецСтуд и ИдСпецПред, строка 3). Дальнейшая обработка происходит при условии, что изменению в строке таблицы Студент подвергается значение FK, ссылающегося на таблицу Группа (строка 4), причём у соответствующего студента имеются дочерние строки в таблице Сдача (строка 5). В случае выполнения этого условия в переменную ИдСпецСтуд заносится значение идентификатора специальности сдавшего студента, извлечённое по ЛВП Ст → Гр → Сп командой SELECT (строки 7–8), а в переменную ИдСпецПред – значение идентификатора специальности сданного предмета, извлечённое аналогичным образом по пути Ст → Сд → Пр → Цк → Сп (строки 9–11). Поскольку участок Ст → Сд может содержать расщепление, команда SELECT (строка 10) содержит опцию DISTINCT, устраняющую дубликаты результирующего идентификатора специальности. Значения переменных ИдСпецСтуд и ИдСпецПред сравниваются (строка 12), и в случае неравенства возбуждается исключительное состояние, которое отменяет обновление, и выдаётся соответствующее сообщение (строка 13).

Листинг 2 – Программный код UPDATE-триггера для промежуточной таблицы

```

1 CREATE TRIGGER T3 BEFORE UPDATE ON Студент
2   FOR EACH ROW BEGIN
3     DECLARE ИдСпецСтуд, ИдСпецПред INT;
4     IF NEW.ИдГруп != OLD.ИдГруп AND EXISTS (
5       SELECT * FROM Студент NATURAL JOIN Сдача WHERE Студент.ИдСтуд = NEW.ИдСтуд )
6     THEN
7       SET ИдСпецСтуд = (
8         SELECT Группа.ИдСпец FROM Группа WHERE Группа.ИдГруп = NEW.ИдГруп );
9       SET ИдСпецПред = (
10        SELECT DISTINCT Цикл.ИдСпец FROM Сдача NATURAL JOIN Предмет NATURAL JOIN Цикл
11        WHERE Сдача.ИдСтуд = NEW.ИдСтуд );
12      IF ИдСпецСтуд != ИдСпецПред THEN
13        SIGNAL SQLSTATE '45000' SET MESSAGE_TEXT =
14          "Триггер T3: ОТМЕНА обновления — нарушение МП-целостности «Сдача—•Спец»";
15      END IF;
16    END IF;
17  END;

```

3.2 Обеспечение МП-целостности на основе избыточных внешних ключей

Этот подход предполагает использование системных возможностей по контролю *RI*-целостности для того, чтобы обеспечить МП-целостность. Для этого требуется внесения избыточных атрибутов в состав *FK* так, чтобы иметь возможность проследить *PK* МП-предка вдоль ЛВР до МП-потомка. СУБД поддерживает *RI*-целостность с помощью скрытых системных триггеров, поэтому в данном случае можно воспользоваться этим механизмом, чтобы не вводить пользовательские триггеры. Для этого необходимо продублировать идентификатор МП-предка в составе всех *FK* вдоль ЛВР. Это позволит контролировать идентификатор МП-предка вдоль всей ЛВР вплоть до МП-потомка. Важно, чтобы для таких *FK* действовало каскадное поддержание ссылочной целостности: любое допустимое изменение идентификатора МП-предка в промежуточных таблицах должно передаваться в дочерние таблицы. В результате для проверки МП-целостности остаётся проконтролировать совпадение этих идентификаторов по разным ЛВР у МП-потомка.

На рисунке 4 приведён пример РМ на основе *SK* (см. рисунок 2б). Идентификатор МП-предка ИдСпец продублирован во всех таблицах, причём в таблице МП-потомка он сделан общим для обеих ЛВР.

FK, задающие цепочки ЛВР, содержат идентификатор МП-предка, для чего в промежуточных таблицах предусмотрены соответствующие *UK* (обозначены тёмными ромбами). Например, уникальный ключ *UK1* в таблице Студент задан как

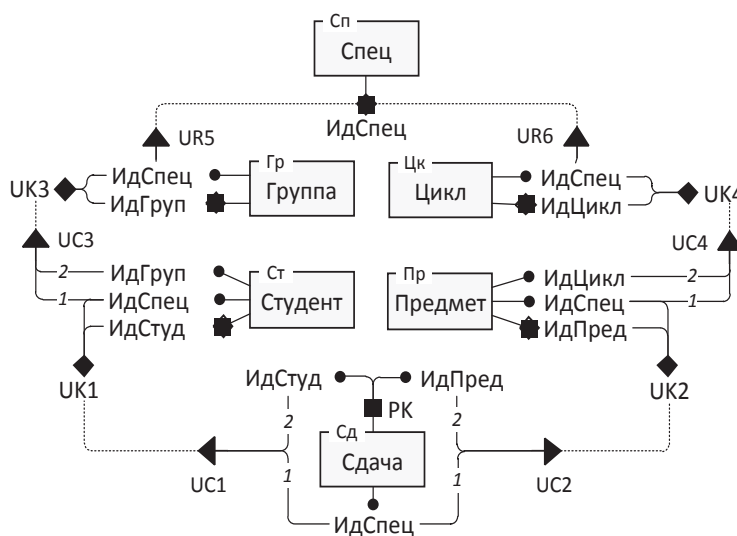


Рисунок 4 – Пример использования суррогатных ключей и избыточных внешних ключей для обеспечения МП-целостности

CONSTRAINT UK1 UNIQUE (ИдСпец, ИдСтуд).

На него из таблицы Сдача ссылается *FK UC1*, заданный как

CONSTRAINT UC1 FOREIGN KEY (ИдСпец, ИдГруп) REFERENCES Группа (ИдСпец, ИдГруп)
ON UPDATE CASCADE.

Здесь *RI*-правило ON UPDATE CASCADE обеспечивает автоматическую коррекцию значения ИдСпец в таблице Сдача при изменении ИдСпец в таблице Студент. В результате этого изменённое значение ИдСпец в таблице Группа (например, при переводе студента в группу, которая соответствует другой специальности) корректируется в строках таблицы Студент, которые соответствуют данной группе. Это изменение аналогичным образом переходит в таблицу Сдача, где блокируется вследствие нарушения ссылочной целостности по *FK UC2* (поскольку изменение не касается ЛВР Сд → Пр → Цк → Сп).

В рассмотренном случае при нарушении МП-целостности происходит нарушение ссылочной целостности, о чём сообщается пользователю. Это может дезориентировать пользователя и затруднить понимание ситуации. Кроме того, этот подход неприменим для случая отрицательной МП-целостности, когда требуется обеспечить различие МП-предков для разных ЛВР. Более удобно использовать в МП-потомке разные имена идентификаторов МП-предка для различных ЛВР с последующим явным сравнением их значений.

На рисунке 5 этот подход иллюстрируется на примере рассмотренной модели (см. рисунок 4). Здесь в таблице МП-потомка Сдача предусмотрено два идентификатора МП-предка: ИдСпецС и ИдСпецП. Значение ИдСпецС каскадно наследуется через ЛВР Сд→Ст→Гр→Сп, а значение ИдСпецП – через ЛВР Сд→Пр→Цк→Сп. Сравнение этих значений может быть выполнено двумя способами: с помощью ограничения CHECK, заданного в таблице Сдача (рисунок 5а), или с помощью BI/BU-триггеров, прикреплённых к таблице (рисунок 5б). При использовании первого способа в определение таблицы вводится ограничение целостности

CONSTRAINT CH1 CHECK (ИдСпецС = ИдСтудП).

Сообщение о нарушении данного ограничения однозначно укажет на нарушение МП-целостности. Этот способ работает не во всех СУБД. Например, если для *ProgreSQL 15* он успешно применим, то текущие версии *MySQL 8* / *MariaDB 10* не допускают использование *FK* в условии действия ограничения CHECK.

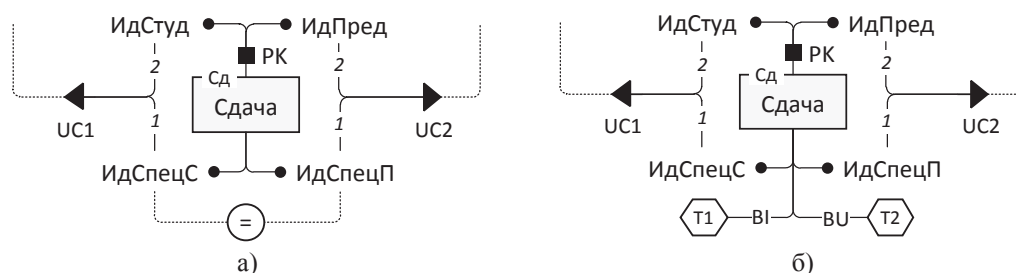


Рисунок 5 – Пример использования различных идентификаторов МП-предка в МП-потомке:
а) – на основе условия CHECK; б) – на основе триггеров

В подобных случаях проверку совпадения / несовпадения идентификаторов МП-предка можно возложить на триггеры. В листинге 3 представлен программный код INSERT-триггера T1, который сравнивает новые значения ИдСпецС и ИдСпецП и блокирует операцию в случае несовпадения. Программный код UPDATE-триггера имеет аналогичный вид.

Листинг 3 – Программный код INSERT-триггера для МП-потомка Сдача

```
1 CREATE TRIGGER T1 BEFORE INSERT ON Студент
2 FOR EACH ROW BEGIN
```

```

3      IF NEW.ИдСпецС != NEW.ИдСпецП THEN
4          SIGNAL SQLSTATE '45000' SET MESSAGE_TEXT =
5              "Триггер Т1: ОТМЕНА вставки — нарушение МП-целостности «Сдача—Спец»";
6      END IF;
7  END;

```

4 МП-целостность при использовании натуральных ключей

Реляционная БД, основанная на *NK*, в отличие от БД, основанной на *SK*, может иметь идентифицирующие связи между таблицами, и значения ключей могут изменяться в течение ЖЦ строк таблицы. Идентифицирующие связи означают, что экземпляры дочерних сущностей идентифицируются в контексте своих родителей. На концептуальной модели это обстоятельство отражено с помощью тёмных квадратов в символах связи. На рисунке 6а приведён пример СС-модели, в которой все связи идентифицирующие, т.е. все сущности (кроме сущности Спец) идентифицируются в контексте своих родителей (студенческие группы локально идентифицируются в пределах своей специальности, студенты – в пределах группы и т.д.). На рисунке 6б приведена соответствующая РМ, где имена натуральных ключевых атрибутов имеют префикс «Код». *PK* (кроме МП-предка) являются составными и включают в качестве компонент *PK* таблиц-родителей. *FK* (кроме ссылки на МП-предка) также являются составными. В результате идентификатор МП-предка присутствует в составе *PK* своих потомков, что позволяет использовать подход к МП-целостности, аналогичный подходу с избыточными *FK* (см. рисунок 4).

Изменчивость *NK* в течение ЖЦ порождает необходимость поддержания каскадной ссылочной целостности, но не создаёт непосредственной угрозы для МП-целостности. Например, изменение идентификатора КодГруппы в таблице Группа (см. рисунок 6б) приводит к необходимости каскадного обновления одноимённых атрибутов в *FK* дочерних таблиц Студент и Сдача, что сохраняет МП-целостность. Нарушение МП-целостности может возникнуть при изменении *FK*, например, при переводе студента на другую специальность. Таким образом, в этом случае ситуация та же, что и при неизменных *SK*.

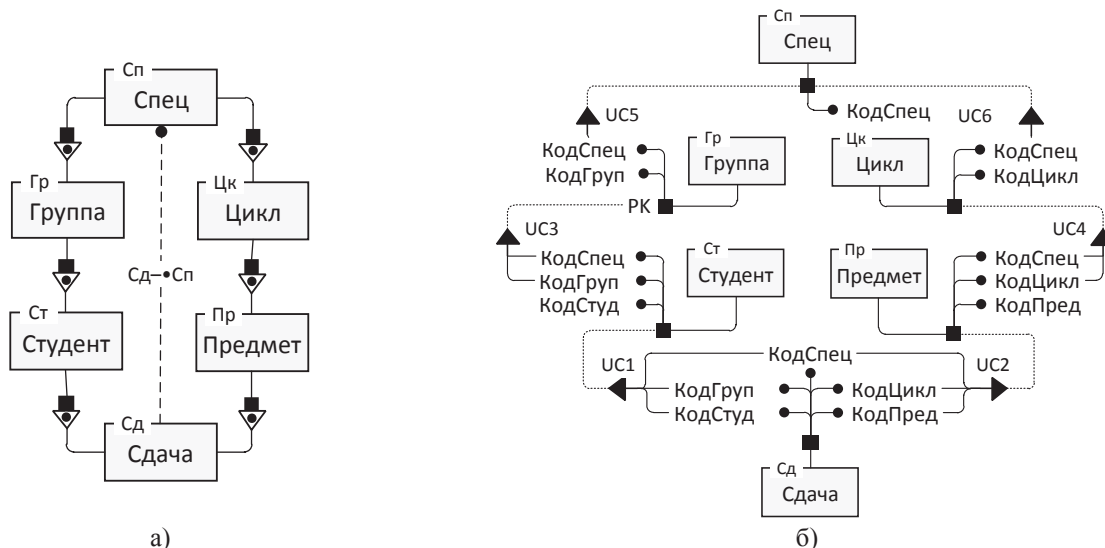


Рисунок 6 – Пример моделей с идентифицирующими связями:
а) – СС-модель; б) – реляционная модель на основе натуральных ключей

Для обеспечения каскадной ссылочной целостности в этих случаях удобно использовать *FK* с опцией *ON UPDATE CASCADE*. Например, если *PK* в таблице *Студент* задан как *CONSTRAINT PK_Ст PRIMARY KEY (КодСпец, КодГруп, КодСтуд)*, то на него из таблицы *Сдача* ссылается *FK UC1*, заданный как *CONSTRAINT UC1 FOREIGN KEY (КодСпец, КодГруп, КодСтуд) REFERENCES Группа (КодСпец, КодГруп, КодСтуд) ON UPDATE CASCADE*. В результате этого все изменения компонентов *PK* в таблице *Студент* автоматически передаются в *FK UC1* таблицы *Сдача*.

Каскадное обновление ключей от МП-предка к МП-потомку по параллельным ЛВР может быть затруднено из-за технических ограничений СУБД. Так, модель на основе общего идентификатора МП-предка у МП-потомка, представленная на рисунке 6б, успешно работает в среде *PostgreSQL 10*. В среде *MySQL 8 / MariaDB 10* таким способом не удаётся выполнить каскадное обновление *PK* КодСпец МП-предка (в таблице Спец) из-за несинхронного обновления по разным ЛВР. В среде *MS SQL Server 2022* запрещено каскадное обновление при наличии параллельных ЛВР – возникает ошибка на этапе компиляции. В среде *Oracle Database* автоматическое каскадное обновление не предусмотрено, и его необходимо поддерживать с помощью триггеров. В этих условиях можно перейти к схеме с отдельными идентификаторами МП-предка в МП-потомке, что позволяет выполнить каскадное обновление идентификатора МП-предка. Для контроля МП-целостности в этом случае потребуется использование триггеров (см. рисунок 5б).

Применительно к СУБД *MySQL 8 / MariaDB 10* (см. рисунок 7) МП-потомок *Сдача* содержит два идентификатора МП-предка Спец (КодСпецС и КодСпецП), унаследованные по разным ЛВР (см. рисунок 5б). Это обеспечивает их корректное каскадное обновление *ON UPDATE CASCADE* через *FK UC1–UC6*.

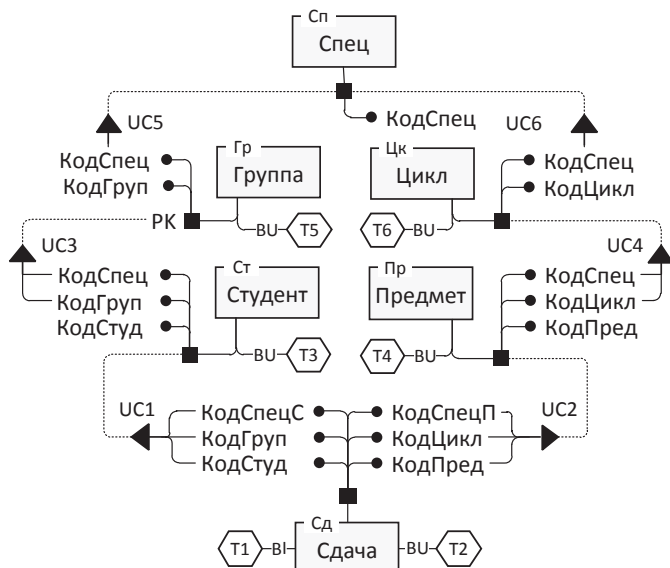


Рисунок 7 – Различные идентификаторы МП-предка в МП-потомке в случае натуральных ключей и идентифицирующих связей

Триггеры Т1–Т6 обеспечивают контроль МП-целостности. Триггеры Т1 и Т2 контролируют равенство значений КодСпецС и КодСпецП в таблице *Сдача* при вставке и обновлении строк (см. листинг 3). Триггеры Т3–Т6 контролируют то же самое при обновлении строк в промежуточных таблицах ЛВР (их необходимость вызвана тем, что в СУБД *MySQL/MariaDB* каскадное обновление таблиц не запускает триггеры, привязанные к этим таблицам).

В качестве примера рассмотрен триггер Т3 (см. листинг 4), который проверяет, не приведёт ли изменение в таблице *Студент* в результате последующего каскадного обновления к нарушению равенства значений КодСпецС и КодСпецП в таблице *Сдача* (строки 3–7), и в этом слу-

чае отменяет операцию обновления с выдачей соответствующего сообщения (строки 8–10). Наличие в таблице *Сдача* ключевых атрибутов КодГруп и КодСтуд упрощает эту проверку с помощью оператора *SELECT*, который выполняет выборку из таблицы *Сдача* строк, являющихся дочерними для обновляемой строки таблицы и содержащими при этом различающиеся значения КодСпецС и КодСпецП. Триггеры Т4–Т6 построены аналогичным образом.

Листинг 4 – Программный код триггера T3 (см. рисунок 7) в среде *MySQL/MariaDB*

```

1 CREATE TRIGGER T3 BEFORE UPDATE ON Студент
2   FOR EACH ROW BEGIN
3     IF ( NEW.КодСпец != OLD.КодСпец OR NEW.КодГруп != OLD.КодГруп
4       OR NEW.КодСтуд != OLD.КодСтуд ) AND EXISTS (
5       SELECT * FROM Сдача WHERE Сдача.КодСпецС = OLD.КодСпец
6         AND Сдача.КодГруп = OLD.КодГруп AND Сдача.КодСтуд = OLD.КодСтуд
7         AND NEW.КодСпец != Сдача.КодСпецП )
8     THEN SIGNAL SQLSTATE '45000' SET MESSAGE_TEXT =
9       "Триггер T3: ОТМЕНА обновления — нарушение МР-целостности «Сдача—•Спец»";
10    END IF;
11  END;
```

Заключение

Понятие МП-целостности распространено здесь на РМ логического уровня с целью практического применения в реляционных БД. В реляционной среде универсальным подходом к обеспечению МП-целостности является подход на основе триггеров БД, обнаруживающих и блокирующих операции вставки и обновления строк в таблицах, которые ведут к нарушению МП-целостности. Недостатком этого подхода является необходимость процедурного программирования триггеров, а также сложность переноса БД между СУБД разного вида из-за различий языков процедурного программирования.

В ряде случаев использование стандартных возможностей СУБД по поддержанию ссылочной целостности позволяет дополнительно обеспечить МП-целостность и решить задачу на декларативном уровне без использования триггеров (работают скрытые системные триггеры, с помощью которых СУБД поддерживает ссылочную целостность). Недостатком этого является зависимость конкретных решений от использования простых/составных, натуральных/суррогатных ключей, а также от технических ограничений, имеющихся у СУБД. Кроме того, может потребоваться введение избыточных компонентов в состав ключей для отслеживания экземпляра МП-предка вдоль линий восходящего родства.

Приведённые РМ и программный код созданы в виде тестовых примеров и проверены в средах СУБД (полностью в *MySQL* и *MariaDB*, частично, где это позволяла функциональность, в *PostgreSQL*, *MS SQL Server*, *Oracle Database*).

Список источников

- [1] Storey V.C. et al. An ontology-based expert system for database design. *Data and Knowledge Engineering*, 1998. vol.28, no.1. P.31-46. DOI: 10.1016/S0169-023X(98)00012-3. EDN: ABKHUB.
- [2] Sugumaran V., Storey V. Supporting database designers in entity-relationship modeling: An ontology-based approach. *ICIS 2003 Proceedings*. 2003. P.59-71. <https://aisel.aisnet.org/icis2003/6>.
- [3] Chujai P., Kerdprasop N., Kerdprasop K. On transforming the ER model to ontology using Protégé OWL tool. *Int. J. Computer Theory and Engineering*. 2014. Vol.6, no.6. P.484-489. DOI: 10.7763/IJCTE.2014.V6.914.
- [4] Benjamin P.C. et al. IDEF5 Method Report. Prepared for Armstrong Laboratory AL/HRGA. Knowledge Based Systems Inc. Sept. 21, 1994. 187 p. <https://online-pmo.com/wp-content/Education/Idef5.pdf>.
- [5] Миронов В.В., Миронов К.В. Концептуально-онтологические аспекты множественности предка в информационных моделях «сущность-связь». *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, № 4(54). С.493-503. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-493-503. EDN: HHPGHD.
- [6] Jardine D.A. The ANSI/SPARC DBMS Model. North-Holland Pub. Co., 1977. 225 p.
- [7] Peter Pin-Shan Chen. The Entity-Relationship Model – toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*. 1976. Vol.1. P.9–36. DOI: 10.1145/320434.320440.
- [8] Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 616 с.

- [9] **Дейт К.Дж.** Введение в системы баз данных = Introduction to Database Systems. 8-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1328 с. ISBN 5-8459-0788-8.
- [10] **Wildman W.J.** An introduction to relational ontology. *The Trinity and an Entangled World: Relationality in Physical Science and Theology*. 2010. P.55-73.
- [11] **Zhao T.** Introduction to Hiromatsu Wataru's "relational ontology". *Region – Educational Research and Reviews*. 2024. 6. 111. DOI: 10.32629/terr.v6i5.2152.
- [12] **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. EDN: KRGWSR.
- [13] **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. EDN: UADWCT.
- [14] **Семенова В.А., Смирнов С.В.** Механизм нормализации эмпирического контекста в онтологическом анализе данных. *СИИТ*. 2021. Т.3, №3(7). С.45-52. DOI: 10.54708/26585014_2021_33745. EDN: QXRTXB.
- [15] **Богданова Д.Р., Шахматова Г.Р., Ниязгулов А.М.** Структура информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, № 2(52). С.270-278. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278. EDN: CAYCVK.
- [16] **Смирнов С.В.** Онтологии как смысловые модели. *Онтология проектирования*. 2013. № 2(8). С.13-19.

Сведения об авторах



Миронов Валерий Викторович, 1952 г.р., профессор кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ. Диплом радиофизика (Воронежский государственный университет, 1975). Д.т.н. (1995). Труды в области ситуационного управления, иерархических моделей и баз данных. ORCID: 0000-0002-0550-4676. AuthorID (РИНЦ): 691759. Author ID (Scopus): 57192962687. Researcher ID (WoS): AAB-9377-2022. mironov@list.ru ✉

Миронов Константин Валерьевич, 1991 г.р., доцент кафедры вычислительной техники и защиты информации УУНиТ. Диплом специалиста по защите информации (Уфимский государственный авиационный технический университет, 2012). Степень PhD Технического университета Вены (2015). Труды в области робототехники и искусственного интеллекта, обработки и защиты информации. ORCID: 0000-0002-4828-1345. AuthorID (РИНЦ): 939814. Author ID (Scopus): 56732791500. Researcher ID (WoS): AAB-9377-2022. mironovconst@gmail.com.



Поступила в редакцию 08.07.2025, после рецензирования 16.08.2025. Принята к публикации 25.08.2025.



AM-integrity in designing relational database models

© 2025, V.V. Mironov ✉, K.V. Mironov

Ufa University of Science and Technologies, Ufa, Russia

Abstract

The article discusses a special type of integrity in databases – ancestral multiplicity integrity (AM-integrity), a concept introduced by the authors at the conceptual–ontological level within “entity–relationship” models. In this paper, this concept is extended to the relational model for the purpose of practical application in creating databases. Related notions are examined, including the lineage of ascending ancestry, the relation of ancestral multiplicity, and the corresponding integrity constraint. Transitioning to the relational model requires consideration of primary and foreign keys, referential integrity, and table triggers. As a universal means of ensuring integrity in the relational environment, the paper proposes an approach based on database triggers. These triggers detect and block insert and update operations that would lead to violations of integrity. The need for procedural programming of triggers is noted, along with the challenges of transferring data between different database management systems due to variations in procedural programming languages. An alternative approach is suggested, based on leveraging built-in mechanisms for maintaining referential integrity, in which ancestral multiplicity integrity is ensured as part of referential integrity. The specific solution depends on the use of simple or composite, natural or surrogate keys, as well as on the technical limitations of the database implementation environment. In some cases, redundant key components may need to be introduced to track ancestor instances along ancestral lineages. Test examples of relational models are provided for different relational systems (complete implementations in MySQL and MariaDB, and partial implementations in PostgreSQL, MS SQL Server, and Oracle Database).

Keywords: *entity-relationship model, relational model, ancestral multiplicity, lineage of ascending ancestry, database triggers, foreign keys, referential integrity.*

For citation: *Mironov VV, Mironov KV. AM-integrity in designing relational database models [In Russian]. Ontology of designing. 2025; 15(4): 552-565. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-552-565.*

Authors' contributions: *Mironov V.V. – idea, conceptual framework, formalization; Mironov K.V. – models, algorithms, programming, and debugging across different environments.*

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

List of figures and listings

Figure 1 – Towards the concept of AM-integrity

Figure 2 – Example of models with non-identifying relationships

Figure 3 – Example of using surrogate keys and triggers to ensure AM-integrity

Figure 4 – Example of using surrogate keys and redundant foreign keys to ensure AM-integrity

Figure 5 – Example of using different AM-ancestor identifiers in an AM-descendant

Figure 6 – Example of models with identifying relationships

Figure 7 – Different AM-ancestor identifiers in an AM-descendant in the case of natural keys and identifying relationships

Listing 1 – Source code of an INSERT trigger to control insertion into the table

Listing 2 – Source code of an UPDATE trigger for an intermediate table

Listing 3 – Source code of an INSERT trigger for AM-descendant

Listing 4 – Source code of trigger T3 in the MySQL/MariaDB environment

References

- [1] *Storey VC. et al.* An ontology-based expert system for database design. *Data and Knowledge Engineering*, 1998; 28(1): 31-46. DOI: 10.1016/S0169-023X(98)00012-3. EDN: ABKHUB.

- [2] **Sugumaran V, Storey V.** Supporting database designers in entity-relationship modeling: An ontology-based approach. In: *ICIS 2003 Proceedings*. 2003. P.59-71. <https://aisel.aisnet.org/icis2003/6>.
- [3] **Chujai P, Kerdprasop N, Kerdprasop K.** On transforming the ER model to ontology using Protégé OWL tool. *Int. J. Computer Theory and Engineering*. 2014; 6(6): 484-489. DOI: 10.7763/IJCTE.2014.V6.914.
- [4] **Benjamin PC. et al.** IDEF5 Method Report. Prepared for Armstrong Laboratory AL/HRGA. Knowledge Based Systems Inc. Sept. 21, 1994. 187 p. <https://online-pmo.com/wp-content/Education/Idef5.pdf>.
- [5] **Mironov VV, Mironov KV.** Conceptual and ontological aspects of the plurality of ancestors in "entity-relational" information models [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(4): 493-503. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-493-503. EDN: HHPGHD.
- [6] **Jardine DA.** The ANSI/SPARC DBMS Model. North-Holland Pub. Co., 1977. 225 p.
- [7] **Peter Pin-Shan Chen.** The Entity-Relationship Model — toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*. 1976; 1: 9–36. DOI: 10.1145/320434.320440.
- [8] **Martin J.** Organization of Databases in Computing Systems [In Russian]. Moscow: Mir, 1978. 616 p.
- [9] **Date KJ.** Introduction to Database Systems [In Russian]. 8th ed. Moscow: Williams, 2006. 1328 p.
- [10] **Wildman WJ.** An introduction to relational ontology. *The Trinity and an Entangled World: Relationality in Physical Science and Theology*. 2010. P.55-73.
- [11] **Zhao T.** Introduction to Hiromatsu Wataru's "relational ontology". *Region – Educational Research and Reviews*. 2024. 6. 111. DOI: 10.32629/rerr.v6i5.2152.
- [12] **Borgest NM.** Systems and ontological analysis: 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. EDN: KRGWSR.
- [13] **Semenova VA, Smirnov SV.** Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical solutions [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2023; 13(4): 531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547. EDN: UADWCT.
- [14] **Semenova VA, Smirnov SV.** The mechanism of normalization of empirical context in the ontological analysis of data. *SIIT*. 2021; 3(3): 45-52. DOI: 10.54708/26585014_2021_33745. EDN: QXRTXB.
- [15] **Bogdanova DR, Shakhmametova GR, Niyazgulov AM.** The structure of the CDSS information repository based on the ontological approach [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 270-278. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278. EDN: CAYCVK.
- [16] **Smirnov SV.** Ontologies as semantic models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013; 2(8): 13-19.

About the authors

Valeriy Viktorovich Mironov (b. 1952). Professor of the Department of Automated Control Systems at UUST. Diploma in Radiophysics (Voronezh State University, 1975), Dr. Tech. Sci. (Ufa State Aviation Technical University, 1995). Works in the field of situational management, hierarchical models and databases. ORCID: 0000-0002-0550-4676. Author ID (RSCI): 691759. Author ID (Scopus): 57192962687. ResearcherID (WoS): AAB-9377-2022. mironov@list.ru ✉

Konstantin Valerievich Mironov (b. 1991). Associate Professor of the Department of Computer Science and Information Security at UUST, Certified Specialist in Information Security (Ufa State Aviation Technical University, 2012), PhD (Technical University of Vienna, 2015). Works in the field of robotics and artificial intelligence, information processing and security. ORCID: 0000-0002-4828-1345. AuthorID (RSCI): 939814. Author ID (Scopus): 56732791500. Researcher ID (WoS): AAB-9377-2022. mironovconst@gmail.com

Received July 8, 2025. Revised August 16, 2025. Accepted August 25, 2025.



Автоматизированный сентимент-анализ коротких текстов

© 2025, А.Н. Ивутин ✉, П.А. Савенков, А.Г. Волошко

Тульский государственный университет (ТулГУ), Тула, Россия

Аннотация

Цифровые технологии меняют традиционные профили поведения пользователей, перенося общение на мобильные устройства, которые становятся помощником и инструментом для разнообразной деятельности. В связи с этим возникает потребность в оценке эмоциональной окраски передаваемых сообщений. Мобильное устройство накладывает ограничения на манеру и стиль общения, смещая вектор к коротким сообщениям и сокращая величину контекста. Для сентимент-анализа коротких наборов текстов и выделения из них эмоциональных признаков предложено применение бинарной классификации, как способа предобработки массива данных, в совокупности с плавающим временным контекстным окном, как способом уточнения обрабатываемой информации. Рекуррентные сети использованы в комбинации с бинарным классификатором с целью повышения точности результата анализа и учёта используемых вычислительных ресурсов. Показано, что результаты работы могут быть улучшены за счёт дополнения традиционно применяемых для таких задач наборов данных информацией, собранной непосредственно с рабочих мобильных устройств пользователей в их ежедневной деятельности. Целью работы является повышение качества анализа эмоционального окраса коротких наборов пользовательских текстов посредством разработки и апробации метода автоматизированного формирования доверенного набора данных. Существующие наборы данных содержат значительный объём некорректно размеченной информации, что оказывает влияние на итоговое качество анализа. Предложенные средства позволили достичь доли правильных ответов 96% на обучающем и 92% на проверочном наборах данных.

Ключевые слова: эмоциональная окраска, мобильное устройство, набор данных, нейронная сеть, классификация, рекуррентная сеть.

Цитирование: Ивутин А.Н., Савенков П.А., Волошко А.Г. Автоматизированный сентимент-анализ коротких текстов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.566-577. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-4-566-577.

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №24-21-20022, <https://rscf.ru/project/24-21-20022/> и комитета Тульской области по науке и инноватике.

Вклад авторов: Ивутин А.Н. – постановка задачи, планирование экспериментов; Савенков П.А. – проектирование алгоритмов, сбор и анализ данных; Волошко А.Г. – верификация наборов данных, интерпретация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие информационных систем привело к изменению стиля деятельности работников, расширению рабочего пространства за пределы одного рабочего места и необходимости быстрой реакции на происходящие события. На предприятиях используются рабочие мобильные устройства (МУ), помогающие работникам выполнять свои обязанности. Такой подход имеет недостатки в обеспечении безопасности доступа к данным, т.к. при отсутствии непосредственного контроля возможна инсайдерская деятельность работника и подмена пользователя после получения доступа к информации предприятия. Разработана программ-

ная система контроля доступа *DeepViewer*¹, которая на основе анализа текстов, набираемых пользователями на МУ, позволяет обнаруживать изменившееся поведение пользователя (сентимент-анализ). Особенности *DeepViewer* являются низкие требования к вычислительным ресурсам при сохранении высокой точности выявления нештатных ситуаций. Получение более точных и предсказуемых вариантов возможно при усложнении нейросетевых моделей, что увеличивает требуемую мощность вычислителя [1]. Это ограничивает возможности применения нейронных сетей (НС) в условиях отсутствия доступа к крупным вычислителям. В данной работе удалось добиться рационального использования ресурсов за счёт применения предобученных НС моделей совместно с формированием поведенческого профиля на временной оси.

Обработка данных проводится в два этапа. На первом этапе детектирование эмоциональных полутонов отсутствует, а используется только бинарный классификатор (в рассматриваемой задаче глубокий анализ полутонов в общем случае не требуется, поскольку принимаемое решение о наличии нетипового поведения пользователя также является бинарным). Использование многозначной классификации без применения бинарной может привести к трудностям в интерпретации результатов из-за большого количества значений, что затрудняет выявление существенных отклонений. Бинарная классификация позволяет более точно определять изменения и уменьшает возможность появления шума в данных, что делает процесс анализа более надёжным и рациональным. Применение комбинации подходов (бинарный как предобработка для методов более высокой размерности) на выборках коротких текстов, для которых не характерны существенные эмоциональные перепады, может позволить ускорить процесс анализа поведенческих аномалий.

1 Формирование набора индивидуальных признаков

Принцип процесса формирования набора индивидуальных признаков на основе анализа эмоционального окраса текстовых данных приведён на рисунке 1.

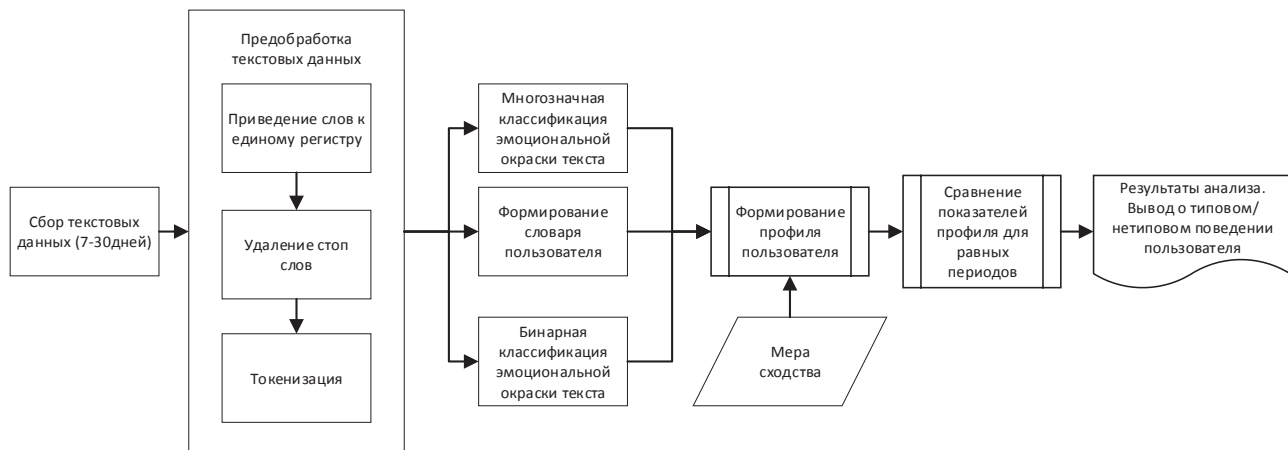


Рисунок 1 – Принцип формирования и анализа поведенческого профиля

В качестве входных данных рассматриваются последовательности пользовательских текстов, собранных с МУ в выбранных временных интервалах, длительность которых может изменяться от нескольких дней до нескольких месяцев. Экспериментально установлено, что для работы системы анализа поведенческого профиля необходим первоначальный сбор дан-

¹ Мобильная система сбора, анализа и визуализации больших данных для контроля деятельности сотрудников и выявления инсайдерской активности для предотвращения инцидентов (см. также <https://dzen.ru/a/ZhVFunLbIlYexDZO>).

ных с МУ пользователя в течение не менее семи дней; сбор данных более месяца не оказывает существенного влияния на качество анализа [2].

Обрабатываемые тексты могут включать сообщения, посты в социальных сетях, комментарии и другие виды текстовой информации. Такие тексты могут отличаться по длине (с тенденцией к коротким сообщениям), стилю и содержанию (официальное письмо, переписка в мессенджерах, поисковые запросы и др.). Перед классификацией тексты проходят предварительную обработку на унификацию представления слов: приведение к единому регистру, удаление стоп-слов, токенизация, – на основе которых формируется словарь пользователя (уникальные слова, набранные пользователем) и результаты бинарной классификации текстов. Профиль пользователя представляется на данный момент двумя векторами: вектор частот использования слов и вектор бинарной классификации.

Вектор частоты использования слов представляется как $v_{f_type_period} = (id, f)$, где id – идентификатор слова (в словаре); f – частота использования слова; $v_{f_type_period}$ – вектор частоты использования слов; $type$ – тип вектора: вектор профиля пользователя (*profile*) или новый вектор частоты использования слов (*analysed*), сформированный для заданного периода времени (*period*) и используемый для анализа. Такие векторы формируются для определённых при настройке системы периодов, например, для каждого трёх дней. Примеры векторов частот использования слов:

$$v_{f_profile_3days} = (1,32), (2,44), (3,21), (4,41), (5,43), (6,76), (7,1), (8,0) \dots$$

$$v_{f_analysed_3days} = (1,54), (2,12), (3,32), (4,44), (5,49), (6,12), (7,72), (8,12) \dots$$

Длина вектора определяется количеством уникальных слов за выбранный период. При сравнении рассматриваются все слова, использованные за базовый (внесённый в профиль) и за анализируемый периоды времени.

Вектор бинарной классификации строится на большем промежутке времени, и его длина определяется количеством периодов анализа текстов. В качестве такого периода обычно выбирается один день. Каждый элемент вектора представляет кортеж $v_{biclass} = (date, negative, positive)$, где: *date* – дата, за которую анализировались тексты; *negative* – количество текстов с отрицательной эмоциональной окраской за этот день; *positive* – количество текстов с положительной эмоциональной окраской. Пример такого вектора имеет вид $v_{biclass} = (10.02.24, 122, 81), (11.02.24, 110, 98), (12.02.24, 122, 81), \dots$

Сравнение профиля пользователя с его текущей активностью осуществляется на основе сравнения и выявления статистически значимых отклонений новых значений, полученных за день или за выбранный период времени, с уже сформированным вектором.

В построенной НС (см. рисунок 2) используется архитектура GRU^2 для обработки текстовых данных, учитываются зависимости в последовательностях и классифицируется текст на два класса. На вход подаётся последовательность слов длиной 200, где далее каждое слово представляется индексом из словаря. Затем идёт слой *Embedding*, который преобразует входные слова в векторное представление размерности 8. Далее следует слой GRU с 32 нейронами и параметром *recurrent_dropout* равным 0,2. Последний слой модели – полносвязный слой *Dense* с одним нейроном и функцией активации *sigmoid*, который выполняет задачу бинарной классификации текстов. Для обучения используется функция потерь «*binary_crossentropy*», оптимизатор «*adam*»³ и метрика *accuracy*, которая оценивает точность классификации текста на два класса.

Динамически выбираемый диапазон временных интервалов предоставляет ряд практических преимуществ для анализа данных. Анализ текстов за короткие периоды позволяет опе-

² *Gated Recurrent Unit (GRU)* — это тип архитектуры рекуррентной НС, предназначенной для обработки последовательных данных, таких как временные ряды или естественный язык.

³ Функции оценки, потерь, оптимизации – основы алгоритма машинного обучения. <https://id-lab.ru/posts/developers/funkcii/>.

ративно реагировать на текущие события или изменения в настроении пользователей, что может быть полезно в ситуациях, где быстрая реакция имеет критическое значение. Использование более длительных временных интервалов даёт возможность выявить скрытые долгосрочные зависимости и шаблоны в поведении пользователей, что может быть важно при оценивании качества деятельности работников, а также выявлении инсайдерской активности. Сравнение производится на основе меры сходства, вид и сигнальный уровень которой подбирается для каждого предприятия отдельно.

За счёт накопления сведений появляется возможность анализа динамики эмоциональных окрасок, что позволяет наблюдать изменения в эмоциональном состоянии, отражённом в текстах. Например, можно рассмотреть тексты, опубликованные в разные дни, недели или месяцы, и выявить изменения настроения пользователей в эти периоды. Это позволяет: выделить эмоциональные тенденции в текстах; строить временные ряды, графики и диаграммы, визуализирующие эмоциональные колебания; проводить корреляционный анализ и выявлять взаимосвязи с внешними событиями (социальные изменения и др. факторы, влияющие на эмоциональное состояние пользователя МУ).

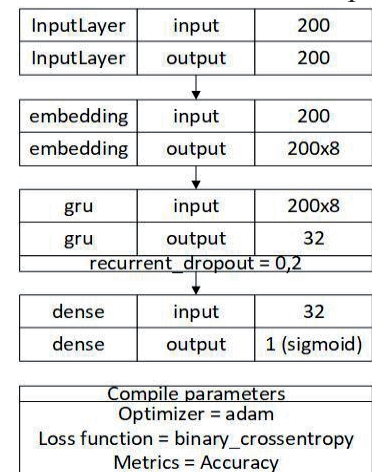


Рисунок 2 – Архитектура используемой для классификации искусственной нейронной сети

2 Модели и обучающие наборы данных

Решение задачи анализа тональности текстов усложняется тем, что исследования в этой области ведутся преимущественно для английского языка. Предложены различные методики, например, для извлечения сентиментов из текстов рецензий, что способствовало развитию корпусов с аннотированными данными на основе оценки полярности [3]; корпус с 50-ю тысячами аннотированных рецензий на фильмы [4]; корпус данных из социальных сетей, в котором содержатся аннотации интенсивности сентиментов [5].

Повышенная сложность данной задачи для русского языка (склонения, падежи и богатый лексический состав) отличается от формализованного представления англоязычных текстов [6]. Для русскоязычных текстов в [7] решается одна из подзадач классификации по тональности – определение иронии и сарказма в документах. В [8] показано использование модели глубокого обучения *BERT* для решения задач анализа тональности текстов на русском языке. Семейство наборов данных (НД) *RuSent* разработано и используется для анализа русскоязычных текстов в [9-11].

Работы [6-11] ориентированы на широкий контекст, на основе которого делается заключение о принадлежности к той или иной эмоциональной категории. В случае использования МУ перенос подобных решений затруднителен и не позволяет получить адекватные результаты из-за специфики использования МУ и структуры передаваемых текстовых данных, тяготеющих к коротким фразам, использованию сленга, смайликам и др. [12]. В качестве решения предлагается расширить анализируемый контекст временными рамками, что позволяет получить релевантную по объёму выборку и сохранить динамический характер накапливаемой информации [13].

Обзор русскоязычных НД и задач по их наполнению и поддержанию в актуальном виде приведён в [14]. В [15] содержится развёрнутый список НД, в которых присутствуют неточности в их описаниях и классификаторах. В [16] рассмотрены архитектуры для классификации русскоязычных отзывов в области медицинских услуг; отмечено, что дополнительное применение сентимент-анализа позволяет повысить эффективность классификации. В [17]

показаны подходы к автоматическому построению лингвистических онтологий, которые могут быть использованы при структурировании и обогащении таких корпусов. В [18] используются нейросетевые подходы с дополнительной предобработкой для составления психологического портрета пользователя социальных сетей. В [19] предложен подход к автоматической обработке текстов широкой предметной области, используемый для проектирования лингвистических онтологий. Примеры открытых размеченных НД для обучения НС для анализа эмоционального окраса приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Наборы данных для анализа тональности (бинарной классификации)

№	Наименование набора данных	Описание	Классы	Уникальных значений
1	<i>RuSentRel</i> ⁴	Набор с аналитическими статьями с сайта <i>inosmi.ru</i> , в которых представлено авторское мнение об освещаемой теме и многочисленные ссылки, упоминаемые участниками описанных ситуаций	Позитивный Негативный	73 крупных текста с помеченными более 2000 отношениями
2	<i>RuTweetCorp</i> ⁵	Крупнейший, автоматически аннотируемый, открытый корпус текстов с ручным фильтрованием. Собран автоматически	Позитивный Негативный	Всего 15097058 сообщений, 110396 размеченных позитивных, 107094 размеченных негативных
3	<i>Kaggle_Russian twitter_sentiment</i> ⁶	Набор с примерами настроений	Позитивный Негативный	141063 размеченных позитивных, 133827 размеченных негативных
4	<i>SentiRuEval-2015</i> ⁷	Тематический набор с примерами настроений из русскоязычных сообщений (рестораны и автомобили)	Позитивный Негативный Нейтральный	Для ресторанов 714 нейтральных, 2530 позитивных, 684 негативных в обучающей выборке; для автомобилей 691 нейтральных, 2330 позитивных, 1337 негативных в обучающей выборке
5	<i>SentiRuEval-2016</i> ⁸	Тематический набор с примерами настроений из русскоязычных сообщений (банки, телекоммуникационные компании)	Позитивный Негативный Нейтральный	Для телекоммуникационных компаний 4870 нейтральных, 1354 позитивных, 2550 негативных в обучающей выборке; для банков 6977 нейтральных, 704 позитивных, 1734 негативных в обучающей выборке
6	<i>LINIS Crowd</i> ⁹	Коллекция размеченных социально-политических текстов из русскоязычных блогов	Резко позитивный Позитивный Нейтральный Негативный Резко негативный	9702 слова и 29106 текстов

⁴ *RuSentRel* – открытый набор данных аналитических статей интернет-портала *inosmi.ru*. <https://github.com/nicolay-r/RuSentRel>.

⁵ *RuTweetCorp* – открытый набор данных <https://github.com/ahlesen/RuTweetCorp>.

⁶ *Kaggle_Russian_twitter_sentiment* – открытый набор данных <https://www.kaggle.com/datasets/thorinhood/russian-twitter-sentiment>.

⁷ *SentiRuEval 2015* – открытый набор данных. <https://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/142444>.

⁸ *SentiRuEval 2016* – открытый набор данных. <https://github.com/mokoron/sentirueval>.

⁹ *LINIS Crowd* – открытый набор данных. <https://linis-crowd.org/>.

В случае применения бинарной классификации рациональным является применение *RuTweetCorp*¹⁰ ввиду схожей структуры и длины текстов при достаточном объёме обучающего и проверочного НД. Этот НД включает бинарную классификацию эмоций, что позволяет получить базовое представление об изменениях в поведении сотрудников и эффективнее выявить негативные проявления в дальнейшем. Другие НД на базе коротких сообщений собраны на основе анализа сообщений зарубежных социальных сетей, но не обладают таким количеством уникальных значений; некоторые из них имеют узкую направленность либо, как в случае с *Kaggle Russian twitter sentiment*, наблюдаются существенные пересечения с *RuTweetCorp*, но не ясны методика формирования НД и их качество.

Применение иных типов НД, собранных на основе более объёмных сообщений, представляется затруднительным ввиду иной структуры сообщений, а также по причине их ограниченного объёма и неуниверсальности. Количество открытых обучающих НД на русском языке недостаточно, и часто они не сопровождаются необходимой документацией. Попытка создания открытого размеченного многоклассового набора *LINIS Crowd*¹¹ силами сообщества пока не даёт существенных результатов.

3 Формирование обучающего набора данных

Можно отметить высокий процент ошибок в публичных НД, что снижает надёжность применения нейросетей как метода классификации [20, 21]. Например, для набора *Quick, Draw! Dataset*¹² число ошибок на момент анализа доходило до 10% [22]. В числе трудностей разметки открытых НД следует выделить контроль за размеченными данными и за критериями автоматической разметки. Например, относительно нейтральные («Желаю хорошего полёта и удачной посадки, я буду очень сильно скучать», «завтра по химии диктант, нужно хорошо подготовиться») находятся в классификаторе «Датасет твитов негативной тональности», сомнительные («У нас есть прекрасная история, как сдохнуть за неделю!!» и «Поприветствуем моего нового читателя») отнесены к «Датасет твитов положительной тональности». Основным критерием автоматической классификации в этих примерах являлся «смайлик», при этом ручной верификации, несмотря на заявленную ручную коррекцию, возможно не проводилось. К другому источнику трудностей следует отнести недостаточную актуальность, характерную для большинства подобных НД (по данным *kaggle.com* данные *RuTweetCorp* не обновлялись более двух лет).

В целях повышения качества работы моделей в области анализа текста и эмоциональной тональности предлагается расширить обучающий набор *RuTweetCorp* за счёт дополнительных данных, собранных из пользовательского ввода на МУ. Сведения предварительно бинарно классифицируются с использованием автоматического анализа, а также подвергаются частичной ручной коррекции в целях повышения точности классификации меток. Это позволит частично исправить недостатки базового НД и обеспечит дополнительную адаптацию модели под принятый стиль общения при корпоративном использовании.

В соответствии с категориями эмоций проведён поиск позитивно и негативно окрашенных сообщений, из которых сформированы две коллекции. Разметка собственного НД выполнена с использованием автоматизированного подхода, основанного на предобученной НС для анализа эмоционального окраски текста на базе *RuTweetCorp*. На этапе разметки модель присваивала каждому анализируемому тексту значение эмоциональной классификации. Ко-

¹⁰ *RuTweetCorp* – Рубцова Ю. Автоматическое построение и анализ корпуса коротких текстов (постов микроблогов) для задачи разработки и тренировки тонового классификатора. *Инженерия знаний и технологии семантического веба*. 2012. Т.1. С.109-116. <https://www.kaggle.com/datasets/maximsuvorov/rutweetcorp>.

¹¹ *Linis Crowd* — Общедоступный тональный словарь *PolSentiLex* и платформа для его создания. <https://linis-crowd.org/>.

¹² *Quick Draw! Dataset* – Открытый набор данных. <https://github.com/googlecreativelab/quickdraw-dataset>.

гда вероятность отнесения текста к определённой эмоциональной категории находилась в диапазоне от 0,4 до 0,6 (т.е. модель испытывала неопределённость в классификации), привлекались операторы, которые выполняли ручную разметку. Полуавтоматическая разметка данных является общепринятым методом для создания высококачественных НД в задачах анализа текстов, особенно в контексте анализа эмоциональной окраски.

При создании словаря эмоциональной окраски требуется, чтобы текстовые коллекции содержали достаточное количество различных словоформ. Исследование получаемых НД показало, что лексикон при общении с помощью МУ, как правило, ограничен. Исходные НД содержали много текстов длиной менее 20 символов, не обладающих информативностью. НД формировался в течение года с использованием около 200 активных МУ. Каждый текст в корпусе содержит следующую информацию: дата и время ввода; идентификатор МУ; текст, введённый пользователем; класс текста (позитивный, негативный).

Обеспечение более точных результатов эксперимента достигается дополнительной фильтрацией собранных текстовых данных: из собранных текстов исключены сообщения, где одновременно присутствуют позитивные и негативные эмоциональные выражения; произведено удаление малоинформативных сообщений, длина которых менее 20 символов; удалены стоп-слова; осуществлено приведение к единому регистру.

Для оценки представительности корпуса проведён анализ количества уникальных терминов в зависимости от размера коллекции. Общие сведения о коллекции и примеры корпуса текстов приведены в таблицах 2 и 3. Эти данные были использованы для обучения и настройки модели *GRU*.

Таблица 2 – Соотношение коллекций по их объёмам в корпусе текстов, собранных на основе данных пользовательского ввода на мобильных устройствах

№	Тип коллекции	Количество словоформ в коллекции	Количество уникальных словоформ в коллекции
1	Позитивные тексты	30767	3012
2	Негативные тексты	24291	2918

Таблица 3 – Структура и пример собранного набора данных

ID записи	Дата и время ввода	ID устройства	Текст ввода	Класс
99033	2023-03-26 15:11:52.516	3682	Почему до сих пор не отправлены документы?	-1
102876	2023-03-27 12:41:12.159	4212	У меня все хорошо руку разрабатываю мажу диклофенаком восстанавливается но не сразу.	1
103990	2023-04-05 16:11:42.836	2134	Здравствуйте, Наталья. К сожалению, сегодня встреча отменяется.	-1
104984	2023-04-10 10:31:48.136	3487	Клиент отказался оплачивать услуги. Вызвали полицию.	-1
108996	2023-05-03 14:31:34.205	3177	Сегодня не приеду на работу. Взяла отгул.	1
109312	2023-05-07 17:25:45.601	3991	Наш прогресс по проекту значительно замедлился, предлагаю начать вводить меры.	-1
112934	2023-05-11 14:55:25.306	3991	Отлично справился, это было действительно впечатляюще.	1
115548	2023-06-15 15:31:32.421	3991	Качество исполнения ниже ожидаемого уровня.	-1

В результате эксперимента с целью сравнения качества работы НС с максимальным полученным значением доли верных ответов на проверочном НД (рекуррентной НС на основе *GRU* с идентичными параметрами) и выбора наиболее эффективной НС установлено, что доля правильных ответов на обучающем НД возрастает (рисунок 3). Полученные результаты показали, что на обучающем НД доля правильных ответов для этой модели составила 96%. На проверочном НД доля правильных ответов достигла 92%, что указывает на способность модели правильно классифицировать данные, которые не использовались для обучения.

Для получения полной и наглядной картины целесообразно представить результаты сравнения на едином графике, отображающем ключевые метрики качества модели для различных эпох. Это позволит детально проследить, каким был уровень эффективности модели при обучении на исходном необработанном НД, и насколько он изменился после проведения очистки и удаления некорректных данных, а также дополнения его новыми данными. Положительная динамика метрик после коррекции НД подтверждает, что устранение некорректных записей, а также расширение НД тематическими текстами способствует формированию более устойчивой и точной модели, обеспечивающей надёжные результаты на проверочных данных.

Результаты, представленные на рисунке 4, позволяют проследить изменение метрик качества модели в зависимости от используемой версии корпуса *RuTweetCorp* — базовой или дополненной (модифицированной). Модель, обученная на модифицированном корпусе *RuTweetCorp*, имеет более высокие показатели качества: максимальные значения метрик *Accuracy* и *F1-Score* на проверочном НД достигали 0.92 и 0.912 соответственно. При использовании исходного корпуса наблюдалось снижение качества классификации, при этом значения метрик составили около 0.83 и 0.811 соответственно.

Экспериментом подтверждено, что включение в обучающий НД текстов, введённых работниками в процессе их повседневной деятельности, позволило повысить качество работы модели. Расширение НД обеспечило высокую способность модели к обобщению и сделало её более чувствительной к особенностям пользовательских данных.

Заключение

Показано, что для решения задачи анализа эмоциональной окраски коротких текстов, вводимых на МУ, рациональным подходом к формированию первичного набора индивиду-

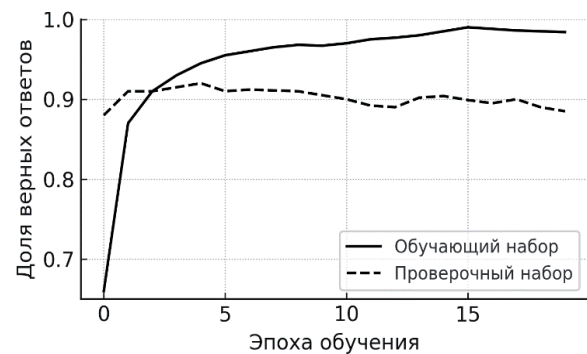


Рисунок 3 – Результаты работы рекуррентной нейронной сети со слоем *GRU*, обученной на наборе *RuTweetCorp* совместно с собственным набором данных

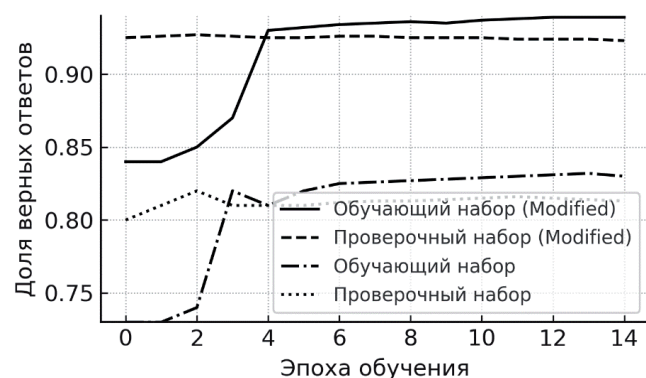


Рисунок 4 – Сравнительная характеристика эффективности работы модели при обучении на базовом и расширенном корпусах *RuTweetCorp*

альных признаков на основе накапливаемой поведенческой информации (вектора признаков) является применение бинарной классификации.

Экспериментально подтверждено, что показатели обучения могут быть улучшены путём комбинирования НД на основе открытого и собственного наборов текстов, благодаря чему доля правильных ответов на проверочном НД достигла 92%.

Список источников

- [1] **Justus D. et al.** Predicting the computational cost of deep learning models. *2018 IEEE international conference on big data (Big Data)*. IEEE, 2018. P.3873-3882. DOI: 10.1109/BigData.2018.8622396.
- [2] **Савенков П.А., Ивутин А.Н.** Методы анализа естественного языка в задачах детектирования поведенческих аномалий. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. №3. С.358-366. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-358-366.
- [3] **Turney P.D.** Thumbs up or thumbs down? Semantic orientation applied to unsupervised classification of reviews. *Proceedings of the 40th annual meeting of the association for computational linguistics*, Philadelphia, Pennsylvania, 2002. P.417-424. DOI: 10.48550/arXiv.cs/0212032.
- [4] **Maas A. et al.** Learning word vectors for sentiment analysis. *Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: Human language technologies*. 2011. P.142-150.
- [5] **Thelwall M. et al.** Sentiment strength detection in short informal text. *Journal of the American society for information science and technology*. 2010. V.61. No 12. P.2544-2558. DOI: 10.5555/1890706.1890713.
- [6] **Двойникова А.А., Карнов А.А.** Аналитический обзор подходов к распознаванию тональности русскоязычных текстовых данных. *Информационно-управляющие системы*. 2020. №4(107). С.20-30. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-4-20-30.
- [7] **Костерин М.А., Парамонов И.В.** Применение глубоких нейронных сетей для автоматического определения иронии в русскоязычных текстах. *Моделирование и анализ информационных систем*. 2024. Т.31. №1. С.90-101. DOI: 10.18255/1818-1015-2024-1-90-101.
- [8] **Golubev A.A., Loukachevitch N.V.** Use of bert neural network models for sentiment analysis in Russian. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2021. Т.55. С.17-25. DOI: 10.3103/S0005105521010027.
- [9] **Golubev A., Rusnachenko N., Loukachevitch N.** RuSentNE-2023: Evaluating entity-oriented sentiment analysis on Russian news texts //arXiv preprint arXiv:2305.17679. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.17679.
- [10] **Loukachevitch N.V. et al.** SentiRuEval: testing object-oriented sentiment analysis systems in Russian. *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии*. 2015. Т.2, №14. С.3-15.
- [11] **Rogers A. et al.** RuSentiment: An enriched sentiment analysis dataset for social media in Russian. *Proceedings of the 27th international conference on computational linguistics*. 2018. P.755-763.
- [12] **Савенков П.А.** Идентификация нетиповых сценариев использования мобильных устройств на базе коротких текстов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. №3. С.348-352. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-348-352.
- [13] **Машечкин И.В., Петровский М.И., Царёв Д.В.** Методы машинного обучения для анализа поведения пользователей при работе с текстовыми данными в задачах информационной безопасности. *Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика*. 2016. №4. С.33-39.
- [14] **Smetanin S.** The applications of sentiment analysis for Russian language texts: Current challenges and future perspectives. *IEEE Access*. 2020. V.8. P.110693-110719. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3002215.
- [15] **Smetanin S., Komarov M.** Deep transfer learning baselines for sentiment analysis in Russian. *Information Processing & Management*. 2021. Т.58. №3. С.102484. DOI: 10.1016/j.ipm.2020.102484.
- [16] **Калабихина И.Е., Мошкин В.С., Колотуша А.В., Кашин М.И., Клименко Г.А., Казбекова З.Г.** Анализ отзывов пациентов с использованием машинного обучения и лингвистических методов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.55-66. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-55-66.
- [17] **Наместников А.М., Пирогова Н.Д., Филиппов А.А.** Подход к автоматическому построению лингвистической онтологии для определения интересов пользователей социальных сетей. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №3(41). С.351-363. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-351-363.
- [18] **Ярушкина Н.Г., Мошкин В.С., Андреев И.А.** Алгоритм психолингвистического анализа текстовых данных социальных сетей с применением модели «Большая пятёрка». *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №1(43). С.82-92. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-1-82-92.
- [19] **Лукашевич Н.В., Добров Б.В.** Проектирование лингвистических онтологий для информационных систем в широких предметных областях. *Онтология проектирования*. 2015. Т.5. №1(15). С.47-69.

- [20] *Northcutt C.G., Athalye A., Mueller J.* Pervasive label errors in test sets destabilize machine learning benchmarks. *35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021) Track on Datasets and Benchmarks*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.14749.
- [21] *Гетьман А.И.* и др. Методика сбора обучающего набора данных для модели обнаружения компьютерных атак. *Труды Института системного программирования РАН*. 2021. Т.33. №5. С.83-104. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-5.
- [22] *Northcutt C. G., Athalye A., Mueller J.* Pervasive label errors in test sets destabilize machine learning benchmarks //arXiv preprint arXiv:2103.14749. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.14749.

Сведения об авторах



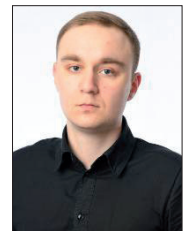
Ивутин Алексей Николаевич, 1979 г. рождения. Окончил ТулГУ в 2002 г., д.т.н. (2021), профессор. Заведующий кафедрой «Вычислительная техника» ТулГУ. В списке научных трудов более 200 работ в области реинжиниринга информационных процессов, учебно-тренировочных средств и ИИ. Author ID (РИНЦ): 330277; ORCID: 0000-0003-2970-2148; Author ID (Scopus): 56263425200. alexey.ivutin@gmail.com. ✉.

научных трудов

Савенков Павел Анатольевич, 1994 г. рождения. Окончил ТулГУ в 2018 г., к.т.н. (2023). Доцент кафедры «Вычислительная техника» ТулГУ. В списке научных трудов около 40 работ. ORCID: 0000-0002-0616-6875; Author ID (РИНЦ): 1041333; Author ID (Scopus): 57203140858. pavel@savenkov.net.



Волошко Анна Геннадьевна, 1987 г. рождения. Окончила ТулГУ в 2010 г., к.т.н. (2014), доцент. Доцент кафедры «Вычислительная техника» ТулГУ. В списке научных трудов более 80 работ в области реинжиниринга информационных и производственных процессов, параллельного программирования, искусственного интеллекта. ORCID: 0000-0002-4304-2513; Author ID (РИНЦ): 743279; Author ID (Scopus): 57219570442. atroshina@mail.ru.



Поступила в редакцию 30.06.2025, после рецензирования 26.09.2025. Принята к публикации 30.09.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-566-577

Automated sentiment analysis of short texts

© 2025, A.N. Ivutin ✉, P.A. Savenkov, A.G. Voloshko

Tula State University (TSU), Tula, Russia

Abstract

Digital technologies are transforming traditional patterns of user behavior, increasingly shifting communication toward mobile devices that serve as personal assistants and multifunctional tools. This transition highlights the growing need to assess the emotional attitude of transmitted messages. Mobile communication imposes constraints on message length and style, emphasizing brevity and reducing contextual depth. For sentiment analysis of short sets of text and extraction of emotional characteristics, this study proposes the use of binary classification as a preprocessing stage for data arrays, combined with a floating temporal context window to refine the processed information. Recurrent neural networks are employed alongside the binary classifier to enhance analytical accuracy while maintaining computational efficiency. It is demonstrated that the results of this work can be improved by supplementing traditionally used datasets with information collected directly from users' mobile devices during their daily activities. The aim of this work is to improve the quality of sentiment analysis of short sets of user texts by developing and testing a method for automated generation of a trusted dataset. Existing datasets contain a significant amount of incorrectly labeled information, which impacts the final quality of the analysis. The proposed methods achieved correct answer rates of 96% on the training dataset and 92% on the validation dataset.

Keywords: *sentiment, mobile device, dataset, neural network, classification, recurrent networks.*

For citation: Ivutin AN, Savenkov PA, Voloshko AG. Automated sentiment analysis of short texts [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 566-577. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-566-577.

Financial Support: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-21-20022, <https://rscf.ru/en/project/24-21-20022/> and the Tula Region Committee on Science and Innovation.

Authors' contribution: Ivutin A.N. – problem statement, experiment planning; Savenkov P.A. – algorithm design, data collection and analysis; Voloshko A.G. – dataset verification, and results interpretation.

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

List of figures and tables

Figure 1 – General principle of formation and analysis of behavioral profile

Figure 2 – Architecture of the artificial neural network used for classification

Figure 3 – Results of the recurrent neural network with a GRU layer, trained on the RuTweetCorp dataset together with our own dataset

Figure 4 – Comparative characteristics of the efficiency of the model when training on the basic and extended RuTweetCorp corpora

Table 1 – Datasets for sentiment analysis (binary classification)

Table 2 – Ratio of collections by their volumes in the text corpus collected based on user input data on mobile devices

Table 3 – Structure and example of the collected dataset

References

- [1] **Justus D. et al.** Predicting the computational cost of deep learning models. *2018 IEEE international conference on big data (Big Data)*. IEEE, 2018. P.3873-3882. DOI: 10.1109/BigData.2018.8622396.
- [2] **Savenkov PA, Ivutin AN.** Methods of natural language analysis in the problems of detecting behavioral anomalies. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2022; 3: 358-366. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-358-366.
- [3] **Turney PD.** Thumbs up or thumbs down? Semantic orientation applied to unsupervised classification of reviews //arXiv preprint cs/0212032. 2002. DOI: 10.48550/arXiv.cs/0212032.
- [4] **Maas A.** et al. Learning word vectors for sentiment analysis. *Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: Human language technologies*. 2011. P.142-150.
- [5] **Thelwall M.** et al. Sentiment strength detection in short informal text. *Journal of the American society for information science and technology*. 2010; 61(12): 2544-2558. DOI: 10.5555/1890706.1890713.
- [6] **Dvoynikova AA, Karpov AA.** Analytical review of approaches to sentiment recognition of Russian-language text data. *Information and control systems*. 2020; 4(107): 20-30. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-4-20-30.
- [7] **Kosterin MA, Paramonov IV.** Application of deep neural networks for automatic detection of irony in Russian-language texts [In Russian]. *Modeling and analysis of information systems*. 2024; 31(1): 90-101. DOI: 10.18255/1818-1015-2024-1-90-101.
- [8] **Golubev AA, Loukachevitch NV.** Use of bert neural network models for sentiment analysis in Russian. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2021; 55: 17-25. DOI: 10.3103/S0005105521010027.
- [9] **Golubev A, Rusnachenko N, Loukachevitch N.** RuSentNE-2023: Evaluating entity-oriented sentiment analysis on Russian news texts //arXiv preprint arXiv:2305.17679. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.17679.
- [10] **Loukachevitch NV.** et al. SentiRuEval: testing object-oriented sentiment analysis systems in Russian. *Computer linguistics and intellectual technologies*. 2015; 2(14): 3-15.
- [11] **Rogers A. et al.** **RuSentiment:** An enriched sentiment analysis dataset for social media in Russian. *Proceedings of the 27th international conference on computational linguistics*. 2018. P.755-763.
- [12] **Savenkov PA.** Identification of non-standard scenarios for using mobile devices based on short texts [In Russian]. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2023; 3: 348-352. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-348-352.
- [13] **Mashechkin IV, Petrovsky MI, Tsarev DV.** Machine learning methods for analyzing user behavior when working with text data in information security problems [In Russian]. *Bulletin of Moscow University. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*. 2016; 4: 33-39.
- [14] **Smetanin S.** The applications of sentiment analysis for Russian language texts: Current challenges and future perspectives. *IEEE Access*. 2020; 8: 110693-110719. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3002215.

- [15] **Smetanin S, Komarov M.** Deep transfer learning baselines for sentiment analysis in Russian. *Information Processing & Management*. 2021; 58(3): 102484. DOI: 10.1016/j.ipm.2020.102484.
- [16] **Kalabikhina IE, Moshkin VS, Kolotusha AV, Kashin MI, Klimenko GA, Kazbekova ZG.** Analysis of patient reviews using machine learning and linguistic methods [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 55-66. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-55-66.
- [17] **Namestnikov AM, Pirogova ND, Filippov AA.** An approach to the automatic linguistic ontology construction to determine the interests of social network users [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(3): 351-363. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-351-363.
- [18] **Yarushkina NG, Moshkin VS, Andreev IA.** Algorithm for psycholinguistic analysis of social networks texts using the Big Five Personality Traits [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(1): 82-92. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-1-82-92.
- [19] **Lukashevich NV, Dobrov BV.** Developing linguistic ontologies in broad domains [In Russian]. *Ontology of designing*. 2015; 5(1): 47-69.
- [20] **Northcutt CG, Athalye A, Mueller J.** Pervasive label errors in test sets destabilize machine learning benchmarks. *35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021) Track on Datasets and Benchmarks*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.14749.
- [21] **Getman AI.** et al. Methodology for collecting a training data set for a computer attack detection model [In Russian]. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2021; 33(5): 83-104. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-5.
- [22] **Northcutt C. G., Athalye A., Mueller J.** Pervasive label errors in test sets destabilize machine learning benchmarks //arXiv preprint arXiv:2103.14749. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.14749.

About the authors

Aleksey Nikolaevich Ivutin (b. 1979) graduated from TSU in 2002, Doctor of Technical Sciences (2021), Professor, Head of the Department of Computer Engineering at TSU. The list of scientific publications includes more than 200 works in the field of information process reengineering, educational and training tools and AI. Author ID (RSCI): 330277; ORCID: 0000-0003-2970-2148; Author ID (Scopus): 56263425200. alexey.ivutin@gmail.com. ✉.

Pavel Anatolyevich Savenkov (b. 1994) graduated from TSU in 2018, Candidate of Technical Sciences (2023), Associate Professor of the Department of Computer Engineering at TSU. The list of scientific publications includes about 40 works. ORCID: 0000-0002-0616-6875; Author ID (RSCI): 1041333; Author ID (Scopus): 57203140858. pavel@savenkov.net.

Anna Gennadyevna Voloshko (b. 1987) graduated from TSU in 2010, Candidate of Technical Sciences (2014), Associate Professor of the Computer Engineering Department at TSU. The list of scientific publications includes more than 80 works in the field of reengineering of information and production processes, parallel programming, and artificial intelligence. ORCID: 0000-0002-4304-2513; Author ID (RINC): 743279; Author ID (Scopus): 57219570442. atroshina@mail.ru

Received June 30, 2025. Revised September 26, 2025. Accepted September 30, 2025.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 519.711:001

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-578-597



Методы и модели анализа научной деятельности

© 2025, Д.А. Губанов, Л.Ю. Жиликова✉, О.П. Кузнецов, А.Г. Чхартишвили

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

Аннотация

Статья посвящена описанию методов анализа научной деятельности и созданных на их основе инструментов для принятия обоснованных решений на всех уровнях управления в научной сфере – от отдельных исследователей до руководителей научных организаций. Проведён обзор отечественных и зарубежных исследований в области наукометрии, выявлены основные тенденции, а также обозначены пробелы, на устранение которых направлен проект ИПУ РАН по созданию информационной системы анализа научной деятельности. Проект включает разработку моделей, методов и алгоритмов анализа научной деятельности учёных, организаций, журналов, конференций в области теории управления на основе данных о публикациях. Эта задача решается с помощью междисциплинарного подхода, включающего сетевой анализ, онтологическое проектирование, методы анализа больших данных и машинного обучения, оптимизации. В основе разработанной системы лежит онтология научного знания в теории управления, основные принципы создания и структура которой описаны в статье. В сочетании с технологическими возможностями этой системы представленная онтология позволяет обеспечить высокий уровень детализации анализа, недоступный в других наукометрических системах (*Web of Science*, *Scopus*, РИНЦ и др.). Показано, что принципы создания и структура разработанной онтологии переносимы на другие области исследований. Рассмотрены современные методы сбора и представления данных, методы сетевого анализа и анализа содержания научных текстов. Представлены основные подходы, методы и модели анализа научной деятельности, рассмотрено применение этих методов в разработанной информационной системе.

Ключевые слова: анализ научной деятельности, теория управления, информационная система, классификация, онтология, тематический профиль, тематическое пространство, термин, обработка текстов, сетевой анализ.

Цитирование: Губанов Д.А., Жиликова Л.Ю., Кузнецов О.П., Чхартишвили А.Г. Методы и модели анализа научной деятельности. Онтология проектирования. 2025. Т.15, №4(58). С.578-597. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-578-597.

Вклад авторов: Губанов Д.А. – раздел 3, список источников; Жиликова Л.Ю. – структура статьи, введение, раздел 1, список источников, заключение; Кузнецов О.П. – введение, раздел 2; Чхартишвили А.Г. – раздел 4, редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Рост количества научных журналов и увеличивающиеся темпы роста числа научных публикаций затрудняют полный охват информации даже в узких областях науки. Специалисты в одной и той же предметной области не всегда могут узнать друг о друге. Проблемы возникают у редакторов журналов при поиске рецензентов, у организаторов конференций при рассылке приглашений, у лиц, принимающих управленческие решения в научной деятельности (НД). Из-за неравномерного представительства журналов из разных дисциплин при разделении на квартили авторы не всегда могут найти высокорейтинговые журналы для

публикации своих результатов [1]. С развитием информационных и телекоммуникационных технологий всё большие объёмы данных становятся доступными в электронном виде, что открывает большие возможности для автоматизации сбора, структурирования и обработки информации, создания моделей анализа, прогнозирования, планирования и поддержки принятия решений в области управления НД.

Вследствие этого актуально создание систем, автоматизирующих получение информации об объектах НД (публикациях, авторах, научных журналах, организациях, конференциях и др.) на основе анализа публикаций. Такие системы можно разделить на две группы. Хорошо известны базы *Web of Science*, *Scopus*, РИНЦ, *Google Scholar*, *ResearchGate*, *OpenAlex* и др., их главная цель – анализ цитируемости публикаций, на основе которого вычисляются наукометрические оценки публикаций и их авторов (индекс Хирша), а также научных журналов (импакт-фактор). Более сложными и менее исследованными являются задачи анализа содержания научных текстов. Систем такого рода гораздо меньше. Можно отметить систему *Semantic Scholar* (www.semanticscholar.org), специализирующуюся на компьютерных науках и медицине, а также разработку *iFORA* (<https://issek.hse.ru/ifora>), которая работает не только с научными публикациями, но и с патентами, бизнес-аналитикой и др.

Несмотря на различия в целях и в методах анализа, указанные системы имеют два обязательных компонента: базу публикаций и средства представления тематического пространства, в котором позиционируются объекты НД. Структура тематического пространства задаётся классификаторами научных областей (УДК [2], MSC2020 [3], PACS [4], OECD [5] и др.).

В настоящей статье дан обзор методов и систем анализа НД; рассмотрена Информационная система анализа научной деятельности (ИСАНД), разработанная в ИПУ РАН [6]. Её основу составляет онтология наук об управлении [7, 8]. На основе классификатора ИСАНД разработан новый тематический класс «Теория управления» в Государственном рубрикаторе научно-технической информации (ГРНТИ) [9], который появится в открытом доступе в следующей редакции ГРНТИ под номером 42.

1 Управление научной деятельностью: обзор основных подходов

Для управления наукой требуются комплексные модели НД, интегрирующие методы наукометрии, сетевого анализа (СА), теории управления. В качестве объективной оценки работы учёных, журналов, научных коллективов, школ, организаций используются наукометрические показатели [10, 11]. Термин «наукометрия» в русскоязычных исследованиях был введён в 1969 г. [12] и не потерял своей актуальности спустя десятилетия [13]. В настоящее время исследованиям по наукометрии посвящены периодические научные журналы: “*Scientometrics*” (*Springer*), “*Quantitative Science Studies*” (*MIT Press Direct*), “*Journal of Informetrics*” (*ScienceDirect*), «Управление наукой и наукометрия» (РИЭПП), «Библиосфера» (ГПНТБ СО РАН) и др.

Большой потенциал в наукометрии и управлении НД имеет применение аппарата сетевых наук. С их помощью становятся возможными исследование возникающих научных связей, явных и неявных сообществ, поиск наиболее влиятельных учёных и научных школ и решение других задач, которые можно сформулировать в рамках сетевой парадигмы. Начало этому направлению положили статьи [14–16]. В обзоре [17] используется рекурсия (исследуется развитие области СА): построена сеть соавторства более 50 тысяч учёных, занимающихся сетевыми науками; проанализирована её топология и динамика; исследованы модели сотрудничества и структурные свойства сети соавторства; определены ведущие авторы, крупнейшие сообщества; проведено сравнение свойств сети с наукометрическими показателями.

В настоящее время наукометрия включает ряд методов СА [18]: определение центральности узлов (обзор методов определения центральности см. в [19]) для поиска ключевых авторов и публикаций, влияющих на развитие области исследования [20, 21], кластерный анализ в сетях [22] и его адаптация к наукометрическим сетям [23–25], визуализация связей [26, 27], определение плотности сети и др.

Объёмный наукометрический анализ литературы по теме «научные социальные сети» проведён в [28]. Программная статья [29], посвящённая эволюции сетей научного сотрудничества, процитирована около четырех тысяч раз. Исследованию научных социальных сетей (*LinkedIn*, *ResearchGate*, *Academia.edu*, *Mendeley*) посвящена статья [30]. Научным взаимодействиям в научных сетях посвящено большое количество работ (см., напр., [31–33]). Как правило, в исследованиях рассматриваются отдельные области науки [34, 35], отдельные научные и исследовательские заведения [36, 37]; в [38] проведён анализ гендерного распределения авторов научных публикаций; глобальное гендерное неравенство в науке исследуется в [39]. Исследование научных социальных сетей позволяет представить структуру научного сообщества, выявить влиятельных авторов и организации, проследить возникновение и развитие сотрудничества.

Отдельной областью исследований является анализ индексов цитирования и их влияния на научные сети, который имеет важное значение в оценке научного влияния и создании баз данных (БД) для СА. К основным наукометрическим индексам относятся: для авторов – индекс Хирша (h -индекс) и его модификации (g -индекс и i -индекс); для журналов – показатели, отражающие среднее количество цитируемости недавних статей (к ним можно отнести импакт-фактор и *SiteScore*). В [40] сравниваются различные модификации индекса Хирша на примере данных из области биомедицины; в [41] приведён обзор исследований по цитированию авторов. В [42] приводится сравнение показателей и цитирования с междисциплинарной точки зрения. В [43] исследуется стратификация сетей соавторства, построенных по данным за 50-летний период, на основе h -индекса. В [44] рассмотрена совместная эволюция сетей соавторства и цитирования, а также их влияние на научные показатели: индекс Хирша автора и импакт-фактор журнала. В [45] предлагается альтернативный индекс, который учитывает семантические связи опубликованных работ в междисциплинарной области знаний, а также цитирование и соавторство учёных, облегчая идентификацию и картирование наиболее релевантных тем и авторов в этой области. Высокую цитируемость имеют обзор литературы по показателям цитируемости [46] и обзор по теории и практике наукометрии [47].

Проблемы, препятствующие развитию наукометрических исследований и научных коммуникаций, и пути их преодоления рассматриваются в [48]. Методика оценки результативности научных организаций представлена в [49], а концептуальная модель системы наукометрического мониторинга результативности НД – в [50]. Задачам управления НД с помощью наукометрического подхода посвящены исследования [51, 52]. Современные подходы в наукометрии изложены в [53]. Международное сотрудничество учёных исследуется в [54, 55], при этом используются новые наукометрические показатели (коцитирование и др.). Анализ количества публикаций и цитирований в различных областях отечественной науки проведён в [56]. Анализ публикаций в информационной системе *Math-Net.Ru* посвящена работа [57], граф цитирования статей российских математиков приведён в [58]. Обзор литературы о влиянии самоцитирования на возникающие искажения в библиометрическом анализе представлен в статье [59]. Сетевая модель коллаборации учёных приведена в [60]. В ИПУ РАН подготовлен специальный выпуск по наукометрии в журнале «Управление большими системами» [61].

Менее исследованными являются задачи анализа содержания научных текстов. В [62] на основе семантического анализа и анализа социальных сетей предложено прогнозирование

успеха научных публикаций. Проведённый на основе набора данных анализ публикаций по химической инженерии за 2010–2012 годы позволил предсказать цитирование через шесть лет после публикации с точностью почти 80%. В [63] исследуются тематики библиометрических исследований посредством сетей цитирования и семантического анализа. Рассмотрено распределение тем научной литературы, в которой используются термины «библиометрия», «наукометрия» и «информетрика». В [64] проводится мета-анализ семантической классификации цитирований на корпусе 60 научных статей в этой области. Исследуются подходы к классификации цитирований на основе их семантического типа. Обзор [65] посвящён кластеризации исследовательских документов на основе семантического анализа и извлечения ключевых слов. Проведён сравнительный анализ алгоритмов извлечения ключевых слов и кластеризации; предложен прототип поисковых систем на основе документов, а также методы семантической классификации исследовательских работ в области компьютерных наук.

Коллективом ФИЦ ИУ РАН разработаны методы семантического анализа научных текстов [66], методы реляционно-ситуационного анализа текстов [67]; интеллектуальная поисковая система *Exactus* (<http://www.exactus.ru/>), на основе которой созданы система выявления заимствований в научных текстах *Exactus Like* [68] (<http://like.exactus.ru/>) и система интеллектуального поиска и анализа научных публикаций *Exactus Expert* [69] (<http://expert.exactus.ru/>). В [70] представлен прогноз путей развития науки, технологий и инноваций. Представлен подход и инструменты интеллектуального анализа текста для построения карт науки особого вида – «Карты науки в квадрате». Работа [71] посвящена семантическому анализу трудов конференции по семантическому анализу.

Разработанный в Московском государственном университете многоязычный энкодер *SciRus-tiny*, использующий семантические векторные представления текстов, предназначен для анализа научных текстов и способен осуществлять поиск близких по тематике публикаций [72]. Открытый бенчмарк *RuSciBench* рекомендован для оценки векторных представлений научных текстов на русском и английском языках из данных библиотеки *eLibrary* [73].

Выявлению плагиата и нарушения этики публикаций в русскоязычных научных изданиях посвящена статья [74], а выявлению сгенерированных языковыми моделями фрагментов в научных публикациях – работа [75].

2 Онтология наук об управлении

Научные тексты перед публикацией получают коды одного или нескольких универсальных классификаторов (УДК [2], MSC2020 [3], PACS [4], OECD [5] и др.), которые строго соответствуют таксономическому принципу: каждый объект классификации относится к одной вершине дерева. Во многих случаях однозначная классификация оправдана, а зачастую и неизбежна: принятая статья попадает в одну определённую рубрику журнала, а доклад включается в одну секцию конференции.

Однако традиционные универсальные классификаторы имеют ряд недостатков и могут не в полной мере отражать соответствие статьи научным тематикам. Их одномерная структура, соответствующая таксономическому принципу, усложняет категоризацию междисциплинарных работ и не позволяет корректно отразить различия в компетенциях специалистов. Поэтому классификатор УДК время от времени подвергается модификациям, в результате которых он оказывается неравномерным по уровням, а, например, в Российском научном фонде требуется указывать в заявках на гранты основной код и два дополнительных. Это означает признание неоднородности позиционирования заявки в тематическом пространстве и позволяет при необходимости провести рецензирование заявки экспертами из разных научных областей. Кроме того, универсальность классификаторов приводит к чрезмерно

крупному членению научных дисциплин и, как следствие, недостаточной детализации разделов. Это хорошо для научных библиотек, которые, как правило, тоже универсальны, но не всегда хорошо для научных журналов, которые специализированы и нуждаются в более глубокой детализации.

Примером научной области, в которой неудобна одномерная классификация, является теория управления. Неудобства проявляются в работе редакций научных журналов по управлению. Для рецензирования статьи, в которой описывается, например, интеллектуальная система, нужен не только специалист по искусственному интеллекту, но и эксперт, владеющий математическими методами, использованными при описании системы, а также компетентный в предполагаемой сфере применения этой системы.

Подход к решению этой проблемы предложен в ИПУ РАН [7]. Тематическое пространство наук об управлении делится на три области: *фундаментальные науки*; *прикладные теории и проблемные области*; *области приложений*. Каждая из этих областей детализируется: среди фундаментальных наук выделяются математика, физика, биология, ...; в проблемных областях – теория автоматического управления, анализ данных, вычислительная техника, ...; в сферах приложений – летательные аппараты, медицина, технологические процессы, финансы и др. Фрагмент *дерева тематического пространства* представлен на рисунке 1. Вершины дерева названы *темами*. Число уровней дерева и ветвлений вершин зависит от требуемой детализации, но три вершины первого уровня, названные *главными*, неизменны.



Рисунок 1 – Фрагмент онтологии тематического пространства
(прямоугольники – темы и подтемы, листья – термины)

Позиционирование объектов НД в тематическом пространстве многомерно. Как правило, документ (статья, доклад и т.д.) релевантен многим темам, и поэтому он характеризуется вектором релевантностей, который называется *профилем документа*. Этот вектор представляет собой сечение дерева (не обязательно равномерное по уровням); в каждой точке сечения (теме) стоит число из отрезка $[0, 1]$; сумма всех чисел равна 1 (вектор – стохастический). Каждое число – степень релевантности документа данной теме относительно других тем.

Для вычисления профиля документа тематическое дерево снабжается словарём: к каждой висячей вершине-теме (и, быть может, к некоторым промежуточным вершинам-темам) присоединяется *множество* вершин-терминов, характеризующих данную тему. Тематическое дерево вместе со словарём образует *онтологию* наук об управлении. В этой онтологии смежные вершины-темы связаны отношением класс-подкласс, а смежные вершина-тема и вершина-термин связаны отношением класс-экземпляр. Введение терминов нарушает древовидность онтологии, т.к. термин может относиться к нескольким темам. Метод вычисления профиля документа в [7] основан на частотности содержащихся в нём терминов.

В программной реализации описанной схемы использована база публикаций работников ИПУ РАН. В [7] приведены некоторые данные пробной эксплуатации разработанной системы на материале публикаций журнала «Автоматика и телемеханика». Набор профилей публикаций работника даёт возможность вычислять *профиль работника*, характеризующий набор его научных интересов и компетентностей. А наличие профилей работников облегчает решение различных задач по управлению НД, таких как назначение рецензентов и экспертов, подбор команды для наукоёмкого проекта и т.д.

Составление словаря – это работа, требующая разнообразных компетенций, охватывающих всё тематическое пространство наук об управлении. Для практического использования онтологии удобно, чтобы тематические профили научных объектов строились на фиксированных уровнях дерева тематического пространства.

3 Методы и модели

3.1 Сбор данных и извлечение информации

Для анализа НД требуются данные о публикациях и связанных сущностях: метаданные статей, сведения об авторах и их аффилиациях, журналах и конференциях, грантах и т.п. Источники данных – коллекции полнотекстовых документов и открытые библиографические базы. Если доступны только полнотекстовые документы, то, как правило, применяются инструменты извлечения метаданных и ссылок. В частности, библиотека *GROBID* [76] демонстрирует лучшее качество извлечения метаданных и списков литературы среди открытых инструментов. Для специализированных задач могут привлекаться отдельные инструменты (например, *Adobe Extract* для табличных данных). На практике нередко применяют комбинированные конвейеры: несколько инструментов анализа используются последовательно или параллельно, а результаты объединяются и проходят верификацию экспертом.

В частности, в модуле предварительной обработки данных ИСАНД [6] применяется конвейер на основе *GROBID*: модель предварительно дообучена на корпусе русскоязычных текстов по теории управления, что позволяет повысить точность извлечения данных.

Открытые агрегаторы научных данных, такие как *OpenAlex*, предоставляют свободный доступ к информации о публикациях и цитированиях. *OpenAlex* обеспечивает сопоставимое с коммерческими базами *Scopus/Web of Science* покрытие цитат (на пересечении их корпусов) и индексирует существенно больше журналов открытого доступа (34 тыс. в *OpenAlex*, 6 тыс. в *WoS* и 7 тыс. в *Scopus* на 2024 год) [77]. Качество и полнота метаданных могут различаться по дисциплинам, поэтому целесообразна оценка покрытия БД для конкретной предметной области [77, 78]. В ИСАНД выполняется сбор данных из нескольких источников (в том числе *OpenAlex*), что повышает полноту базы. Каждый источник вносит вклад в общий граф знаний, при этом при загрузке данных в ИСАНД помечается происхождение метаданных.

Ключевая задача при сборе данных – объединение записей об одном объекте (авторе, организации) из разных источников. Внедрение уникальных идентификаторов научных объек-

тов – *ORCID* для авторов, *Research Organization Registry (ROR)* для организаций и др. – упрощает эту задачу. В частности, в *Crossref* поддерживаются *ROR*-идентификаторы фондов, это позволяет унифицировать сведения о грантодателях (см. <https://ror.org/blog/2025-03-05-using-ror-ids-in-place-of-funder-ids>). Для полного автоматического разрешения неоднозначности требуются специальные алгоритмы и эталонные наборы данных. Создаются бенчмарки для сравнения методов идентификации авторов по метрикам точности [79]. В ИСАНД применяется алгоритм объединения записей на основе полученных из разных источников идентификаторов объектов: *ORCID*, *DOI*, *Researcher ID*, *Scopus Author ID*, *ROR* и др.

3.2 Структурирование и представление метаданных

Собранные данные о публикациях и связях между ними необходимо представить в удобной для анализа форме. Для этого используются реляционные схемы данных, которые обеспечивают целостность и эффективный доступ к данным, но не являются гибкими (например, при добавлении новых сущностей) и не предназначены для представления сетевых структур (например, для поиска цепочки сотрудничества между учёными).

Графовая модель данных позволяет отразить экосистему науки как сеть объектов. В такой модели любые научные объекты – публикации (*D*), исследователи (*A*), организации (*O*), конференции (*C*), ключевые термины (*T*) и др. – можно представить как вершины графа ($v \in V$), а отношения между ними – как рёбра ($e = (v_i, v_j) \in E$). Можно определить сеть НД как ориентированный граф $G = (V, E)$, где V – объединение множеств разных сущностей, а E содержит несколько подмножеств $E_1, E_2, \dots$ типов связей. Например, если A – множество авторов, D – множество публикаций, то *подграф соавторства* можно задать как $G_{auth} = (A, E_{auth})$, где каждое ребро $e = (a_i, a_j) \in E_{auth}$ означает совместную публикацию автора a_i с автором a_j . Аналогично, *граф цитирования* задаётся как ориентированный граф $G_{cit} = (D, E_{cit})$, где дуга $(d_i \rightarrow d_j) \in E_{cit}$ означает цитирование работы d_j в работе d_i . Эти специализированные графы можно анализировать отдельно, однако полное представление даёт интегрированная сеть, включающая все типы объектов и связей. В интегрированном представлении множество вершин $V = A \cup D \cup O \cup T \cup \dots$, а каждое ребро помечено типом (например: «автор – статья»; «статья цитирует статью»; «статья содержит термин»; «автор работает в организации»). Этот граф можно воспринимать как многослойную сеть науки: каждый тип связи образует свой слой, но объекты (вершины) одни и те же и могут соединять слои [80]. Для учёта групповых отношений, когда единицами анализа выступают не пары, а группы объектов, применяются *гиперграфы*. Гиперребро может связывать, например, множество авторов $a_1, a_2, \dots, a_k$, совместно написавших статью (это единое событие, связывающее всю группу). Гиперграфы усложняют математический аппарат анализа, но способны представить коллективные взаимодействия напрямую, без разбиения их на парные взаимодействия.

Преимущество графового представления – возможность хранить и обрабатывать всю структуру отношений. Добавление новой сущности или типа связи не требует доработки схемы данных – достаточно ввести новый тип узла или ребра. Запросы к графу могут гибко следовать по любым цепочкам связей: например, можно запросить «найти путь от автора А к автору Б через цепочку совместных работ и цитирований длиной не более 4» или «найти всех авторов, статьи которых процитированы в журнале В». Подобные запросы сложно выразить на языке *SQL* в реляционной БД, тогда как графовые базы имеют для этого оптимизированные языки (*Gremlin*, *Cypher*, *SPARQL* и др.) и алгоритмы обхода графов. Сформировались две основные парадигмы для работы с графовыми данными. Первая – семантические сети, основанные на стандартах *RDF/OWL (Resource Description Framework/Web Ontology Language)*. Семантические хранилища поддерживают язык запросов *SPARQL*, позволяют ис-

пользовать онтологии и выполнять логический вывод. Вторая парадигма – графы свойств [81], в которой узлы и связи могут иметь произвольные свойства (атрибуты), а схема данных часто гибридна. В ИСАНД [6] для хранения и обработки данных о НД используется семантическое хранилище, схема которого задаётся онтологией *OWL*.

3.3 Анализ текстов научных публикаций

Анализ содержания научных публикаций позволяет определить тематику работ и измерить их семантическую близость. Публикацию можно представить в виде вектора признаков (профиля), отражающего распределение тем или терминов, разными способами: с помощью классификаторов; тематического моделирования; нейросетевых векторных представлений.

Первый способ – заранее создать *онтологию* или *рубрикатор научных тем* и на их основе классифицировать тексты [82, 83]. В частности, в системе ИСАНД используется разработанный экспертами словарь, покрывающий ключевые понятия (термины) заданной научной области. Это позволяет каждому научному объекту ставить в соответствие стохастический вектор $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ в пространстве из n предопределённых тематических категорий, где $p_i \geq 0$ отражает степень принадлежности объекта к теме i . В ИСАНД профили рассчитываются на основе онтологии наук об управлении. Каждая загруженная в систему публикация автоматически анализируется: производится лемматизация, извлекаются ключевые слова, соотносятся с терминами тезауруса, формируется тематический профиль $\mathbf{p}$. Профили хранятся как атрибуты соответствующих узлов (публикаций, авторов, организаций), что позволяет быстро сравнивать объекты по их тематическим векторам. Для измерения близости профилей используется косинусное сходство или метрика на основе L_1 -нормы, например расстояние для двух публикаций d_1 и d_2 : $d(\mathbf{p}^{(d_1)}, \mathbf{p}^{(d_2)}) = \frac{1}{2} \sum_i |p_i^{(d_1)} - p_i^{(d_2)}|$. Близкие по тематике публикации будут иметь близкое к 1 значение. Это даёт возможность улучшать поиск и рекомендации: в ИСАНД реализованы методы поиска экспертов для рецензирования, поиска тематически близких исследований и т.д.

В противоположность априорному заданию тем *методы тематического моделирования* позволяют автоматически извлекать темы из массива текстов. Наиболее известный метод – *LDA (Latent Dirichlet Allocation)* и его варианты [84, 85]. Основная гипотеза *LDA*: существует некоторое (заданное числом k) количество скрытых тем, каждая из которых характеризуется статистическим распределением слов $P(w|z)$, а каждый документ есть смесь этих тем с определёнными весами $\theta_d = P(z|d)$. Параметры модели (распределения $P(w|z)$ и θ_d для всех документов) оцениваются по набору текстов с помощью стохастических методов. В результате работы алгоритма получается набор из k тем – списков слов с указанием вероятностей $P(w|z_i)$. Одновременно для каждого документа получается распределение $\theta_d = (p(z_1|d), \dots, p(z_k|d))$, которое является тематическим профилем этого документа для выявленных алгоритмом тем, не привязанных к каким-либо заранее заданным категориям. Тематические модели хорошо подходят для *первичного анализа* корпуса, когда заранее может быть неизвестно, какие тематические кластеры присутствуют. Тематическое моделирование часто применяется для анализа научной литературы, в т.ч. кластеризации публикаций [86] и отслеживания эволюции научных направлений [87].

Можно использовать *векторные представления текстов* на основе предобученных языковых моделей [88]. Эти модели преобразуют текст статьи d в плотный вектор $\mathbf{e}_d \in \mathbb{R}^D$ (эмбеddинг), располагая близкие по смыслу публикации рядом в пространстве эмбеddингов (даже если они не имеют общих ключевых слов). Используя эмбеddинги, можно решать разные задачи, в частности проводить тематическую кластеризацию публикаций [89]. Недостатки нейросетевых эмбеddингов и тематического моделирования – отсутствие учёта дрейфа пред-

метной области (поскольку обучающая выборка фиксирована) и сложность интерпретации признаков эмбединга.

Для решения конкретных научных задач используются *специальные методы анализа текстов*. В частности, методы извлечения терминов и ключевых слов [90], автоматического реферирования [91], анализа интенции цитирования [92-94], выявления новых научных направлений [95]. Эти методы позволяют составить тезаурус, облегчить анализ больших коллекций работ и оценить влияние научной работы по характеру цитирования. Большие языковые модели активно исследуются, но их применение для анализа НД сопряжено с рисками генерации некорректной информации [96]. Поэтому их следует воспринимать как вспомогательный инструмент для эксперта.

3.4 Сетевой анализ

Сетевые модели фокусируются на структуре научного сообщества и коммуникаций в нём. *Сеть соавторства* – неориентированный граф, в котором узлы – авторы, а рёбра соединяют соавторов одной публикации. Анализ такой сети позволяет найти научные группы, научные школы, «мосты» между научными группами, определить силу связей между исследователями и т.п. *Сеть цитирования* – ориентированный граф, в котором узлы – статьи (или другие научные объекты), а ребро $A \rightarrow B$ означает, что работа A цитирует работу B . Граф отражает информационные потоки, позволяет находить наиболее влиятельные публикации и научные направления, строить карты знаний по цитируемости. В зависимости от цели исследования строятся и другие виды научных сетей: граф аффилиации (автор – организация), граф сотрудничества организаций, граф терминов (термин – узел, совместная встречаемость терминов – связь). Эти представления можно рассматривать как проекции единой многослойной сети НД.

Такой подход позволяет выявлять явные и скрытые закономерности, в т.ч. структуру коллабораций, центры влияния, междисциплинарные связи. Типовые задачи СА: *идентификация ключевых узлов / расчёт влиятельности узлов* – поиск наиболее значимых учёных, работ, организаций по различным показателям [10, 97]; *обнаружение неформальных сообществ* – разбиение сети на плотные кластеры (например, выявление тематических или географических научных групп) [98]; *рекомендация и прогноз связей* – выявление потенциальных связей (для эффективного сотрудничества учёных, для тематического дополнения работ и т.п.) [99]; *анализ динамики* – исследование эволюции сети во времени (например, для оценки роста новых направлений) [100].

В теории сложных сетей разработан широкий спектр *мер центральности* (более 400) (см. [101]), позволяющих ранжировать узлы по их значимости [102]. Мера центральности – это функция C , которая каждому узлу сети ставит в соответствие действительное число. Простейшая мера $C_D(v) = \deg(v)$ – степень вершины $v \in V$ (число связей узла). В контексте науки степень автора в графе соавторства равна числу его соавторов, а степень статьи в графе цитирования – числу её входящих ссылок (цитируемость) либо исходящих (число цитат). Высокая степень означает активное участие объекта в научной коммуникации. Более сложные меры учитывают глобальные свойства. Например, посредничество $C_B(v)$ показывает, через какие узлы проходят кратчайшие пути в сети: узел с высоким посредничеством служит «мостом» между частями графа. Такой узел может указывать на учёного, соединяющего разные научные сообщества, или работу, цитируемую разными областями, или метод оценки влияния на основе причинно-следственных отношений [103]. Эти показатели позволяют количественно определить наиболее влиятельных учёных, публикации, организации. Библиометрические индексы можно рассматривать как частные случаи мер центральности, однако сетевые показатели дают более полную картину, с учётом всей структуры графа цитирова-

ния. Современные обзоры подтверждают продуктивность сетевого подхода для оценки научного вклада учёных [104].

Важная задача СА – *выявление сообществ в сетях*. Сообществом называют подмножество тесно связанных узлов [98]. Для нахождения сообществ ищется разбиение множеств узлов $f: V \rightarrow \{1, \dots, K\}$ (количество сообществ K не фиксируется). Для автоматического обнаружения сообществ применяются алгоритмы кластеризации графов, которые обычно оптимизируют модульность – меру $Q \in [-0,5; 1]$, сравнивающую плотность внутри кластера с ожидаемой в случайной модели [105]. Методы итерационного укрупнения графа, такие как алгоритм Лувена и его модификации [106], гарантируют получение более связных кластеров. Выявленные в сетях соавторства сообщества помогают обнаружить коллаборации и скрытые социальные структуры (например, научные школы). Кластеры в сети цитирования зачастую соответствуют направлениям исследований.

Методы прогнозирования связей [99] позволяют определить, какие связи являются скрытыми или какие связи появятся в будущем (потенциальных соавторов, сотрудничество между группами). В случае со скрытыми связями используется следующая постановка задачи: пусть истинная сеть $G^* = (V, E^*)$ наблюдаема частично $G_{obs} = (V, E_{obs})$, где $E_{obs} \subseteq E^*$, необходимо восстановить $E^* \setminus E_{obs}$. Для определения потенциальных связей используются меры сходства узлов $u, v \in V$ в графе [99], в частности, мера *Adamic/Adar*: $s_{AA}(u, v) = \sum_{z \in \Gamma(u) \cap \Gamma(v)} \frac{1}{\log \deg(z)}$. Актуально направление *анализа динамики сетей* [100]: изучается, как изменяется структура сети со временем $G(t)$ – например, растёт ли связность научного сообщества, увеличивается или уменьшается фрагментация по группам, как влияют коллаборации на последующую цитируемость работ. Такие исследования находятся на стыке с социологией науки и позволяют делать выводы о тенденциях в организации НД.

3.5 Интеграция методов анализа текстов и анализа сетей

Сетевые методы дают в распоряжение исследователей мощный инструментальный для структурного анализа науки [104]. Однако графы не позволяют учитывать смысловое содержание: статьи могут быть связаны через общих авторов или цитирование, но иметь разную тематику. Методы анализа текстов сосредоточены на тематике (на смысле). Их ограничения – отсутствие учёта социальной структуры (исследователи могут быть тематически близки, но в сети находятся далеко друг от друга), значительные затраты на подготовку данных (очистка текста, лемматизация, обучение моделей) и обработку корпусов, особенно полнотекстовых. Предпочтительна интеграция подходов для одновременного учёта того, *кто с кем* взаимодействует, и *о чём* ведутся исследования. В частности, комбинация признаков социальной сети и семантики текста позволяет предсказывать цитируемость с точностью около 80% [62]. В [107] показано, что качество профилей научных объектов можно улучшить, если учесть связи авторства между объектами. В ИСАНД все данные хранятся в виде графа (что даёт возможность выполнять СА – обход связей, расчёт центральностей и пр.), при этом каждый узел снабжён тематическим профилем. Это позволяет выполнять комбинированные запросы и аналитические сценарии. Например, при поиске рецензента можно отобрать кандидатов по близости профилей и выбрать тех, у кого высокие показатели влияния в сети.

4 Основные характеристики разработанной информационной системы

ИСАНД предназначена для обеспечения исследователей, научных коллективов и организаторов науки средствами анализа НД и содержит данные о различных *научных объектах*.

Основой ИСАНД являются массивы публикаций, загружаемые из внешних источников – крупных БД научных материалов. Поскольку одна и та же публикация нередко индексируется в разных системах, в ИСАНД предусмотрена возможность выявления и фиксации дубликатов. То же относится и к другим научным объектам, например авторам или организациям: один и тот же объект может иметь разные представления в разных источниках. Для случаев, когда вероятность совпадения велика (например, у авторов один и тот же уникальный цифровой идентификатор *ORCID*) в системе указывается, что объекты являются дубликатами. Отношение «является дубликатом» считается симметричным и транзитивным.

Особенностью ИСАНД является наличие оригинального *классификатора*, который задаёт структуру *тематического пространства* теории управления. Каждый научный объект в этой системе описывается как вектор в многомерном пространстве, и его можно считать точкой в стандартном симплексе соответствующей размерности. Такой подход обеспечивает корректное сравнение объектов и позволяет применять различные методы анализа.

Структура классификатора имеет три основных уровня. Первый уровень – это *факторы*, которые отражают укрупнённые области исследований, например «Управление в организационных системах». Второй уровень образуют *подфакторы*, детализирующие тематику в рамках факторов, например «Управление в сетевых структурах». Третий уровень представляет собой набор конкретных *терминов*, например, «Социальное влияние».

Для каждого научного объекта в ИСАНД строятся три вида тематических профилей: *базовый профиль* на уровне факторов; *детализированный профиль* на уровне подфакторов; *профиль терминов*. На каждом уровне строится профиль каждой публикации и проводится расчёт профиля для других объектов на основе публикаций, связанных с этими объектами: профиль автора на основе его публикаций (с учётом количества соавторов каждой публикации), профиль журнала на основании опубликованных в нём статей и т.п. С их помощью в ИСАНД осуществляется поиск публикаций, авторов и других научных объектов.

На множестве тематических профилей введена метрика, позволяющая рассчитывать расстояние (от 0 до 1) между научными объектами и находить тематически близкие объекты. Например, исследователь может искать все публикации, находящиеся в тематическом пространстве не далее, чем на расстоянии 0,2 от его собственной работы. В специализированных запросах и сценариях поиска (кого пригласить для рецензирования публикации, кому направить приглашение на конференцию и т.д.) пользователь может самостоятельно задавать радиус тематической окрестности научного объекта (область точек, которые находятся от научного объекта на расстоянии не больше заданного). Алгоритмы расчёта профилей и расстояний между ними описаны в [6].

Заключение

В статье описана Информационная система ИСАНД в области теории управления и сделана попытка поместить её в более широкий контекст мировой науки о науке – как наукометрии, так и анализа текстов и СА, выявляющих ключевые темы и термины публикаций, взаимосвязи между учёными, организациями и конференциями. Представленный подход к построению онтологии наук об управлении позволяет позиционировать объекты (публикации, их авторов, журналы, конференции и научные организации) в многомерном тематическом пространстве. ИСАНД потенциально представляет собой многофункциональную систему, которая объединяет онтологическую основу, массивы данных и математический аппарат анализа. Информационная система ИСАНД призвана обеспечить исследователей и управленцев инструментами для информационного поиска, изучения НД и принятия обоснованных решений в организации и управлении НД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kosyakov D., Pislyakov V.** "I'd like to publish in Q1, but there's no Q1 to be found": Study of journal quartile distributions across subject categories and topics. *Journal of Informetrics*. 2024. Vol.18(1). P.101494. DOI: 10.1016/j.joi.2024.101494.
- [2] ГОСТ 7.90 2007. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Универсальная десятичная классификация. Структура, правила введения и индексирования: издание официальное.
- [3] Mathematics Subject Classification (MSC2020). <https://mathscinet.ams.org/mathscinet/msc/msc2020.html>.
- [4] Physics and Astronomy Classification Scheme. https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf.
- [5] Коды международной классификации (OECD). https://storage.tusur.ru/files/134958/kody_OECD.pdf.
- [6] **Губанов Д.А., Кузнецов О.П., Курако Е.А. и др.** Информационная система анализа научной деятельности (ИСАНД) в области теории управления. *Проблемы управления*. 2024. №3. С.42-65. DOI: 10.25728/ru.2024.3.4.
- [7] **Кузнецов О.П., Суховеров В.С.** Онтологический подход к оценке тематики научного текста. *Онтология проектирования*, 2016. Т.6, №1. С.55-66. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-1-55-66.
- [8] **Агеев Р.П., Алескерев Ф.Т., Алчинов А.И. и др.** Теория управления: словарь системы основных понятий. М.: ЛЕНАНД, 2024. 128 с.
- [9] Государственный рубрикатор научно-технической информации. <https://www.gpntb.ru/grnti.html>.
- [10] **Fortunato S., Bergstrom C.T., Börner K., Evans J.A., Helbing D., Milojević S., ... & Barabási A.L.** Science of science. *Science*. 2018. Vol.359(6379). P.eaao0185. DOI: 10.1126/science.aao0185.
- [11] **Gates A.J., Barabási A.L.** Reproducible science of science at scale: pySciSci. *Quantitative Science Studies*. 2023. Vol.4(3). P.700-710. DOI: 10.1162/qss_a_00260.
- [12] **Налимов В.В., Мульченко З.М.** Наукометрия. Изучение развития науки как информационного процесса. М.: Наука, 1969. 192 с.
- [13] **Granovsky Y.V.** Is It Possible to Measure Science? V. V. Nalimov's Research in Scientometrics. *Scientometrics*. 2001. Vol.52. P.127–150. DOI: 10.1023/A:1017991017982.
- [14] **Barabási A.L., Albert R.** Emergence of scaling in random networks. *Science*. 1999. Vol.286(5439). P.509-512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.
- [15] **Watts D.J., Strogatz S.H.** Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*. 1998. Vol.393(6684). P.440-442. DOI: 10.1038/30918.
- [16] **Girvan M., Newman M.E.J.** Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the national academy of sciences*. 2002. Vol.99(12). P.7821-7826. DOI: 10.1073/pnas.122653799.
- [17] **Molontay R., Nagy M.** Twenty years of network science: A bibliographic and co-authorship network analysis. *Big data and social media analytics: trending applications*. Cham: Springer International Publishing, 2021. P.1-24. DOI: 10.1007/978-3-030-67044-3_1.
- [18] **Costa L.D.F., Rodrigues F.A., Travieso G., Villas Boas P.R.** Characterization of complex networks: A survey of measurements. *Advances in physics*. 2007. Vol.56(1). P.167-242. DOI: 10.1080/00018730601170527.
- [19] **Saxena A., Iyengar S.** Centrality measures in complex networks: A survey //arXiv preprint arXiv:2011.07190. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2011.07190.
- [20] **Dias A., Ruthes S., Lima L., Campra E., Silva M., Bragança de Sousa M., Porto G.** Network centrality analysis in management and accounting sciences. *RAUSP Management Journal*. 2020. Vol.55. P.207-226. DOI: 10.1108/RAUSP-02-2019-0021.
- [21] **D'Ippoliti C.** "Many-Citedness": Citations Measure More Than Just Scientific Quality. *Journal of Economic Surveys*. 2021. Vol.35(5). P.1271-1301. DOI: 10.1111/joes.12416.
- [22] **Lancichinetti A., Fortunato S.** Consensus clustering in complex networks. *Scientific reports*. 2012. Vol.2(1). P.336. DOI: 10.1038/srep00336.
- [23] **Ozcan S., Boye D., Arsenyan J., Trott P.** A scientometric exploration of crowdsourcing: Research clusters and applications. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2020. Vol.69(6). P.3023-3037. DOI: 10.1109/TEM.2020.3027973.
- [24] **Lund B., Ma J.** A review of cluster analysis techniques and their uses in library and information science research: *k*-means and *k*-medoids clustering. *Performance Measurement and Metrics*. 2021. Vol.22(3). P.161-173. DOI: 10.1108/PMM-05-2021-0026.
- [25] **Madani F.** 'Technology Mining' bibliometrics analysis: applying network analysis and cluster analysis. *Scientometrics*. 2015. Vol.105(1). P.323-335. DOI: 10.1007/s11192-015-1685-4.
- [26] **McLaren C.D., Bruner M.W.** Citation network analysis. *International Review of Sport and Exercise Psychology*. 2022. Vol.15(1). P.179–198. DOI: 10.1080/1750984X.2021.1989705.
- [27] **Yang S., Wang F.** Visualizing information science: Author direct citation analysis in China and around the world. *Journal of Informetrics*. 2015. Vol.9(1). P.208-225. DOI: 10.1016/j.joi.2015.01.001.
- [28] **Busygina T.V., Yuklyaevskaya A.V.** A Scientometric Analysis of the Literature on the Topic "Academic Social Networks". *Bibliosphere*. 2022. 3. P.101–122. DOI: 10.20913/1815-3186-2022-3-101-122.
- [29] **Barabási A.L. et al.** Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica A: Statistical mechanics and its applications*. 2002. Vol.311(3-4). P.590-614. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00736-7.
- [30] **Van Noorden R.** Online collaboration: Scientists and the social network. *Nature news*. 2014. Vol.512(7513). P.126-129. DOI: 10.1038/512126a.
- [31] **Valizadeh-Haghi S., Shahbodaghi A., Nasibi-Sis H.** ResearchGate social network: Opportunities and challenges. *Journal of Medical Library and Information Science*. 2021. Vol.2. P.1-6. DOI: 10.22037/jmlis.v2i.32545.
- [32] **Ebrahimzadeh S. et al.** Triggers and strategies related to the collaborative information-seeking behaviour of researchers in ResearchGate. *Online Information Review*. 2020. Vol.44(5). P.1077-1096. DOI: 10.1108/OIR-12-2019-0380.

- [33] Yan W. et al. How does scholarly use of academic social networking sites differ by academic discipline? A case study using ResearchGate. *Information Processing & Management*. 2021. Vol.58(1). P.102430. DOI: 10.1016/j.ipm.2020.102430.
- [34] Janavi E., Nadi-Ravandi S., Batooli Z. Impact of ResearchGate on Increasing Citations and Usage Counts of Hot Papers in Clinical Medicine Indexed in Web of Science. *Webology*. 2020. Vol.17(1). P.130-139. DOI: 10.14704/WEB/V17I1/a212.
- [35] Dikshit A., Pradhan B., Santosh M. Artificial neural networks in drought prediction in the 21st century – A scientometric analysis. *Applied Soft Computing*. 2022. Vol.114. P.108080. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.108080.
- [36] Nemati-Anaraki L., Razmgir M., Moradzadeh M. Scientific impact of Iran University of Medical Sciences researchers in ResearchGate, Google Scholar, and Scopus: an altmetrics study. *Medical Journal of the Islamic Republic of Iran*. 2020. Vol.34. P.142. DOI: 10.47176/mjiri.34.142.
- [37] Boudry C., Durand-Barthez M. Use of author identifier services (ORCID, ResearcherID) and academic social networks (Academia. edu, ResearchGate) by the researchers of the University of Caen Normandy (France): A case study. *Plos one*. 2020. Vol.15(9). P.e0238583. DOI: 10.1371/journal.pone.0238583.
- [38] Sánchez-Jiménez R. et al. Analysis of the distribution of authorship by gender in scientific output: A global perspective. *Journal of Informetrics*. 2024. Vol.18(3). P.101556. DOI: 10.1016/j.joi.2024.101556.
- [39] Larivière V., Ni C., Gingras Y., Cronin B., Sugimoto C.R. Bibliometrics: Global gender disparities in science. *Nature*. 2013. Vol.504(7479). P.211-213. DOI: 10.1038/504211a.
- [40] Bornmann L., Mutz R., Daniel H.D. Are there better indices for evaluation purposes than the h index? A comparison of nine different variants of the h index using data from biomedicine. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2008. Vol.59(5). P.830-837. DOI: 10.1002/asi.20806.
- [41] Bornmann L., Daniel H.D. What do citation counts measure? A review of studies on citing behavior. *Journal of documentation*. 2008. Vol.64(1). P.45-80. DOI: 10.1108/00220410810844150.
- [42] Costas R., Zahedi Z., Wouters P. Do “altmetrics” correlate with citations? Extensive comparison of altmetric indicators with citations from a multidisciplinary perspective. *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2015. Vol.66(10). P.2003-2019. DOI: 10.1002/asi.23309.
- [43] Jalali Z.S., Introne J., Soundarajan S. Social stratification in networks: insights from co-authorship networks. *Journal of the Royal Society Interface*. 2023. Vol.20(198). P.20220555. DOI: 10.1098/rsif.2022.0555.
- [44] Xue H. Analysis of Effects on Scientific Impact Indicators Based on Coevolution of Coauthorship and Citation Networks. *Information*. 2024. Vol.15(10). P.597. DOI: 10.3390/info15100597.
- [45] Rivera R.G. et al. Using scientometrics to mapping Latin American research networks in emerging fields: the field networking index //Scientometrics. 2024. Vol. 129(4). P. 2309-2335. DOI: 10.1007/s11192-024-04970-z.
- [46] Waltman L. A review of the literature on citation impact indicators. *Journal of informetrics*. 2016. Vol.10(2). P.365-391. DOI:10.1016/j.joi.2016.02.007.
- [47] Mingers J., Leydesdorff L. A review of theory and practice in scientometrics. *European journal of operational research*. 2015. Vol.246(1). P.1-19. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.002.
- [48] Гуськов А.Е., Шрайберг Я.Л. Вызовы для развития наукометрических исследований. *Научные и технические библиотеки*. 2023. №2. P.37-58. DOI: 10.33186/1027-3689-2023-2-37-58.
- [49] Гуськов А.Е., Селиванова И.В., Косяков Д.В. Методика оценки результативности научных организаций. *Вестник Российской академии наук*. 2018. Т.88. №5. С.430-443. DOI: 10.7868/S0869587318050092.
- [50] Гуськов А.Е. Концептуальная модель системы наукометрического мониторинга результативности научной деятельности. *Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы*. 2022. № 12. С.14-22. DOI: 10.36535/0548-0027-2022-12-4.
- [51] Бобров Л.К. Управление знаниями в зеркале Российского индекса научного цитирования. *Вычислительные технологии*. 2021. №4(26). С.53-72. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.4.006.
- [52] Золотарев Д.В. Использование результатов фракционного счета научных статей при принятии управленческих решений. *Наука. Инновации. Образование*. 2016. Т.11. №1. С.105-114.
- [53] Лойко В.И., Луценко А.И., Орлов Е.В. Современные подходы в наукометрии: монография. Краснодар: КубГАУ, 2017. 532 с.
- [54] Маршакова-Шайкевич И.В. Научное сотрудничество России со странами ЕС: библиометрический анализ. *Вестник Российской академии наук*. 2010. Т.80. №2. С.124-130.
- [55] Мохначева Ю.В., Цветкова В.А. Россия в мировом массиве научных публикаций. *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т.89. №8. С.820-830. DOI: 10.31857/S0869-5873898820-830.
- [56] Гохберг Л.М., Сагиева Г.С. Российская наука: библиометрические индикаторы. *Форсайт*. 2007. №1. С.44-53. DOI: 10.17323/1995-459X.2007.1.44.53.
- [57] Печников А.А. Math-Net.Ru как зеркало академического рейтинга журналов RSCI. *Информационное общество*. 2024. №1. С.116-125.
- [58] Печников А.А. Исследование тематических сообществ графа соавторства российских математиков. *Научные и технические библиотеки*. 2025. №1. С.33-55. DOI: 10.33186/1027-3689-2025-1-33-55.
- [59] Писляков В.В. Самоцитирование и его влияние на оценку научной деятельности: обзор литературы. Часть II. *Научные и технические библиотеки*. 2022. №3. С.85-104. DOI: 10.33186/1027-3689-2022-3-85-104.
- [60] Мальцева Д.В., Ващенко В.А., Капустина Л.В. Методология обработки библиографических данных на русском языке для построения сетей коллаборации (на примере базы данных eLibrary). *Социология: 4М*. 2022. №54–55. С.45-78. DOI: 10.19181/4m.2022.31.1-2.2.
- [61] Новиков Д.А., Губко М.В. Наукометрия и экспертиза в управлении наукой: предисловие. *Управление большими системами. Специальный выпуск 44. Наукометрия и экспертиза в управлении наукой*, 2013. С.8-13.

- [62] **Fronzetti Colladon A., D'Angelo C. A., Gloor P. A.** Predicting the future success of scientific publications through social network and semantic analysis. *Scientometrics*. 2020. Vol.124(1). P.357-377. DOI: 10.1007/s11192-020-03479-5.
- [63] **Mejia C. et al.** Exploring topics in bibliometric research through citation networks and semantic analysis. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2021. Vol.6. P.742311. DOI: 10.3389/frma.2021.742311.
- [64] **Kunnath S.N. et al.** A meta-analysis of semantic classification of citations. *Quantitative science studies*. 2021. Vol.2(4). P.1170-1215. DOI: 10.1162/qss.a.00159.
- [65] **Nair S.R. et al.** Clustering of research documents-a survey on semantic analysis and keyword extraction. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. IEEE, 2021. P.1-6. DOI: 10.1109/I2CT51068.2021.9418197.
- [66] **Осинов Г.С., Смирнов И.В.** Семантический анализ научных текстов и их больших массивов. *Системы высокой доступности*. 2016. Т.12(1). С.41-44.
- [67] **Ениколопов С.Н., Кузнецова Ю.М., Осинов Г.С., Смирнов И.В., Чудова Н.В.** Метод реляционно-ситуационного анализа текста в психологических исследованиях. *Психология. Журнал Высшей школы экономики*. 2021. Т.18(4). С.748-769. DOI: 10.17323/1813-8918-2021-4-748-769.
- [68] **Sochenkov I., Zubarev D., Tikhomirov I., Smirnov I., Shelmanov A., Suvorov R., Osipov G.** Exactus Like: Plagiarism Detection in Scientific Texts. In: Ferro, N., et al. *Advances in Information Retrieval. ECIR 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. Vol.9626. P.837-840. DOI: 10.1007/978-3-319-30671-1_76.
- [69] **Osipov G., Smirnov I., Tikhomirov I., Sochenkov I., Shelmanov A.** Exactus expert—search and analytical engine for research and development support. *Novel Applications of Intelligent Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2016. P.269-285. DOI: 10.1007/978-3-319-14194-7_14.
- [70] **Efimenko I.V., Khoroshevsky V.F., Noyons E.C.M.** Anticipating Future Pathways of Science, Technologies, and Innovations: (Map of Science)² Approach // *Anticipating Future Innovation Pathways Through Large Data Analysis*. – Cham: Springer International Publishing, 2016. P.71-96. DOI: 10.1007/978-3-319-39056-7_5.
- [71] **Хорошевский В.Ф., Ефименко И.В.** Семантическая технология картирования семантических технологий (наукометрический анализ конференций OSTIS). Минск: БГУИР. 2015. С.43-56.
- [72] **Герасименко Н.А., Ватолин А.С., Янина А.О., Воронцов К.В.** SciRus: легкий и мощный мультязычный энкодер для научных текстов. *Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. 2024. Т.520. №2. С.216-227. DOI: 10.31857/S2686954324700589.
- [73] **Ватолин А.С., Герасименко Н.А., Янина А.О., Воронцов К.В.** RuSciBench: открытый бенчмарк для оценки семантических векторных представлений научных текстов на русском и английском языках. *Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. 2024. Т.520. №2. С.284-294. DOI: 10.31857/S2686954324700644.
- [74] **Chekhovich Y.V., Khazov A.V.** Analysis of duplicated publications in Russian journals. *Journal of informetrics*. 2022. Vol.16. №1. 101246. DOI: 10.1016/j.joi.2021.101246.
- [75] **Gritsay G. M. et al.** Artificially generated text fragments search in academic documents. *Doklady Mathematics*. Moscow: Pleiades Publishing, 2023. Vol.108. DOI: 10.1134/S1064562423701211.
- [76] **Meuschke N. et al.** A benchmark of pdf information extraction tools using a multi-task and multi-domain evaluation framework for academic documents. *International Conference on Information*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P.383-405. DOI: 10.1007/978-3-031-28032-0_31.
- [77] **Maddi A., Maisonnobe M., Boukacem-Zeghmouri C.** Geographical and disciplinary coverage of open access journals: OpenAlex, Scopus, and WoS. *PLoS One*. 2025. V.20. №4. DOI: 10.1371/journal.pone.0320347.
- [78] **Culbert J. H. et al.** Reference coverage analysis of OpenAlex compared to Web of Science and Scopus. *Scientometrics*. 2025. Vol.130. №4. P.2475-2492. DOI: 10.1007/s11192-025-05293-3.
- [79] **Subramanian S. et al.** S2and: A benchmark and evaluation system for author name disambiguation. *2021 ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL)*. IEEE, 2021. P.170-179. DOI: 10.1109/JCDL52503.2021.00029.
- [80] **Boccaletti S. et al.** The structure and dynamics of multilayer networks. *Physics reports*. 2014. Vol. 544. Issue 1. P.1-122. DOI: 10.1016/j.physrep.2014.07.001.
- [81] **Di Pierro D., Ferilli S., Redavid D.** LPG-based knowledge graphs: A survey, a proposal and current trends. *Information*. 2023. Vol.14. №3. DOI: 10.3390/info14030154.
- [82] **Rao S.X., Egger P.H., Zhang C.** Hierarchical classification of research fields in the "web of science" using deep learning // *arXiv preprint arXiv:2302.00390*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2302.00390.
- [83] **Губанов Д.А., Новиков Д.А.** Анализ терминологической структуры теории управления. *Управление большими системами*. 2024. вып.110. С.181-210. DOI: 10.25728/ubs.2024.110.7.
- [84] **Blei D.M., Ng A.Y., Jordan M.I.** Latent Dirichlet allocation. *Journal of machine Learning research*. 2003. Vol.3. P. 993-1022.
- [85] **Blei D.M.** Probabilistic Topic Models. *Communications of the ACM*. 2012. Vol.55, №4. P.77-84. DOI: 10.1145/2133806.2133826.
- [86] **Yau C. K. et al.** Clustering scientific documents with topic modeling. *Scientometrics*. 2014. Vol.100. №3. P.767-786. DOI: 10.1007/s11192-014-1321-8.
- [87] **Blei D.M., Lafferty J.D.** Dynamic Topic Models. *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. 2006. P.113-120. DOI: 10.1145/1143844.1143859.
- [88] **Beltagy I., Lo K., Cohan A.** SciBERT: A pretrained language model for scientific text // *arXiv preprint arXiv:1903.10676*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1903.10676.
- [89] **Grootendorst M.** BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure // *arXiv preprint arXiv:2203.05794*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2203.05794.

- [90] **Ebadi A., Auger A., Gauthier Y.** WISDOM: An AI-powered framework for emerging research detection using weak signal analysis and advanced topic modeling //arXiv preprint arXiv:2409.15340. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2409.15340.
- [91] **Rezapor R. et al.** Two-Stage Graph-Augmented Summarization of Scientific Documents. *Proceedings of the 1st Workshop on NLP for Science (NLP4Science)*. 2024. P.36-46. DOI: 10.18653/v1/2024.nlp4science-1.5.
- [92] **Kilicoglu H. et al.** Confirm or refute? A comparative study on citation sentiment classification in clinical research publications. *Journal of biomedical informatics*. 2019. Vol.91. 103123. DOI: 10.1016/j.jbi.2019.103123.
- [93] **Qi R. et al.** Multi-task learning model for citation intent classification in scientific publications. *Scientometrics*. 2023. Vol.128. №12. P.6335-6355. DOI: 10.1007/s11192-023-04858-4.
- [94] **Arnaout H. et al.** In-depth Research Impact Summarization through Fine-Grained Temporal Citation Analysis //arXiv preprint arXiv:2505.14838. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2505.14838.
- [95] **Li X. et al.** Evaluation of unsupervised static topic models' emergence detection ability. *PeerJ Computer Science*. 2025. Vol.11. DOI: 10.7717/peerj-cs.2875.
- [96] **Emsley R.** ChatGPT: these are not hallucinations—they're fabrications and falsifications. *Schizophrenia*. 2023. Vol.9. №1. DOI: 10.1038/s41537-023-00379-4.
- [97] **Vivek N. et al.** Social network analysis as a new tool to measure academic impact of physicians. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*. 2025. Vol.10. №1. DOI: 10.1002/lio2.70060.
- [98] **Fortunato S.** Community Detection in Graphs. *Physics Reports*. 2010. Vol.486. №3-5. P.75-174. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.11.002.
- [99] **Lü L., Zhou T.** Link Prediction in Complex Networks: A Survey // *Physica A*. 2011. Vol. 390, № 6. P. 1150-1170. DOI: 10.1016/j.physa.2010.11.027.
- [100] **Holme P., Saramäki J.** Temporal Networks. *Physics Reports*. 2012. Vol.519. P.97-125. DOI: 10.1016/j.physrep.2012.03.001.
- [101] **Chebotarev P.Yu., Gubanov D.A.** How to Choose the Most Appropriate Centrality Measure? A Decision-Tree Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Piscataway, N.J., United States: IEEE, 2024. DOI: 10.1109/TSMC.2024.3510633.
- [102] **Freeman L.C.** Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification. *Social Networks*. 1978. Vol.1. P.215-239. DOI: 10.1016/0378-8733(78)90021-7.
- [103] **Chkhartishvili A.G., Gubanov D.A.** Influence Levels of Users and Meta-Users of a Social Network. *Automation and Remote Control*. 2018. Vol.79, Iss.3. P.545-553. DOI: 10.1134/S0005117918030128.
- [104] **Reia S.M., Silva F.N., de Arruda H.F.** Science of Science: a complex network perspective. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2025. Vol.10. DOI: 10.3389/frma.2025.1595966.
- [105] **Miyauchi A., Kawase Y.** Z-score-based modularity for community detection in networks. *PloS one*. 2016. Vol.11. №1. DOI: 10.1371/journal.pone.0147805.
- [106] **Traag V.A., Waltman L., van Eck N.J.** From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*. 2019. Vol.9. 5233. DOI: 10.1038/s41598-019-41695-z.
- [107] **Губанов Д.А., Мельничук В.С.** Построение профилей научных публикаций на основе текстов и связей соавторства (на примере теории управления и ее приложений). *Проблемы управления*. 2025. №1. С.46-52.

Сведения об авторах



Губанов Дмитрий Алексеевич, 1984 г. рождения. Окончил Чувашский государственный университет в 2006 г., д.т.н. (2021). Ведущий научный сотрудник ИПУ РАН. В списке научных трудов 140 работ в области информационного влияния и управления в социальных сетях и анализа сложных сетей. ORCID: 0000-0002-0099-3386; Author ID (РИНЦ): 554667; Researcher ID (WoS): N-6957-2017; Author ID (Scopus): 51261227400. gubanov@ipu.ru.

Жилякова Людмила Юрьевна, 1970 г. рождения. Окончила Ростовский государственный университет в 1992 г., д.ф.-м.н. (2013). Ведущий научный сотрудник ИПУ РАН. В списке научных трудов более 150 работ в области динамических сетевых моделей, анализа взаимодействия гетерогенных агентов. ORCID: 0000-0002-8987-3777; Author ID (РИНЦ): 175735; Researcher ID (WoS): Q-6865-2016; Author ID (Scopus): 6508231167. zhilyakova@ipu.ru.



Кузнецов Олег Петрович, 1936 г. рождения. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова, философский факультет (1958), механико-математический факультет (1966). Доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ИПУ РАН. Автор более 170 публикаций, в том числе 4 монографий. AuthorID (РИНЦ): 24; Scopus Author ID: 36966033000; WoS ResearcherID J-5275-2018; ORCID 0000-0002-5061-3855. olpkuz@yandex.ru.



Чхартишвили Александр Гедewanович, 1970 г. рождения. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1991 г., д.ф.-м.н. (2006). Главный научный сотрудник ИПУ РАН. В списке научных трудов более 150 работ в области теории управления организационными системами, моделирования

информированности и рефлексии, моделирования информационного управления и противоборства, теории игр, социально-сетевого анализа. ORCID: 0000-0002-2970-1244; Author ID (РИНЦ): 12680; Researcher ID (WoS): M-7933-2013; Author ID (Scopus): 6506434827. *sandro_ch@mail.ru*.

Поступила в редакцию 17.09.2025, после рецензирования 16.10.2025. Принята к публикации 20.10.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-578-597

Methods and models for the analysis of scientific activity

© 2025, D.A. Gubanov, L.Yu. Zhilyakova✉, O.P. Kuznetsov, A.G. Chkhartishvili

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

Abstract

This article describes methods for analyzing scientific activity and the tools developed on their basis to support informed decision-making at all levels of management in the scientific domain — from individual researchers to the heads of research organizations. A review of domestic and international studies in the field of scientometrics is provided, highlighting key trends and identifying existing gaps that the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (ICS RAS) project seeks to address through the creation of an information system for the analysis of scientific activity. The project involves the development of models, methods, and algorithms for analyzing the scientific activity of researchers, organizations, journals, and conferences in the field of control theory, using publication data. This problem is approached through an interdisciplinary framework that integrates network analysis, ontological design, big data processing, machine learning techniques, and optimization methods. The proposed system is built upon an ontology of scientific knowledge in control theory, the main principles of its construction and structure being discussed in this article. Combined with the system's technological capabilities, the presented ontology enables a level of analytical detail that surpasses existing scientometric systems (such as Web of Science, Scopus, Russian Science Citation Index, etc). It is demonstrated that the principles underlying the development and structure of the proposed ontology can be applied to other research domains. The paper also considers modern approaches to data collection and visualization, as well as methods of network and content analysis of scientific texts. The main concepts, methods, and models for the analysis of scientific activity are summarized, and their implementation within the developed information system is discussed.

Keywords: *analysis of scientific activity, control theory, information system, classification, ontology, thematic profile, thematic space, term, text processing, network analysis.*

For citation: *Gubanov DA, Zhilyakova LYu, Kuznetsov OP, Chkhartishvili AG. Methods and models for the analysis of scientific activity [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 578-597. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-578-597.*

Authors' contributions: *Gubanov DA* – section 3, list of references; *Zhilyakova LYu* – article structure, introduction, section 1, list of references, conclusion; *Kuznetsov OP* – introduction, section 2; *Chkhartishvili AG* – section 4, article editing.

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

List of figures

Figure 1 – Fragment of the ontology of the thematic space (rectangles represent topics and subtopics, leaves represent terms)

References

- [1] *Kosyakov D, Pislyakov V*. “I’d like to publish in Q1, but there’s no Q1 to be found”: Study of journal quartile distributions across subject categories and topics. *Journal of Informetrics*. 2024; 18(1): 101494. DOI: 10.1016/j.joi.2024.101494.

- [2] GOST 7.90 2007. System of standards on information, librarianship and publishing. Universal decimal classification. Structure, rules of introduction and indexing: official publication. [In Russian].
- [3] Mathematics Subject Classification (MSC2020). <https://mathscinet.ams.org/mathscinet/msc/msc2020.html>.
- [4] Physics and Astronomy Classification Scheme. https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf.
- [5] International Classification Codes (OECD). https://storage.tusur.ru/files/134958/kody_OECD.pdf.
- [6] **Gubanov DA, Kuznetsov OP, Kurako EA. et al.** ISASA: An Information System for the Analysis of Scientific Activity in the Field of Control Theory and Its Applications [In Russian]. *Control Sciences*, 2024; 3: 35–55. DOI: 10.25728/cs.2024.3.4.
- [7] **Kuznetsov OP, Sukhoverov VS.** Ontological approach to determining the subject matter of scientific text [In Russian]. *Ontology of designing*, 2016; 6(1): 55–66. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-1-55-66.
- [8] **Agaev RP, Aleskerov FT, Alchinov AI. et al.** Control Theory: Dictionary of the System of Basic Concepts [In Russian] Moscow: LENAND, 2024. 128 p.
- [9] State index of scientific and technical information [In Russian]. <https://www.gpntb.ru/grnti.html>.
- [10] **Fortunato S, Bergstrom CT, Börner K, Evans JA, Helbing D, Milojević S, ... & Barabási AL.** Science of science. *Science*. 2018; 359(6379): eaao0185. DOI: 10.1126/science.aao0185.
- [11] **Gates AJ, Barabási AL.** Reproducible science of science at scale: pySciSci. *Quantitative Science Studies*. 2023; 4(3): 700–710. DOI: 10.1162/qss.a.00260.
- [12] **Nalimov VV, Mulchenko ZM.** Scientometrics. Study of the development of science as an information process [In Russian]. Moscow: Nauka, 1969. 192 p.
- [13] **Granovsky YV.** Is It Possible to Measure Science? V.V. Nalimov's Research in Scientometrics. *Scientometrics*. 2001; 52: 127–150. DOI: 10.1023/A:1017991017982.
- [14] **Barabási AL, Albert R.** Emergence of scaling in random networks. *Science*. 1999; 286(5439): 509–512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.
- [15] **Watts DJ, Strogatz SH.** Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*. 1998; 393(6684): 440–442. DOI: 10.1038/30918.
- [16] **Girvan M, Newman MEJ.** Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the national academy of sciences*. 2002; 99(12): 7821–7826. DOI: 10.1073/pnas.122653799.
- [17] **Molontay R, Nagy M.** Twenty years of network science: A bibliographic and co-authorship network analysis // Big data and social media analytics: trending applications. Cham: Springer International Publishing, 2021. P.1–24. DOI: 10.1007/978-3-030-67044-3_1.
- [18] **Costa LDF, Rodrigues FA, Travieso G, Villas Boas PR.** Characterization of complex networks: A survey of measurements. *Advances in physics*. 2007; 56(1): 167–242. DOI: 10.1080/00018730601170527.
- [19] **Saxena A, Iyengar S.** Centrality measures in complex networks: A survey // arXiv preprint arXiv:2011.07190. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2011.07190.
- [20] **Dias A, Ruthes S, Lima L, Campa E, Silva M, Bragança de Sousa M, Porto G.** Network centrality analysis in management and accounting sciences. *RAUSP Management Journal*. 2020; 55: 207–226. DOI: 10.1108/RAUSP-02-2019-0021.
- [21] **D'Ippoliti C.** “Many-Citedness”: Citations Measure More Than Just Scientific Quality. *Journal of Economic Surveys*. 2021; 35(5): 1271–1301. DOI: 10.1111/joes.12416.
- [22] **Lancichinetti A, Fortunato S.** Consensus clustering in complex networks. *Scientific reports*. 2012; 2(1): 336. DOI: 10.1038/srep00336.
- [23] **Ozcan S, Boye D, Arsenyan J, Trott P.** A scientometric exploration of crowdsourcing: Research clusters and applications. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2020; 69(6): 3023–3037. DOI: 10.1109/TEM.2020.3027973.
- [24] **Lund B, Ma J.** A review of cluster analysis techniques and their uses in library and information science research: *k*-means and *k*-medoids clustering. *Performance Measurement and Metrics*. 2021; 22(3): 161–173. DOI: 10.1108/PMM-05-2021-0026.
- [25] **Madani F.** ‘Technology Mining’ bibliometrics analysis: applying network analysis and cluster analysis. *Scientometrics*. 2015; 105(1): 323–335. DOI: 10.1007/s11192-015-1685-4.
- [26] **McLaren CD, Bruner MW.** Citation network analysis. *International Review of Sport and Exercise Psychology*. 2022; 15(1): 179–198. DOI: 10.1080/1750984X.2021.1989705.
- [27] **Yang S, Wang F.** Visualizing information science: Author direct citation analysis in China and around the world. *Journal of Informetrics*. 2015; 9(1): 208–225. DOI: 10.1016/j.joi.2015.01.001.
- [28] **Busygina TV, Yuklyaevskaya AV.** A Scientometric Analysis of the Literature on the Topic “Academic Social Networks”. *Bibliosphere*. 2022; 3: 101–122. DOI: 10.20913/1815-3186-2022-3-101-122.
- [29] **Barabási AL. et al.** Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica A: Statistical mechanics and its applications*. 2002; 311(3–4): 590–614. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00736-7.
- [30] **Van Noorden R.** Online collaboration: Scientists and the social network. *Nature news*. 2014; 512(7513): 126–129. DOI: 10.1038/512126a.
- [31] **Valizadeh-Haghi S, Shahbodaghi A, Nasibi-Sis H.** ResearchGate social network: Opportunities and challenges. *Journal of Medical Library and Information Science*. 2021; 2: 1–6. DOI: 10.22037/jmlis.v2i.32545.
- [32] **Ebrahimzadeh S. et al.** Triggers and strategies related to the collaborative information-seeking behaviour of researchers in ResearchGate. *Online Information Review*. 2020; 44(5): 1077–1096. DOI: 10.1108/OIR-12-2019-0380.
- [33] **Yan W. et al.** How does scholarly use of academic social networking sites differ by academic discipline? A case study using ResearchGate. *Information Processing & Management*. 2021; 58(1): 102430. DOI: 10.1016/j.ipm.2020.102430.
- [34] **Janavi E, Nadi-Ravandi S, Batooli Z.** Impact of ResearchGate on Increasing Citations and Usage Counts of Hot Papers in Clinical Medicine Indexed in Web of Science. *Webology*. 2020; 17(1): 130–139. DOI: 10.14704/WEB/V17I1/a212.

- [35] **Dikshit A, Pradhan B, Santosh M.** Artificial neural networks in drought prediction in the 21st century – A scientometric analysis. *Applied Soft Computing*. 2022; 114: 108080. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.108080.
- [36] **Nemati-Anaraki L, Razmgir M, Moradzadeh M.** Scientific impact of Iran University of Medical Sciences researchers in ResearchGate, Google Scholar, and Scopus: an altmetrics study. *Medical Journal of the Islamic Republic of Iran*. 2020; 34: 142. DOI: 10.47176/mjiri.34.142.
- [37] **Boudry C, Durand-Barthez M.** Use of author identifier services (ORCID, ResearcherID) and academic social networks (Academia.edu, ResearchGate) by the researchers of the University of Caen Normandy (France): A case study. *Plos one*. 2020; 15(9): e0238583. DOI: 10.1371/journal.pone.0238583.
- [38] **Sánchez-Jiménez R. et al.** Analysis of the distribution of authorship by gender in scientific output: A global perspective. *Journal of Informetrics*. 2024; 18(3): 101556. DOI: 10.1016/j.joi.2024.101556.
- [39] **Larivière V, Ni C, Gingras Y, Cronin B, Sugimoto CR.** Bibliometrics: Global gender disparities in science. *Nature*. 2013; 504(7479): 211-213. DOI: 10.1038/504211a.
- [40] **Bornmann L, Mutz R, Daniel HD.** Are there better indices for evaluation purposes than the h index? A comparison of nine different variants of the h index using data from biomedicine. *Journal of the American Society for Information Science and technology*. 2008; 59(5): 830-837. DOI: 10.1002/asi.20806
- [41] **Bornmann L, Daniel HD.** What do citation counts measure? A review of studies on citing behavior. *Journal of documentation*. 2008; 64(1): 45-80. DOI: 10.1108/00220410810844150
- [42] **Costas R, Zahedi Z, Wouters P.** Do “altmetrics” correlate with citations? Extensive comparison of altmetric indicators with citations from a multidisciplinary perspective. *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2015; 66(10): 2003-2019. DOI: 10.1002/asi.23309.
- [43] **Jalali ZS, Introne J, Soundarajan S.** Social stratification in networks: insights from co-authorship networks. *Journal of the Royal Society Interface*. 2023; 20(198): 20220555. DOI: 10.1098/rsif.2022.0555.
- [44] **Xue H.** Analysis of Effects on Scientific Impact Indicators Based on Coevolution of Coauthorship and Citation Networks. *Information*. 2024; 15(10): 597. DOI: 10.3390/info15100597.
- [45] **Rivera RG. et al.** Using scientometrics to mapping Latin American research networks in emerging fields: the field networking index. *Scientometrics*. 2024; 129(4): 2309-2335. DOI: 10.1007/s11192-024-04970-z.
- [46] **Waltman L.** A review of the literature on citation impact indicators. *Journal of informetrics*. 2016; 10(2): 365-391. DOI: 10.1016/j.joi.2016.02.007.
- [47] **Mingers J, Leydesdorff L.** A review of theory and practice in scientometrics. *European journal of operational research*. 2015; 246(1): 1-19. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.002.
- [48] **Guskov AE, Shrayberg YaL.** Challenges to develop scientometric studies [In Russian]. *Scientific and Technical Libraries*. 2023;(2):37-58. DOI: 10.33186/1027-3689-2023-2-37-58.
- [49] **Guskov AE, Selivanova IV, Kosyakov DV.** Methodology for assessing the performance of scientific organizations [In Russian]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2018; 88(5): 430-443. DOI: 10.7868/S0869587318050092.
- [50] **Guskov AE.** Conceptual model of the system of scientometric monitoring of the effectiveness of scientific activity [In Russian]. *Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems*. 2022; 12: 14-22. DOI: 10.36535/0548-0027-2022-12-4.
- [51] **Bobrov LK.** Knowledge management reflected in the Russian Science Citation Index [In Russian]. *Computational Technologies*. 2021; 4(26): 53-72. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.4.006.
- [52] **Zolotarev DV.** Using the results of fractional counting of scientific articles in making management decisions [In Russian]. *Science. Innovations. Education*. 2016; 11(1): 105-114.
- [53] **Loiko VI, Lutsenko AI, Orlov EV.** Modern approaches in scientometrics: monograph [In Russian]. Krasnodar: KubSAU, 2017. 532 p.
- [54] **Marshakova-Shaikov IV.** Scientific cooperation between Russia and EU countries: a bibliometric analysis [In Russian]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 80(2): 124-130.
- [55] **Mokhnacheva YuV, Tsvetkova VA.** Russia in the global array of scientific publications [In Russian]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 89(8): 820-830. DOI: 10.31857/S0869-5873898820-830.
- [56] **Gokhberg L, Sagieva G.** Russian Science: Bibliometric Indicators [In Russian]. *Foresight and STI Governance*. 2007; 1(1): 44-53. DOI: 10.17323/1995-459X.2007.1.44.53.
- [57] **Pechnikov AA.** Math-Net.Ru as a mirror of the academic ranking of RSCI journals [In Russian]. *Information Society*. 2024; 1: 116-125.
- [58] **Pechnikov AA.** The study of thematic communities within the Russian mathematicians co-authorship graphs [In Russian]. *Scientific and Technical Libraries*. 2025; (1): 33-55. DOI: 10.33186/1027-3689-2025-1-33-55.
- [59] **Pislyakov VV.** Self-citation and its impact on research evaluation: Literature review. Part II. *Scientific and Technical Libraries* [In Russian]. 2022;(3):85-104. DOI: 10.33186/1027-3689-2022-3-85-104.
- [60] **Maltseva DV, Vaschenko VA, Kapustina LV.** Methodology for processing Russian-language bibliographic data for building collaboration networks (based on the eLibrary database) [In Russian]. *Sociology: 4M*. 2022; 54-55: 45-78. DOI: 10.19181/4m.2022.31.1-2.2.
- [61] **Novikov DA, Gubko MV.** Scientometrics and Expertise in Science Management: Preface [In Russian]. *Management of Large Systems. Special Issue 44. Scientometrics and Expertise in Science Management*, 2013. P.8-13.
- [62] **Fronzetti Colladon A, D'Angelo CA, Gloor PA.** Predicting the future success of scientific publications through social network and semantic analysis. *Scientometrics*. 2020; 124(1): 357-377. DOI: 10.1007/s11192-020-03479-5.
- [63] **Mejia C. et al.** Exploring topics in bibliometric research through citation networks and semantic analysis. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2021; 6: 742311. DOI: 10.3389/frma.2021.742311.

- [64] **Kunnath SN. et al.** A meta-analysis of semantic classification of citations. *Quantitative science studies*. 2021; 2(4): 1170-1215. DOI: 10.1162/qss_a_00159.
- [65] **Nair SR. et al.** Clustering of research documents—a survey on semantic analysis and keyword extraction. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. IEEE, 2021. P.1-6. DOI: 10.1109/I2CT51068.2021.9418197.
- [66] **Osipov GS, Smirnov IV.** Semantic analysis of scientific texts and their large arrays [In Russian]. *Highly available systems*. 2016; 12(1): 41-44.
- [67] **Yenikolopov SN, Kuznetsova YuM, Osipov GS, Smirnov IV, Chudova NV.** The method of relational-situational text analysis in psychological research [In Russian]. *Psychology. Journal of the Higher School of Economics*. 2021; 18(4): 748-769. DOI: 10.17323/1813-8918-2021-4-748-769.
- [68] **Sochenkov I, Zubarev D, Tikhomirov I, Smirnov I, Shelmanov A, Suvorov R, & Osipov G.** Exactus Like: Plagiarism Detection in Scientific Texts. In: Ferro, N., et al. *Advances in Information Retrieval. ECIR 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. Vol. 9626. P. 837–840 DOI: 10.1007/978-3-319-30671-1_76.
- [69] **Osipov G, Smirnov I, Tikhomirov I, Sochenkov I, Shelmanov A.** Exactus expert—search and analytical engine for research and development support. *Novel Applications of Intelligent Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2016. P.269-285. DOI: 10.1007/978-3-319-14194-7_14.
- [70] **Efimenko IV, Khoroshevsky VF, Noyons ECM.** Anticipating Future Pathways of Science, Technologies, and Innovations:(Map of Science)² Approach. *Anticipating Future Innovation Pathways Through Large Data Analysis*. Cham: Springer International Publishing, 2016. P.71-96. DOI: 10.1007/978-3-319-39056-7_5.
- [71] **Khoroshevsky VF, Efimenko IV.** Semantic technology of mapping semantic technologies (scientometric analysis of OSTIS conferences) [In Russian]. Minsk: BSUIR. 2015. P.43-56.
- [72] **Gerasimenko N, Vatolin A, Ianina A. et al.** SciRus: Simple and Powerful Multilingual Encoder for Scientific Texts [In Russian]. *Dokl. Math.* 110 (Suppl 1), P.S193–S202. (2024). DOI: 10.1134/S1064562424602178
- [73] **Vatolin A, Gerasimenko N, Ianina A. et al.** RuSciBench: An Open Benchmark for Evaluating Semantic Vector Representations of Scientific texts in Russian and English [In Russian]. *Dokl. Math.* 110 (Suppl 1), P.S251–S260 (2024). DOI: 10.1134/S1064562424602191.
- [74] **Chekhovich YV, Khazov AV.** Analysis of duplicated publications in Russian journals. *Journal of informetrics*. 2022; 16(1): 101246. DOI: 10.1016/j.joi.2021.101246.
- [75] **Gritsay GM. et al.** Artificially generated text fragments search in academic documents. *Doklady Mathematics*. Moscow: Pleiades Publishing, 2023. Vol. 108. DOI: 10.1134/S1064562423701211.
- [76] **Meuschke N. et al.** A benchmark of pdf information extraction tools using a multi-task and multi-domain evaluation framework for academic documents. *International Conference on Information*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P.383-405. DOI: 10.1007/978-3-031-28032-0_31.
- [77] **Maddi A, Maisonnobe M, Boukacem-Zeghmouri C.** Geographical and disciplinary coverage of open access journals: Open-Alex, Scopus, and WoS. *PLoS One*. 2025; 20(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0320347.
- [78] **Culbert JH. et al.** Reference coverage analysis of OpenAlex compared to Web of Science and Scopus //Scientometrics. – 2025. – Vol. 130. – №. 4. – P. 2475-2492. DOI: 10.1007/s11192-025-05293-3
- [79] **Subramanian S. et al.** S2and: A benchmark and evaluation system for author name disambiguation. *2021 ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL)*. IEEE, 2021. P.170-179. DOI: 10.1109/JCDL52503.2021.00029.
- [80] **Boccaletti S. et al.** The structure and dynamics of multilayer networks. *Physics reports*. 2014; 544(1): 1-122. DOI: 10.1016/j.physrep.2014.07.001.
- [81] **Di Pierro D, Ferilli S, Redavid D.** LPG-based knowledge graphs: A survey, a proposal and current trends. *Information*. 2023; 14(3). DOI: 10.3390/info14030154.
- [82] **Rao SX, Egger PH, Zhang C.** Hierarchical classification of research fields in the " web of science" using deep learning //arXiv preprint arXiv:2302.00390. – 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2302.00390.
- [83] **Gubanov DA, Novikov DA.** Analysis of the terminological structure of control theory [In Russian]. *UBS*. 2024; 110: 181-210. DOI: 10.25728/ubs.2024.110.7.
- [84] **Blei DM, Ng AY, Jordan MI.** Latent Dirichlet allocation. *Journal of machine Learning research*. 2003; 3: 993-1022.
- [85] **Blei DM.** Probabilistic Topic Models. *Communications of the ACM*. 2012. Vol. 55(4). P. 77-84. DOI: 10.1145/2133806.2133826.
- [86] **Yau C. K. et al.** Clustering scientific documents with topic modeling. *Scientometrics*. 2014; 100(3): 767-786. DOI: 10.1007/s11192-014-1321-8.
- [87] **Blei DM, Lafferty JD.** Dynamic Topic Models. *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. 2006. P.113-120. DOI: 10.1145/1143844.1143859.
- [88] **Beltagy I, Lo K., Cohan A.** SciBERT: A pretrained language model for scientific text //arXiv preprint arXiv:1903.10676. – 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1903.10676.
- [89] **Grootendorst M.** BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure //arXiv preprint arXiv:2203.05794. – 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2203.05794.
- [90] **Ebadi A., Auger A., Gauthier Y.** WISDOM: An AI-powered framework for emerging research detection using weak signal analysis and advanced topic modeling //arXiv preprint arXiv:2409.15340. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2409.15340.
- [91] **Rezapour R. et al.** Two-Stage Graph-Augmented Summarization of Scientific Documents. *Proceedings of the 1st Workshop on NLP for Science (NLP4Science)*. 2024. P.36-46. DOI: 10.18653/v1/2024.nlp4science-1.5.
- [92] **Kilicoglu H. et al.** Confirm or refute? A comparative study on citation sentiment classification in clinical research publications. *Journal of biomedical informatics*. 2019; 91: 103123. DOI: 10.1016/j.jbi.2019.103123.

- [93] **Qi R. et al.** Multi-task learning model for citation intent classification in scientific publications. *Scientometrics*. 2023; 128(12): 6335-6355. DOI: 10.1007/s11192-023-04858-4.
- [94] **Arnaout H. et al.** In-depth Research Impact Summarization through Fine-Grained Temporal Citation Analysis //arXiv preprint arXiv:2505.14838. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2505.14838.
- [95] **Li X. et al.** Evaluation of unsupervised static topic models' emergence detection ability. *PeerJ Computer Science*. 2025; 11. DOI: 10.7717/peerj-cs.2875.
- [96] **Emsley R.** ChatGPT: these are not hallucinations—they're fabrications and falsifications. *Schizophrenia*. 2023; 9(1). DOI: 10.1038/s41537-023-00379-4.
- [97] **Vivek N. et al.** Social network analysis as a new tool to measure academic impact of physicians. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*. 2025; 10(1). DOI: 10.1002/lio2.70060.
- [98] **Fortunato S.** Community Detection in Graphs. *Physics Reports*. 2010; 486(3-5): 75-174. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.11.002.
- [99] **Lü L., Zhou T.** Link Prediction in Complex Networks: A Survey. *Physica A*. 2011; 390(6): 1150-1170. DOI: 10.1016/j.physa.2010.11.027.
- [100] **Holme P, Saramäki J.** Temporal Networks. *Physics Reports*. 2012; 519: 97-125. DOI: 10.1016/j.physrep.2012.03.001.
- [101] **Chebotarev PYu, Gubanov DA.** How to Choose the Most Appropriate Centrality Measure? A Decision-Tree Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Piscataway, N.J., United States: IEEE, 2024. DOI: 10.1109/TSMC.2024.3510633.
- [102] **Freeman LC.** Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification. *Social Networks*. 1978; 1: 215-239. DOI: 10.1016/0378-8733(78)90021-7.
- [103] **Chkhartishvili AG, Gubanov DA.** Influence Levels of Users and Meta-Users of a Social Network. *Automation and Remote Control*. 2018; 79(3): 545-553. DOI: 10.1134/S0005117918030128.
- [104] **Reia SM, Silva FN, de Arruda HF.** Science of Science: a complex network perspective. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2025; 10. DOI: 10.3389/frma.2025.1595966.
- [105] **Miyauchi A, Kawase Y.** Z-score-based modularity for community detection in networks. *PloS one*. 2016; 11(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0147805.
- [106] **Traag VA, Waltman L, van Eck NJ.** From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*. 2019; 9: 5233. DOI: 10.1038/s41598-019-41695-z.
- [107] **Gubanov DA, Melnichuk VS.** Constructing Scientific Publication Profiles Based on Texts and Coauthorship Connections (A Case Study in Control Theory and Its Applications) [In Russian]. *Control Sciences*, 2025; 1: 39-44.

About the authors

Dmitry Alekseevich Gubanov, (b. 1984) graduated from Chuvash State University in 2006, Dr. Sci. (2021). Leading Researcher at the V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. He is a co-author of more than 140 publications in the field of information influence and control in social networks, and the analysis of complex networks. ORCID: 0000-0002-0099-3386; Author ID (RSCI): 554667; Researcher ID (WoS): N-6957-2017\$ Author ID (Scopus): 51261227400. gubanov@ipu.ru.

Liudmila Yurjevna Zhilyakova, (b. 1970) graduated from Rostov State University in 1992, Dr. Phys.-Math. Sci. (2013). Leading Researcher at the V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. She is the author and a co-author of more than 150 publications in the field of dynamic network models, and analysis of interactions of heterogeneous agents. ORCID: 0000-0002-8987-3777; Author ID (RSCI): 175735; Researcher ID (WoS): Q-6865-2016; Author ID (Scopus): 6508231167. zhilyakova@ipu.ru.

Oleg Petrovich Kuznetsov (b.1936) graduated from Lomonosov Moscow State University, Faculty of Philosophy (1958), Faculty of Mechanics and Mathematics (1966). He is a Doctor of Technical Sciences, a professor, and a Chief Researcher at the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. He is the author of more than 170 publications, including 4 monographs. Author ID (RSCI): 24; Author ID (Scopus): 36966033000; Researcher ID (WoS) J-5275-2018; ORCID 0000-0002-5061-3855. olpkuz@yandex.ru.

Alexander Gedeonovich Chkhartishvili (b. 1970) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1991, Dr. Phys.-Math. Sci. (2006). Chief Researcher at the V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. He is a co-author of more than 150 publications in the field of theory of control in organizations, modeling of awareness and reflection, modeling of information control and confrontation, game theory, and social network analysis. ORCID: 0000-0002-2970-1244; Author ID (RSCI): 12680; Researcher ID (WoS): M-7933-2013; Author ID (Scopus): 6506434827. sandro_ch@mail.ru.

Received September 17, 2025. Revised October 16, 2025. Accepted October 20, 2025.



Рекомендательная система на основе обобщённого указателя журналов

© 2025, О.М. Атаева¹, Н.П. Тучкова¹✉, А.Г. Дегтев²

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

Аннотация

Рассматривается тематическая классификация журналов на примере «Белого списка» – Единого государственного перечня научных журналов. Ставится задача автоматизации анализа тематического направления журналов. Используется Государственный рубрикатор научно-технической информации (ГРНТИ), классификаторы: Универсальная десятичная классификация (УДК), *Mathematics Subject Classification (MSC)* и др., а также онтология семантической библиотеки предметных областей *SciLibRu*. На основе данных о журналах «Белого списка» и источников в библиотеке *SciLibRu* составляется обобщённый указатель, который включается в граф знаний *SciLibRu*. Пользователи библиотеки *SciLibRu* получают возможность навигации по разным аспектам информации о журналах (тематика, категория и др.), что упрощает выбор журнала для возможной публикации. Приводится пример поиска журнала, основанный на семантическом анализе статьи для определения её тематической принадлежности к предметной области журнала из «Белого списка». Сформированный обобщённый указатель в библиотеке *SciLibRu* позволяет задавать на естественном языке запросы, связанные с выбором издания для публикации. Предложенная методология может быть распространена на другие предметные области (данные о конференциях и др.). Практическая значимость исследования состоит в автоматизации подбора тематики журнала для подготовленной научной статьи.

Ключевые слова: белый список журналов, онтология предметной области, рекомендательная система, классификатор, обобщённый указатель журналов, семантическая библиотека.

Цитирование: Атаева О.М., Тучкова Н.П., Дегтев А.Г. Рекомендательная система на основе обобщённого указателя журналов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.598-613. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-598-613.

Финансирование: работа выполнена в рамках госзадания FFNG-2024-0003 по теме «Математические методы анализа данных и прогнозирования».

Вклад авторов: Атаева О.М. – обработка данных, подготовка примеров; Тучкова Н.П. – разработка структуры статьи, анализ источников; Дегтев А.Г. – подготовка примеров.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Тематический анализ научных публикаций – актуальное направление исследований, поскольку для составления обзоров и рецензий необходимо просматривать множество публикаций, чтобы найти тематически близкие. В связи с высокими требованиями к публикациям и конкуренцией в науке необходимо учитывать статус научных журналов (квартиль и другие наукометрические показатели). Актуальными становятся публикации в журналах Белого списка (БС), который планируется обновлять в реальном времени.

В данной работе предложен подход к *семантическому описанию* научных журналов БС и включение этих описаний в онтологию библиотеки *SciLibRu* для представления необходимой

информации в виде графа знаний (ГЗ) [1], где узлы представляют различные точки входа в указатель (логическую структуру) по этим данным. На базе объединённых данных формируется обобщённый (тематический) указатель (ОУ) журналов, который используется в качестве базы знаний (БЗ) рекомендательной системы. Данный подход позволяет определить с помощью навигации по ГЗ к каким предметным областям (ПрО) относится содержание научной работы и получить *список рекомендуемых журналов* из БС, наиболее близких по тематике этой работы. На основе предложенного ОУ разработана рекомендательная система, интегрированная в библиотеку *SciLibRu* и предоставляющая функцию подбора журнала, тематика которого наиболее соответствует содержанию рассматриваемой статьи. Практическая ценность предлагаемого решения заключается в упрощении и ускорении процесса выбора журнала для публикации за счёт использования знаний в ГЗ *SciLibRu*.

1 Постановка задачи

Поиск публикаций отличается от поиска журналов по многим признакам. Для поиска публикаций в библиографических базах и в библиотеках предлагается поиск по автору, названию, ключевым словам, индексу классификатора. Применение методов искусственного интеллекта расширило возможности поиска публикаций по тематическим признакам, признакам схожести, цитированию и другим связям [2, 3]. Поиск журналов связан с задачей выбора журнала для возможной публикации, который подходит тематически и соответствует некоторым показателям (специальностям Высшей аттестационной комиссии (ВАК) и др.). Тематика, квартиль, условия публикации, учитываются авторами в соответствии с индивидуальными потребностями. Классификацию по этим признакам можно сделать объективно на основе открытых данных, используя известные библиографические ресурсы (*scopus.com*, *www.webofscience.com*, *elibrary.ru*, *zbmath.org*, *mathnet.ru*, *cyberleninka.ru* и др.). В открытых и коммерческих разработках поля для поиска остаются такими же, как и для поиска публикаций: ключевые слова, названия, авторы, аннотации и полные тексты. Практика использования этих полей поиска без применения средств семантического анализа приводит к шуму в поисковой выдаче. Некоторые примеры таких ресурсов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Ресурсы тематического поиска журналов для публикации рукописи

№	Название	Тематический поиск	Доступ	Поля для поиска
1	<i>Master Journal List</i>	есть для английского языка / нет для РФ	платный	ISSN, название для журналов из коллекции <i>WoS</i>
2	<i>Elsevier Journal Finder</i>	есть для английского языка	бесплатный	данные рукописи (аннотация, ключевые слова, цель исследований), название журнала <i>Elsevier</i>
3	<i>Springer Journal Suggester</i>	есть для английского и немецкого языка	бесплатный	данные рукописи (название, аннотация, ключевые слова), название журнала <i>Springer</i>
4	<i>Wiley Journal Finder</i>	есть для английского языка	бесплатный	данные рукописи (название, аннотация) название журнала <i>Wiley</i>
5	<i>Web of Science Master Journal List</i>	есть для английского языка	бесплатный	данные рукописи (название, аннотация) название журнала из <i>WoS</i>
6	<i>Scopus</i>	есть для английского языка	бесплатный	выбор из тематического списка <i>Scopus</i> по типу изданий и квартилю
7	<i>Math-Net.Ru</i>	нет	бесплатный	название журнала из коллекции <i>Math-Net</i> по алфавиту или издательству
8	<i>eLibrary</i>	есть	бесплатный	тематика ГРНТИ, поля БС, <i>WoS</i> , <i>Scopus</i> , РИНЦ, а также квартиль, уровень, категория

После внедрения нейросети *SciRus-tiny* (разработана для семантического анализа научных текстов) [4] в библиотеке *eLibrary* (<https://www.elibrary.ru>) используется тематический поиск по верхнему уровню Государственного рубрикатора научно-технической информации (ГРНТИ). Журнал может быть отнесён к нескольким рубрикам. Отдельно в списке рубрик выделены мультидисциплинарные журналы. Внутри тематической рубрики можно указать поля БС, *WoS*, *Scopus*, РИНЦ, а также квантиль, уровень, категорию.

Из таблицы 1 видно, что библиотека *eLibrary* предоставляет поисковые поля для выбора журнала по тематике и другим признакам, а также сервис для сравнения журналов по показателям из списка *eLibrary*, но нет поиска журнала для предполагаемой публикации.

В данной статье предлагается семантическое описание журналов БС включить в онтологию и ГЗ библиотеки ПрО *SciLibRu* и создать набор данных с тематическим разбиением. Поиск по журналам можно провести как навигацию по ГЗ с целью подбора журнала, ПрО которого наиболее близка для предполагаемой публикации (рисунок 1). Для этого предлагается применить большие языковые модели (БЯМ) для обращения к ГЗ БС.

Для формирования ОУ сведения о журналах БС разделяются на тематические кластеры, при этом каждый журнал связывается с классификаторами: Универсальной десятичной классификации (УДК), *Mathematics Subject Classification (MSC)*, БСК и онтологией *SciLibRu*. ОУ представлен в виде ГЗ, где узлы ГЗ – это точки входа ОУ. Для такого разделения используются алгоритмы автоматической классификации объектов (ААКО), которые обучаются на данных БС и *SciLibRu*.

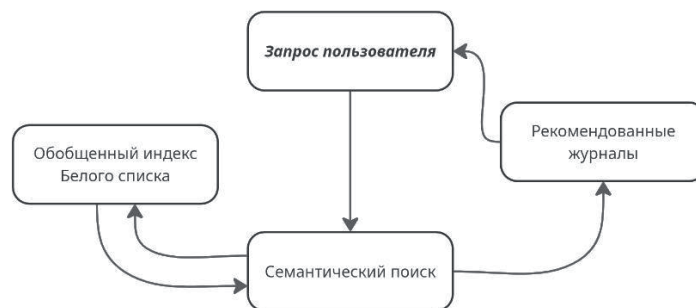


Рисунок 1 – Схема подбора журнала из *SciLibRu* для предполагаемой публикации

2 Семантическое описание журналов и их интеграция в онтологию *SciLibRu*

2.1 Библиотека *SciLibRu*

Для интеграции семантических образов журналов применяются методы онтологического проектирования [5-8] и их представление в виде ГЗ в библиотеке *SciLibRu* (ранее – проект *LibMeta*) [9], в которой используется технология описания ПрО научных журналов [10]. В библиотеке содержатся энциклопедии, тезаурусы, классификаторы и др., семантически связанные в *SciLibRu* [11]. На рисунке 2 показан пример поэтапного расширения ПрО «Математика» в *LibMeta*, когда в библиотеку добавляются данные об источниках (статьях журнала «Механика композиционных материалов и конструкций» (МКМК), <https://iampress.ru/>).

На разных этапах добавляются тематические разделы, термины и данные в виде публикаций. Онтологическое описание этих источников образует единый ГЗ, где понятия и объекты из разных источников семантически связаны между собой [9-12].

Известные системы рекомендаций включают совместную фильтрацию и рекомендации на основе содержания [13, 14] с использованием средств коммуникации с объектами, предназначенными для выбора (списки, изображения и т.д.). В данной работе выбор предлагается осуществлять с помощью навигации по ГЗ БС, а результат представляется в виде списка с обоснованием рекомендаций (рисунок 3).

Этап 1 Без классификации по подразделам	Предметная область "Математика"				
	Тезаурус "Математическая энциклопедия"				
Этап 2 Классификация и выделение подразделов	Классификаторы				
	MSC		УДК		ГРНТИ
	Подпространства предметной области "Математика"				
	Дифференциальные уравнения	Математическая физика	Вычислительная математика	Математическое моделирование	...
Этап 3 Выделение терминов для подразделов	Тезаурусы и словари подпространств предметной области "Математика"				
	Тезаурус ОДУ	Словарь спец функций	Словарь уравнений смешанного типа	Словарь механики сплошной среды	Словарь механики композитов
	Словарь фуллерены	Словарь наннотрубки	Словарь полимерных композитов		...
	Источники данных				
Этап 4 Классификация источников данных и обогащение описания предметной области	Неструктурированные			Структурированные	
	Журналы	Публикации	...	Репозитории	Mathnet

Рисунок 2 - Этапы расширения предметной области «Математика» на примере журнала МКМК (ОДУ - обыкновенные дифференциальные уравнения, Mathnet - Общероссийский портал Math-Net.Ru)

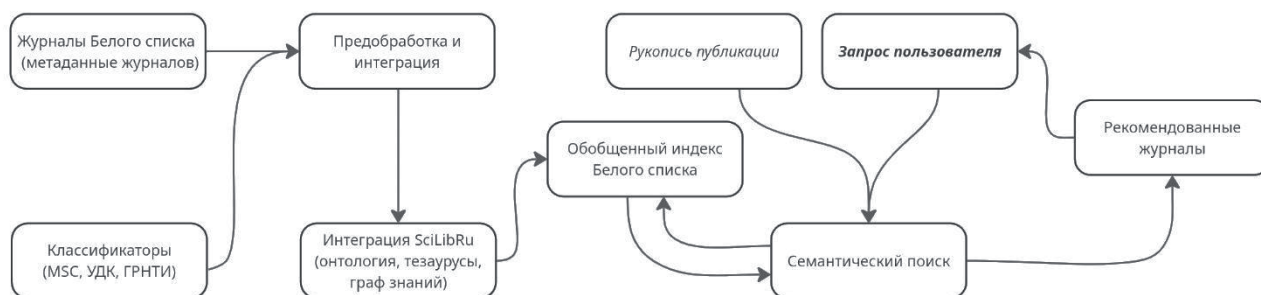


Рисунок 3 - Схема предлагаемого метода: интеграция данных БС и источников знаний в ОУ на базе ГЗ SciLibRu и использование ОУ для рекомендации журналов по пользовательскому запросу

Семантические описания журналов БС интегрированы в онтологию *SciLibRu*, встроены в ГЗ *SciLibRu* после предобработки и распределены по ПрО. Рукопись статьи проходит предобработку (семантическое сжатие текста) для выявления структуры текста, ключевых слов и связей с онтологией *SciLibRu*. Полученные связи позволяют обратиться к ГЗ *SciLibRu* и затем к ГЗ БС, чтобы получить список рекомендаций, близких к тематике рукописи журналов.

2.2 Интеграция семантических образов журналов в библиотеке *SciLibRu*

Интеграция БС в *SciLibRu* включает *предобработку данных* и *доставление онтологии SciLibRu* и ГЗ *SciLibRu*. Для построения ОУ научных журналов БС в *SciLibRu* используются сведения из открытых массивов научных данных: систем *OpenAlex* (данные на английском языке) и портала ВИНТИ (данные русским языком):

- метаданные журналов БС, которые содержат идентификаторы ISSN, ключевые слова (понятия ПрО) и наукометрические данные журналов (из *OpenAlex*);
- данные иерархических классификаторов (ГРНТИ, УДК, *MSC*), а также таблицы соответствия между ними (дополнительные сопоставления ВИНТИ).

Набор данных ГРНТИ использовался на русском и английском языках с автоматическим переводом. Кроме названия журнала в источниках представлены короткие описания основных понятий, соответствующих тематикам, освещаемым в журнале.

2.2.1 Предобработка журналов Белого списка и данных ГРНТИ

Использованные сведения о журналах БС содержали около 29000 наименований журналов с базовыми метаданными (ISSN, издатель, категория и др.) и списками ключевых понятий (в сумме более 500.000 ключевых слов на английском языке). Эти списки были очищены и унифицированы (нормализованы лексически, переведены на единый язык) в процессе предобработки. В результате сформирована обучающая выборка для тематической классификации журналов. Предобработка данных включает следующие шаги.

- *Лингвистическая нормализация.* Все рубрики и ключевые слова ГРНТИ переведены на английский язык, чтобы сформировать единый одноязычный набор данных для обучения модели классификации. Оригинальные данные БС на английском языке дополнены переводами рубрик ГРНТИ для сопоставления.
- *Структурирование классификаторов.* Отраслевые классификаторы (ГРНТИ, УДК, MSC) представлены в виде иерархий с определённой структурой кодов. Использованы таблицы соответствия между классификаторами (например, какие коды УДК соответствуют рубрикам ГРНТИ), в т.ч. взятые из открытых источников (ВИНИТИ).
- *Формирование обучающего набора.* Для экспериментов по классификации журналов по темам выбраны 64 рубрики верхнего уровня ГРНТИ, каждая из которых рассматривается как класс (категория).
- *Составление текстового описания рубрик.* Для каждой рубрики верхнего уровня ГРНТИ собрано множество текстовых данных, описывающих эту рубрику. В это множество вошли названия и описания рубрик, а также тексты подразделов второго и третьего уровней ГРНТИ, связанные с данной рубрикой. Для удобства изложения эти тексты названы «ключевые фразы рубрики», полагая, что совокупность таких фраз описывает соответствующую область знаний (тематику рубрики журнала).
- *Дополнение пропусков.* Поскольку классификатор ГРНТИ заполнен неравномерно, для заполнения «пустых» или слабо описанных рубрик использовались данные из описаний соответствующих разделов УДК. Информация о соответствии рубрик ГРНТИ и УДК составлена на основе открытых данных ВИНИТИ, а также использованы ранее установленные в *LibMeta* связи между рубриками различных классификаторов [12].

В результате получен *итоговый набор данных*, включающий примерно 8000 ключевых фраз для 64 тематических рубрик верхнего уровня ГРНТИ. Этот корпус текстов стал основой для обучения модели автоматической классификации объектов (журналов) по тематикам.

На рисунке 4 приведена иллюстрация *распределения количества ключевых фраз* по рубрикам верхнего уровня ГРНТИ (каждый столбец гистограммы соответствует одной рубрике ГРНТИ). Видно, что класс распределения ключевых фраз неравномерен – присутствует *дисбаланс классов*. В данной задаче это проявляется в склонности модели «игнорировать» малочисленные классы и чаще предсказывать рубрики, для которых в обучении было много примеров. Чтобы компенсировать этот эффект, применено *взвешивание классов* [15-17] при обучении моделей: меньшим по объёму классам назначаются повышенные веса ошибки.

В результате предобработки сформирован набор данных, который был использован ААКО тематической классификации журналов БС по рубрикам ГРНТИ верхнего уровня.

2.2.2 Интеграция в граф знаний LibMeta

Согласно [10] для каждого нового источника БС данных создаётся модель ГЗ источника в виде онтологии, включающая журналы, как узлы, и их связи. Онтологическая модель *SciLibRu* *достроена*: введён новый тип объектов «Журнал» и определены типы связей для этого типа объектов.

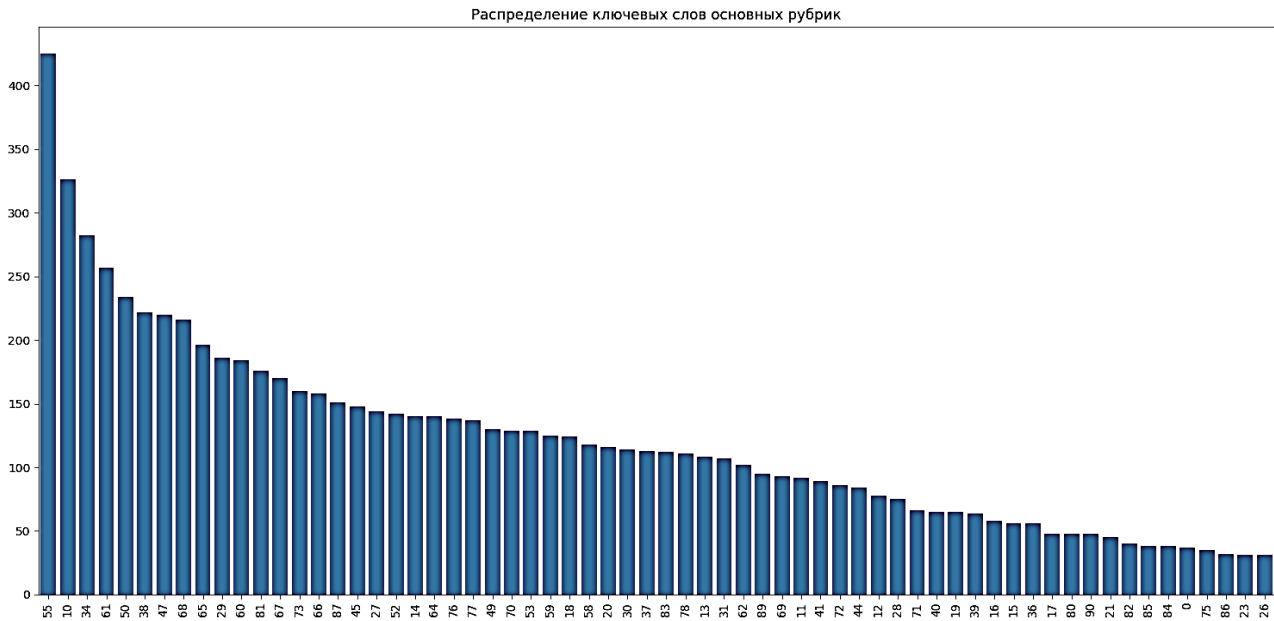


Рисунок 4 – Гистограмма распределения ключевых фраз по рубрикам верхнего уровня ГРНТИ

Для построения ГЗ БС формируются основные типы семантических связей:

- **Журнал ↔ Классификатор** – связь журнала с рубриками или категориями из внешних классификаторов (например, рубрика ГРНТИ, код УДК, или из списка ВАК);
- **Классификатор ↔ Классификатор** – взаимосвязи между классификационными системами (например, соответствие между рубрикой ГРНТИ и кодом MSC);
- **Ключевая фраза ↔ Журнал** – связь ключевого понятия (термина) с журналом, в котором это понятие присутствует как часть описания тематической области;
- **Ключевая фраза ↔ Классификатор** – связь понятий из онтологии *SciLibRu* с соответствующими рубриками классификаторов (например, термин из тезауруса, описывающий рубрику ГРНТИ);
- **Журнал ↔ Публикация** – связь между журналом и публикациями (статьями), включёнными в онтологию (данные о статьях из некоторых журналов загружены ранее [11]);
- **Публикация ↔ Ключевая фраза** – связь научной статьи с термином или ключевой фразой, обозначающей её тему (устанавливается при семантическом анализе текста статьи).

В *LibMeta* перечисленные связи были реализованы добавлением соответствующих *свойств и классов*. Таким образом, каждый журнал БС в ГЗ *SciLibRu* получил семантическое описание, включающее набор связей, отражающих все доступные тематические и предметные сведения о журнале: его рубрики ГРНТИ (по результатам классификации), связанные коды УДК и MSC (через сопоставления, установленные в *LibMeta* [13]), связи с существующими публикациями в *SciLibRu* (если таковые имеются по тем же тематикам), а также связи с терминологией библиотеки (ключевые слова из тезаурусов, энциклопедий и пр., если они совпадают или близки по смыслу к имеющимся в описании журнала).

Пример 1 показывает структуру фрагмента графа знаний БС и его связей в формате *RDF*, где журналы связаны с кодами ГРНТИ и *MSC* через свойства *hasClassification* и *hasMapping* (выполняется семантическое связывание данных при интеграции БС в *SciLibRu*).

```
Journal hasClassification GRNTI
GRNTI hasMapping MSC
Journal hasKeyword Keyword
Journal publishedIn Publisher
```

```

libmeta:journal/12345 rdf:type libmeta:Journal
libmeta:journal/12345 libmeta:issn "2313-1039"
libmeta:journal/12345 libmeta:title "Онтология проектирования"@ru
libmeta:journal/12345 libmeta:hasClassification libmeta:MSC_68
libmeta:journal/12345 libmeta:hasClassification libmeta:UDC_004
libmeta:UDC_004 skos:prefLabel "Информационные технологии..."@ru
libmeta:MSC_68 skos:prefLabel "Computer science"@en

```

Пример 2 показывает *SPARQL*-запрос для выборки журналов по теме «Информационные технологии» и связанных кодов *MSC* (ГЗ *SciLibRu* поддерживает тематический поиск через формальные семантические запросы).

```

SELECT ?journal ?title ?msc
WHERE {
  ?journal a libmeta:Journal ;
    libmeta:title ?title ;
    libmeta:hasClassification ?grnti .
  ?grnti skos:prefLabel "Информационные технологии"@ru ;
    libmeta:hasMapping ?msc .
  ?msc skos:prefLabel ?mscLabel .
}

```

Пример 3 показывает *SPARQL*-запрос, позволяющий находить журналы, одновременно имеющие связи с ГРНТИ и *MSC*, что обеспечивает перекрёстную навигацию между различными классификационными системами.

```

SELECT ?journal ?grnti_code ?msc_code
WHERE {
  ?journal a libmeta:Journal ;
    libmeta:hasClassification ?grnti, ?msc .
  ?grnti a libmeta:GRNTI .
  ?msc a libmeta:MSC .
  ?grnti libmeta:code ?grnti_code .
  ?msc libmeta:code ?msc_code .
}

```

Пример 4 показывает запрос на извлечение всех ключевых слов журналов, относящихся к конкретной рубрике ГРНТИ (в *SciLibRu* можно использовать ГЗ для анализа семантического поля журналов и расширения онтологических связей).

```

SELECT ?journal ?keyword
WHERE {
  ?journal a libmeta:Journal ;
    libmeta:hasClassification libmeta:GRNTI_27.35 ;
    libmeta:hasKeyword ?keyword .
}

```

Установление связей между классификаторами и терминами выполнено автоматически (на основе подготовленных таблиц соответствий и алгоритмического поиска совпадений) и с привлечением экспертов на этапе наполнения ГЗ для проверки и добавления недостающих связей. В результате получен ОУ, представленный в виде фрагмента ГЗ *SciLibRu*. Этот ОУ включает узлы «Журнал», связанные множеством семантических отношений с узлами «Рубрика ГРНТИ», «Код УДК», «Код *MSC*», «Термин ПрО» и др. ОУ является единым указателем по научным журналам, где каждая «точка входа» – это некоторый объект или признак, по которому можно производить поиск и навигацию (тематика, категория, ключевое слово, ISSN, квартиль и т.п.).

3 Обобщённый указатель для рекомендательной системы

Для формирования ОУ массив сведений о журналах разделён на тематические кластеры, при этом каждый журнал связан с классификаторами УДК, MSC и онтологией SciLibRu.

3.1 Методы

Для решения задачи классификации по темам (отнесение журнала к одной или нескольким рубрикам верхнего уровня ГРНТИ) применены алгоритмы машинного обучения [18, 19]. Векторизация входных текстовых данных (описаний рубрик и журналов) проведена с использованием моделей «мешок слов» и *TF-IDF*, распределённых семантических представлений (эмбедингов) слов и текстов – модели *Word2Vec*, *FastText* – и специализированной модели *SciRus-tiny* [4]. *SciRus-tiny* является нейросетевой моделью, обученной на корпусе научных текстов, и хорошо учитывает специфику научной лексики [20–22].

В результате экспериментов выбрана наилучшая комбинация метода векторизации [23] и классификатора по критерию качества классификации. В таблице 2 приведены сводные показатели качества (*F1*-мера) для 10 моделей-классификаторов в сочетании с тремя методами векторизации. Для сравнения приведены результаты базовой модели (*DummyClassifier*), которая всегда предсказывает наиболее частый класс.

Наивысшее качество классификации на тестовой выборке показала модель логистической регрессии [24] при использовании эмбедингов *SciRus-tiny* (*F1* ≈ 0.84). Эксперименты показали, что на новых данных БС векторы *SciRus*

Таблица 2 – Результаты применения алгоритмов автоматической классификации объектов (ААКО)

№	Модель ААКО	<i>Word2Vec</i>	<i>Fasttext</i>	<i>SciRus</i>
1	<i>DummyClassifier</i>	0.05	0.05	0.05
2	<i>KNN</i>	0.35	0.25	0.70
3	<i>SVC</i>	0.33	0.23	0.81
4	<i>DecisionTree</i>	0.42	0.31	0.55
5	<i>ExtraTreesClassifier</i>	0.51	0.41	0.78
6	<i>RandomForest</i>	0.52	0.42	0.78
7	<i>LogisticRegression</i>	0.40	0.38	0.84
8	<i>LGBMClassifier</i>	0.52	0.46	0.79
9	<i>XGBClassifier</i>	0.52	0.44	0.76
10	<i>CatBoostClassifier</i>	0.37	0.28	0.63

лучше «улавливают» смысл и часто соотносят запрос с подходящей рубрикой. В описаниях журналов встречается много новых (не представленных в обучении) ключевых фраз, которые не всегда правильно соотнесены с нужной рубрикой [25, 26]. Эмбединги журналов формируются на основе названий, аннотаций и списков ключевых слов, связанных с каждым журналом, а эмбединги рубрик ГРНТИ строятся по множеству *ключевых фраз* соответствующих рубрик, включающих общепринятые формулировки, расширенные пояснения, ассоциированные ключевые слова, переводные аналоги, которые обогащают исходный набор данных. Т.е. эти эмбединги строятся на разных исходных данных.

Чтобы оценить вклад этапа обогащения данных, проведён эксперимент, в котором выполнено сравнение качества классификации для двух вариантов подготовки данных: без обогащения, используя только исходные описания рубрик ГРНТИ; с обогащением, используя описания, дополненные данными из УДК и терминологией *SciLibRu*. Результаты сравнения приведены в таблице 3, где показаны основные метрики на тестовом наборе: точность, полнота и *F1*-мера. Видно, что без обогащения данных модель не смогла классифицировать некоторые рубрики из-за отсутствия по ним информации (только 58 из 64 рубрик имели обучающие данные). Это привело к низкой полноте (не предсказывались «пустые» классы) и снижению усреднённых метрик. После обогащения все 64 рубрики получили описания; ка-

чество классификации существенно улучшилось – выросла полнота по редким рубрикам, увеличилась средняя $F1$.

Обучение модели логистической регрессии на описанном наборе (~8000 текстов, размерность эмбединга 300) заняло нескольких минут. Объём данных сравнительно невелик, поэтому затраты памяти и времени не стали ограничивающим фактором. Формирование эмбедингов *SciRus-tiny* для всех ключевых фраз и описаний журналов выполнялась примерно 15–20 минут. Таким образом, разработанный подход к классификации может быть масштабирован на большее число классов или документов, не требуя значительных вычислительных ресурсов.

Таблица 3 – Влияние обогащения данных на качество тематической классификации

Модель <i>SciRus-tiny</i>	Доля рубрик с данными	Точность	Полнота	$F1$
Логистическая регрессия – без обогащения	58 из 64	0.80	0.60	0.68
Логистическая регрессия – с обогащением	64 из 64	0.90	0.85	0.88

3.2 Граф знаний и обобщённый указатель журналов Белого списка

В результате исследований получено тематическое разбиение журналов БС по рубрикам ГРНТИ. При моделировании учтены наукометрические показатели, указанные в описаниях БС. В библиотеке *SciLibRu* создан набор данных из описаний журналов, снабжённых связями с классификаторами, рубрикаторами и ПрО онтологии *SciLibRu*, по которому осуществляется навигация на основе представления в виде ГЗ журналов БС. Ключевые слова из аннотаций журналов дополнены ключевых слов из соответствующих статей энциклопедий, тезаурусов и другого содержания *SciLibRu*. Это позволило сделать тематическое разбиение БС более детальным. Это позволяет создать ОУ журналов с навигацией через узлы ГЗ журналов БС, которые указывают на тематические и наукометрические показатели журнала.

На рисунке 5 представлен пример сведений о журнале из БС, загруженном в библиотеку *SciLibRu*, с установленными семантическими связями, которые были выявлены в процессе семантического анализа.

ОУ включает связь журнала с рубрикой, полученной на основе обученной модели, и представляет собой часть ГЗ журналов БС, используемую на этапе рекомендаций.

Предлагаемый подход позволяет выполнять семантический поиск по ГЗ журналов и находить подходящие журналы, даже если в запросе пользователя не указаны точно те же слова, что и в описании журналов, поскольку ГЗ через связи и эмбединги найдёт близкие по смыслу совпадения.

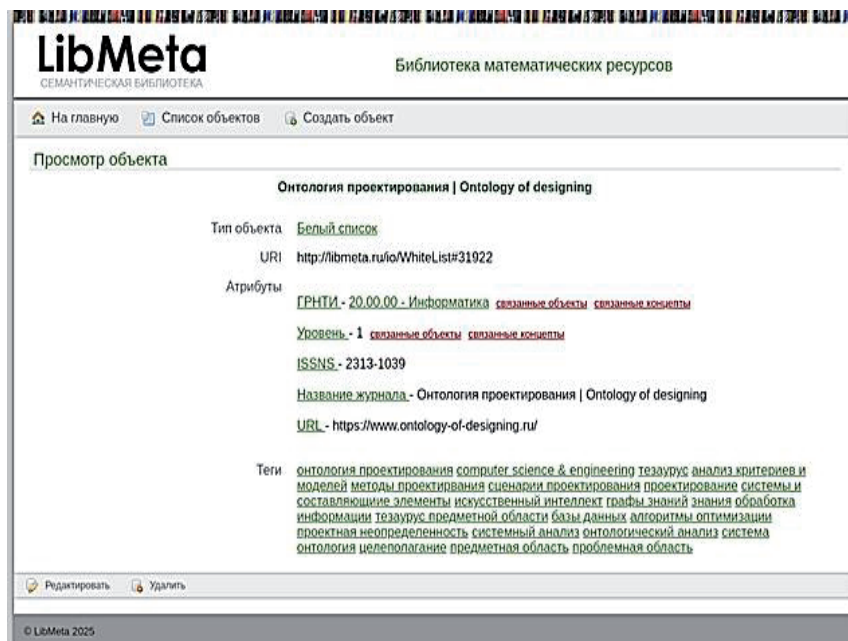


Рисунок 5 - Сведения о загруженном в библиотеку журнале Белого списка со связями

3.3 Пример использования обобщённого указателя

1) *Пользовательский запрос*. Пользователь формулирует запрос, содержащий предполагаемую тему научной работы (публикации), в свободной форме. Это может быть список ключевых слов или краткое описание. Цель запроса – определить, в каком журнале можно опубликовать (или найти для чтения) работу по данной теме. Например: «Где опубликовать работу на тему дифференциальные уравнения в приложениях?» или «Где искать публикации по теме дифференциальные уравнения в приложениях?» Такие запросы отражают ключевые понятия («дифференциальные уравнения», «приложения»), но не указывают прямо рубрику или название журнала.

2) *Семантический анализ запроса*. Поступивший запрос *очищается и нормализуется* (приводится к стандартной форме, устраняются стоп-слова, выполняется лемматизация ключевых терминов) и преобразуется в эмбединг тем же способом, который использовался при формировании эмбедингов описаний журналов и рубрик. В результате получается вектор, характеризующий семантическое содержание запроса.

3) *Поиск по семантической близости*. Выполняется основная часть рекомендации – сопоставление запроса с узлами ГЗ БС:

- вычисляется косинусное сходство между эмбедингом запроса и эмбедингами всех рубрик, осуществляется *сопоставление*, какой рубрике наиболее соответствует запрос;
- выбирается несколько рубрик с наибольшими значениями сходства (например, три наиболее близкие рубрики).

По каждой из выбранных рубрик из ГЗ БС извлекаются связанные журналы – те, которые были отнесены к данной рубрике (также можно добавить журналы, для которых косинусное сходство их эмбединга с эмбедингом запроса превышает заданный порог: если рубрика не совпала, это позволяет учесть случаи, когда журнал связан с близкой, но не точно совпадающей рубрикой).

4) *Формирование результата*. Пользователю отображается список найденных рубрик и соответствующих журналов, где заявленная тема представлена (или близка по смыслу). По каждому рекомендуемому журналу приводится основная информация: название, ISSN, тематические рубрики, а также ссылка на профиль журнала (в библиотеке *SciLibRu* или внешней системе, напр. *eLibrary*). *Обосновывается рекомендация*, т.е. указывается, почему этот журнал предложен (например, совпадение ключевых слов, высокая семантическая близость).

Использование ОУ позволяет найти информацию о подходящих журналах, даже если в запросе пользователя не упоминаются те же самые слова, что были использованы в описании журналов. Например, на запрос: «В каком журнале опубликовать статью с ключевыми словами *ontology design, semantic relationships, subject ontology, vector algorithms, knowledge graph*» пользователь получает в качестве ответа рубрику ГРНТИ «20.00.00 – Информатика» и перечень журналов данной тематики.

В случае ГЗ БС, интегрированного в библиотеку *SciLibRu*, язык запросов *SPARQL* используется для извлечения информации из графового представления данных (он представляет сложности для неподготовленного пользователя). Запрос на естественном языке составляет необходимое условие работы с данными ПрО. В [27] рассмотрено применение БЯМ к работе с ПрО математики в *SciLibRu* для автоматического формирования *SPARQL* запросов.

Можно показать, как на основе интеграции данных БС, ГРНТИ, УДК, *OpenAleph* в библиотеке *SciLibRu* выполнить поиск близкого по тематике журнала для возможной публикации рукописи на естественном языке. С этой целью проведено обогащение БС ключевыми словами (общая терминология, направления деятельности). Сформировано векторное представление обогащённого списка с использованием модели *SciRus*.

На рисунке 6 приведён пример визуализации запроса и ответов в векторном пространстве с использованием метода главных компонент [28]. В запросе: *knowledge graph, ontology, large language models* перечислены не только ключевые слова, но и тематика исследований. В ответ получен список журналов:

- 1) *Ontology of designing* – 0.91;
- 2) *Natural Language Processing Techniques* – 0.84;
- 3) *Logic, programming, and type systems* – 0.83;
- 4) *Topic Modeling* – 0.83;
- 5) *Advanced MIMO Systems Optimization* – 0.83;
- 6) *Handwritten Text Recognition Techniques* – 0.83,

где число указывает на степень близости эмбедингов запроса и журнала.

Близость запроса и ответов определяется на основе косинусного расстояния между запросом и результатами, который определяется выше некоторого порога k (на рисунке 6 $k=0.7$). Рисунок 6 сформирован автоматически путём преобразования эмбедингов журналов в пространство размерности 2. Метод главных компонент находит два направления (главные компоненты, оси для визуализации), вдоль которых данные имеют наибольшую изменчивость, т.е. сохраняет максимум информации из исходного набора векторов. Все объекты проецируются на две оси. Полученные координаты используются для построения точек на плоскости, где каждая точка соответствует журналу из БС. Близкие точки соответствуют семантически близким объектам (*крестики*). На рисунке 6 запрос помечен *звёздочкой*, а соответствующие ему близкие журналы – крестиками. Это представление векторизованных данных на плоскости позволяет получить представление о том, насколько связаны данные, а также насколько близки результаты к запросу и между собой. Видно, что *крестики* сгруппированы в одной зоне векторного пространства и близки к запросу (*звёздочке*). Иллюстрации на основе метода главных компонент позволяют качественно оценить достоверность полученных оценок близости эмбедингов запроса и журнала.

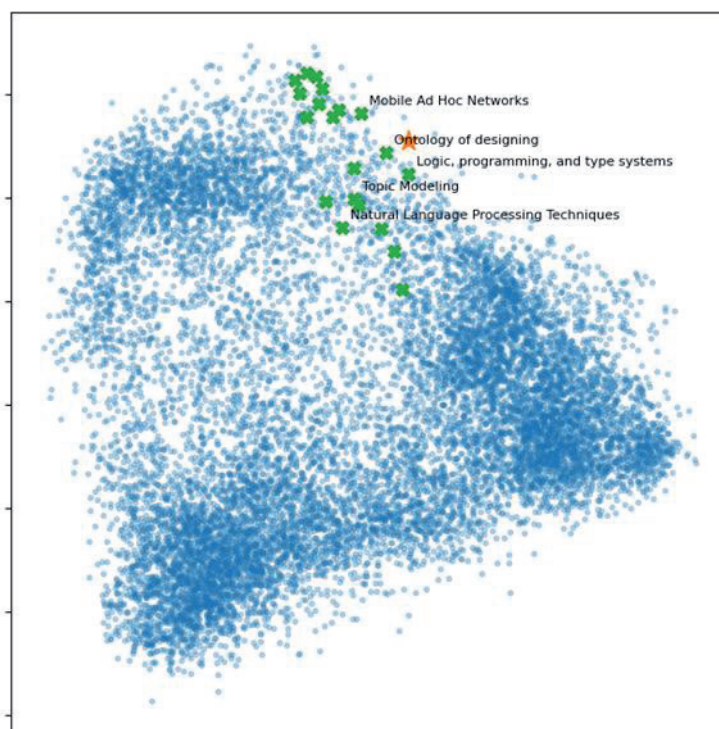


Рисунок 6 – Запрос: *knowledge graph, ontology, large language models* помечен звёздочкой. Результирующий список журналов, отмечен крестиками

4 Применение к другим областям знаний

Предложенная методика не привязана жёстко к сущности «журнал» онтологии *LibMeta* (*SciLibRu*) и может быть распространена на другие типы научных источников, например, «конференции». Если имеется аналогичный информационный ресурс, такой, как БС или реестр значимых конференций по различным ПрО, можно включить эти данные в онтологию *SciLibRu* согласно предложенной методике. Потребуется сформировать тематическое описа-

ние конференций (например, по ключевым словам из докладов, секциям и областям знаний, охватываемым конференцией), обучить модель классификации конференций по рубрикам ГРНТИ или иной рубрикации и построить ОУ конференций. В ГЗ *SciLibRu* появятся узлы «Конференция» со связями с темами и классификаторами, что даст возможность рекомендательной системе подбирать релевантные конференции для представления доклада.

Заключение

В работе предложен подход к интеграции и тематическому разбиению журналов с использованием методов онтологического моделирования и машинного обучения. На основе рубрикатора ГРНТИ и его соответствий с другими классификаторами сформирован ОУ для научных журналов из БС. В полученной онтологической модели информация о журналах (тематика, метрики, индексирование и пр.) связана семантическими отношениями, что обеспечивает несколько вариантов входа ОУ при поиске и навигации. Для автоматического отнесения журналов и публикаций к тематическим разделам применены методы обработки текстов: составлены тематические профили рубрик на основе ключевых фраз и на этих данных обучены ААКО. Эксперименты показали возможность классификации журналов по тематикам ГРНТИ с помощью ААКО, что объясняется использованием высокого уровня рубрикации и специальной обработки дисбаланса классов и использования профильных эмбедингов. Применение ГЗ для представления интегрированных данных о журналах позволяет создать рекомендательную систему, помогающую подобрать журнал для публикации. ГЗ обеспечивает навигацию по данным: пользователь может начать поиск с любой интересующей информации (тематика, ключевые слова статьи, наличие журнала в определённых базах, требуемый квартиль и др.) и получить набор релевантных изданий. Методы машинного обучения позволяют автоматизировать пополнение ГЗ новыми связями, определяя тематическую рубрику новой статьи или журнала, что снижает трудозатраты экспертов. Созданная рекомендательная система в сфере научных коммуникаций способна учитывать множество различных факторов, объяснять предложенные рекомендации и стать полезным инструментом для исследователей при планировании публикаций, облегчая выбор журнала.

Список источников

- [1] *Hogan A., Blomqvist E., Cochez M., et al.* Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021. Vol.54, No.4. Article 71. P.1–37. DOI: 10.1145/3447772.
- [2] *Schuemie M.J., Kors J.A. Jane*: Suggesting Journals, Finding Experts. *Bioinformatics*. 2008. Vol.24, No.5. P.727–728. DOI: 10.1093/bioinformatics/btn006.
- [3] *Kosmulski M.* Generalized g-index. *Scientometrics*. 2025. V.130. P.531–536. DOI: 10.1007/s11192-024-05221-x.
- [4] *Vatolin A., Gerasimenko N., Ianina A. et al.* RuSciBench: Open Benchmark for Russian and English Scientific Document Representations. *Dokl. Math.* 110 (Suppl 1), S251–S260 (2024). DOI: 10.1134/S1064562424602191.
- [5] *Елизаров А.М., и др.* Онтологии математического знания и рекомендательная система для коллекций физико-математических документов. *Доклады РАН*. 2016. Т.467. №4. С.392–395. DOI: 10.7868/S0869565216100042.
- [6] *Bravo M., Hoyos Reyes L.F., Reyes Ortiz J.A.* Methodology for ontology design and construction. *Contaduría y Administración*. 2019. Vol.64, No.4. e134. DOI: 10.22201/fca.24488410e.2020.2368.
- [7] *Елизаров А.М., Жильцов Н.Г., Иванов В.В., и др.* Семантический рекомендательный сервис в профессиональной деятельности математика. *Ученые записки Института социальных и гуманитарных знаний*. 2015. Вып.1(13). С.190–197.
- [8] *Nevzorova O., Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E.* OntoMathPRO ontology: a linked data hub for mathematics. *Communications in Computer and Information Science*. 2014. Vol.468. P.105–119. DOI: 10.1007/978-3-319-11716-4_9.

- [9] **Serebryakov V.A., Ataeva O.M.** Ontology-based approach to modeling of the subject domain “Mathematics” in the digital library. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2021. Vol.42, No.8. P.1920–1934. DOI: 10.1134/S199508022108028X.
- [10] **Ataeva O., Kornet Yu.N., Serebryakov V., and Tuchkova N.** Approach to creating a thesaurus and a knowledge graph of an applied subject area. *Lobachevskii J. of Mathematics*, 2023. Vol.44, No.7. P.2577–2586. DOI: 10.1134/S1995080223070077.
- [11] **Атаева О.М., Массель Л.В., Серебряков В.А., Тучкова Н.П.** Интеллектуальный анализ данных при построении графа знаний мультидисциплинарного журнала. *ИМТ*, 2024, № 3(35). С.5-19. DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.001.
- [12] **Ataeva O., Serebryakov V., Tuchkova N., Strebkov I.** Ontology and Knowledge Graph of Mathematical Physics in the Semantic Library MathSemanticLib. 26th International Conference, DAMDID/RCDL 2024, Nizhny Novgorod, Russia, October 23–25, 2024, Revised Selected Papers. CCIS 2641/ P.48-63, 2025.
- [13] **Kobyshev K., Voinov N., Nikiforov I.** Hybrid image recommendation algorithm combining content and collaborative filtering approaches. *Procedia Computer Science*, 2021, Vol.193. P.200-209, DOI: 10.1016/j.procs.2021.10.020.
- [14] **Shuting Zhang, Kechen Liu, Zekai Yu, Bowen Feng, Zijie Ou.** Hybrid recommendation system combining collaborative filtering and content-based recommendation with keyword extraction. *The 4th International Conference on Computing and Data Science (CONF-CDS 2022)* 2022, P. 927-939. DOI: 10.54254/2755-2721/2/20220579.
- [15] **Haibo H., Yang B., Edwardo G., Shutao L.** ADASYN: Adaptive Synthetic Sampling Approach for Imbalanced Learning. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 2008. P.1322-1328. DOI: 10.1109/IJCNN.2008.4633969.
- [16] **Chawla N.V. et al.** SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*. 2002. T.16. C.321-357. <https://arxiv.org/abs/1106.1813>.
- [17] **Johnson J.M., Khoshgoftaar T.M.** Survey on deep learning with class imbalance. *J Big Data*. 2019. Vol.6. P.1–54. DOI: 10.1186/s40537-019-0192-5.
- [18] **Shyrokykh K., Girnyk M., Dellmuth L.** Short text classification with machine learning in the social sciences: The case of climate change on Twitter. 2023. P.1–26. <https://arxiv.org/abs/2310.04452>.
- [19] **Gabi Goobar A., Regefalk D.** Classification of Short Text Messages Using Machine Learning. LU-CS-EX. 2020.
- [20] **Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J.** Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *Proc. of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2013.
- [21] **Feng X., Zhang H., Ren Y., et al.** The Deep Learning–Based Recommender System “Pubmender” for Choosing a Biomedical Publication Venue: Development and Validation Study. *Journal of Medical Internet Research*. 2019. Vol.21, No.5. P.e12957. DOI: 10.2196/12957.
- [22] **Liu C., Wang X., Liu H., et al.** Learning to recommend journals for submission based on embedding models. *Neurocomputing*. 2022. Vol.508. P.242–253. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.08.043.
- [23] **Bouaguel W., Benyounes N., Ben Ncir C.E.** Enhancing research publication choices: A comparative study of journal recommender systems and their effectiveness. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2024. Vol.11, No.5. P.217–229. DOI: 10.1109/ICCPCT.2016.7530304.
- [24] **Zhang J.-C., Zain A.M., Zhou K.-Q., et al.** A review of recommender systems based on knowledge graph embedding. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2024. Vol. 250. Issue C. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123876.
- [25] **Jurafsky D., Martin J.H.** Speech and Language Processing. Draft of January 12, 2025. <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/>.
- [26] **Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C.** “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proc. of the 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016. P.1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.293977.
- [27] **Будзко В.И., Атаева О.М., Тучкова Н.П.** Автоматизация доступа к информации при навигации по данным семантической библиотеки и интеграции графа знаний с языковой моделью. *Системы высокой доступности*. 2025. Т.21. №2. С.5–11. DOI: 10.18127/j20729472-202502-0.
- [28] **Greenacre M., Groenen P.J.F., Hastie T. et al.** Principal component analysis. *Nat Rev Methods Primers*. 2022. Article number: 100. DOI: 10.1038/s43586-022-00184-w.

Сведения об авторах

Атаева Ольга Муратовна – старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, к.т.н. (2020), окончила математический факультет Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова, специалист в области системного программирования, баз данных, инженерии знаний и онтологии. AuthorID (РИНЦ): 129291; ORCID: 0000-0003-0367-5575. oataeva@frccsc.ru.



Тучкова Наталья Павловна – старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, кандидат физ.-мат. наук (2004), окончила факультет высшей математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова. Специалист в области алгоритмических языков и информационных технологий. AuthorID (РИНЦ): 102162; Scopus Author ID: 15726569900. ORCID 0000-0001-5357-9640. ntuchkova@frccsc.ru. ✉



Дегтев Артём Геннадьевич (1995 г.р.), студент магистратуры Московского физико-технического института, направление «Науки о данных». AuthorID (РИНЦ): 1280137; ORCID: 0009-0006-6818-7782. Degtev_i_co@mail.ru.

Поступила в редакцию 15.09.2025, после рецензирования 24.10.2025. Принята к публикации 30.10.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-598-613

Recommendation system based on a generalized journal index

© 2025, O.M. Ataeva¹, N.P. Tuchkova¹✉, A.G. Degtev²

¹ Federal Research Center Informatics and Management of the Russian Academy of Sciences (FRC IM RAS), Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), MIPT, Dolgoprudny, Russia

Abstract

This paper explores the thematic classification of scientific journals using the example of the "White List"—the Unified State Register of Scientific Journals. The study aims to automate the analysis of journal thematic orientations. For this purpose, the State Rubricator of Scientific and Technical Information (SRSTI), classifiers such as the Universal Decimal Classification (UDC) and the Mathematics Subject Classification (MSC), as well as the ontology of the SciLibRu semantic library of subject domains, are utilized. Based on data from journals included in the "White List" and from sources within the SciLibRu library, a generalized index has been developed and integrated into the SciLibRu knowledge graph. This enables users of the SciLibRu library to navigate various journal attributes, such as subject area and category, thus facilitating the selection of appropriate publication venues. An example is provided of how semantic analysis of an article can be used to assess its thematic relevance to journals from the "White List." The generalized index incorporated into SciLibRu also allows users to formulate natural language queries to identify suitable journals for publication. The proposed methodology can be extended to other domains, such as conferences proceedings. The practical significance of the study lies in the automation of journal topic selection for scientific manuscripts.

Keywords: White List of journals, domain ontology, recommendation system, classifier, generalized journal index, semantic library.

For citation: Ataeva OM, Tuchkova NP, Degtev AG. Recommendation system based on a generalized journal index [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 598-613. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-598-613.

Funding: This work was completed as part of a state assignment FFNG-2024-0003 on the topic "Mathematical Methods of Data Analysis and Forecasting."

Authors' contributions: Ataeva O.M. – data processing, preparation of examples; Tuchkova N.P. – article structure development, source analysis; Degtev A.G. – preparation of examples.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Scheme for selecting a journal from SciLibRu for a prospective publication

Figure 2 – Stages of expanding the subject domain "Mathematics" using the example of «Mechanics of composite materials and structures» journal (ODE – ordinary differential equations, MathNet – All-Russian portal Math-Net.Ru)

Figure 3 – Diagram of the proposed method: integration of "White List" (WL) data and knowledge sources into the generalized index (GI) based on the SciLibRu knowledge graph (KG), and use of the generalized index for recommending journals according to a user query

Figure 4 – Histogram of the distribution of key phrases across top-level SRSTI categories

Figure 5 – Information about a "White List" journal uploaded to the library with its connections

Figure 6 – Query: *knowledge graph, ontology, large language models* marked with an asterisk. The resulting list of journals is indicated by crosses

Table 1 – Resources for thematic journal search for manuscript publication

Table 2 – Results of applying algorithms for automatic classification of objects (AACO)

Table 3 – Impact of data enrichment on the quality of thematic classification

References

- [1] **Hogan A, Blomqvist E, Cochez M, et al.** Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021; 54(4): Article 71. P.1–37. DOI: 10.1145/3447772.
- [2] **Schuemie MJ, Kors JA.** Jane: Suggesting Journals, Finding Experts. *Bioinformatics*. 2008; 24(5): 727–728. DOI: 10.1093/bioinformatics/btn006.
- [3] **Kosmulski M.** Generalized g-index. *Scientometrics*. 2025; 130: 531–536. DOI: 10.1007/s11192-024-05221-x.
- [4] **Vatolin A, Gerasimenko N, Ianina A, et al.** RuSciBench: Open Benchmark for Russian and English Scientific Document Representations. *Dokl. Math.* 110 (Suppl 1), S251–S260 (2024). DOI: 10.1134/S1064562424602191.
- [5] **Elizarov AM, et al.** Ontologies of mathematical knowledge and a recommendation system for collections of physical and mathematical documents [In Russian]. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 467(4): 392–395. DOI: 10.7868/S0869565216100042.
- [6] **Bravo M, Hoyos Reyes LF, Reyes Ortiz JA.** Methodology for ontology design and construction. *Contaduría y Administración*. 2019; 64(4): e134. DOI: 10.22201/fca.24488410e.2020.2368.
- [7] **Elizarov AM, Zhiltsov NG, Ivanov VV, et al.** Semantic recommendation service in the professional activity of a mathematician [In Russian]. *Scientific Notes of the Institute of Social and Humanitarian Knowledge*. 2015; 1(13): 190–197.
- [8] **Nevzorova O, Zhiltsov N, Kirillovich A, Lipachev E.** OntoMathPRO ontology: a linked data hub for mathematics. *Communications in Computer and Information Science*. 2014; 468: 105–119. DOI: 10.1007/978-3-319-11716-4_9.
- [9] **Serebryakov VA, Ataeva OM.** Ontology-based approach to modeling of the subject domain "Mathematics" in the digital library. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2021; 42(8): 1920–1934. DOI: 10.1134/S199508022108028X.
- [10] **Ataeva O, Kornet YuN, Serebryakov V, Tuchkova N.** Approach to creating a thesaurus and a knowledge graph of an applied subject area. *Lobachevskii J. of Mathematics*. 2023; 44(7): 2577–2586. DOI: 10.1134/S1995080223070077.
- [11] **Ataeva OM, Massel LV, Serebryakov VA, Tuchkova NP.** Intelligent data analysis in constructing a knowledge graph of a multidisciplinary journal [In Russian]. *IMT*. 2024; 3(35): 5-19. DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.001.
- [12] **Ataeva O, Serebryakov V, Tuchkova N, Strebkov I.** Ontology and Knowledge Graph of Mathematical Physics in the Semantic Library MathSemanticLib. 26th International Conference, DAMDID/RCDL 2024, Nizhny Novgorod, Russia, October 23–25, 2024, Revised Selected Papers. CCIS 2641, 2025. P.48-63,
- [13] **Kobyshev K, Voinov N, Nikiforov I.** Hybrid image recommendation algorithm combining content and collaborative filtering approaches. *Procedia Computer Science*, 2021; 193: 200-209, DOI: 10.1016/j.procs.2021.10.020.
- [14] **Zhang S, Liu K, Yu Z, Feng B, Ou Z.** Hybrid recommendation system combining collaborative filtering and content-based recommendation with keyword extraction. *The 4th International Conference on Computing and Data Science (CONF-CDS 2022)* 2022, P. 927-939. DOI: 10.54254/2755-2721/2/20220579.
- [15] **Haibo H, Yang B, Eduardo G, Shutao L.** ADASYN: Adaptive Synthetic Sampling Approach for Imbalanced Learning. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 2008. P.1322-1328. DOI: 10.1109/IJCNN.2008.4633969.

- [16] **Chawla NV, et al.** SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*. 2002; 16: 321-357. <https://arxiv.org/abs/1106.1813>.
- [17] **Johnson JM, Khoshgoftaar TM.** Survey on deep learning with class imbalance. *J Big Data*. 2019; 6, 27. DOI: 10.1186/s40537-019-0192-5.
- [18] **Shyrokykh K, Girnyk M, Dellmuth L.** Short text classification with machine learning in the social sciences: The case of climate change on Twitter. 2023. <https://arxiv.org/abs/2310.04452>.
- [19] **Gabi Goobar A, Regeffalk D.** Classification of Short Text Messages Using Machine Learning. LU-CS-EX. 2020.
- [20] **Mikolov T, Chen K, Corrado G, Dean J.** Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // Proc. of the International Conference on Learning Representations (ICLR). 2013.
- [21] **Feng X, Zhang H, Ren Y, et al.** The Deep Learning-Based Recommender System “Pubmender” for Choosing a Biomedical Publication Venue: Development and Validation Study. *Journal of Medical Internet Research*. 2019; 21(5): e12957. DOI: 10.2196/12957.
- [22] **Liu C, Wang X, Liu H, et al.** Learning to recommend journals for submission based on embedding models. *Neurocomputing*. 2022; 508: 242–253. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.08.043.
- [23] **Bouaguel W, Benyounes N, Ben Ncir CE.** Enhancing research publication choices: A comparative study of journal recommender systems and their effectiveness. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2024; 11(5): 217–229. DOI: 10.1109/ICCPCT.2016.7530304.
- [24] **Zhang J-C, Zain AM, Zhou K-Q, et al.** A review of recommender systems based on knowledge graph embedding. *Expert Systems with Applications*. 2024; 250(C). DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123876.
- [25] **Jurafsky D, Martin JH.** Speech and Language Processing. Draft of January 12, 2025. <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/>.
- [26] **Ribeiro MT, Singh S, Guestrin C.** “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier // Proc. of the 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P.1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.293977.
- [27] **Budzko VI, Ataeva OM, Tuckkova NP.** Automation of access to information navigating through semantic library data and integrating a knowledge graph with a language model [In Russian]. *High Availability Systems*. 2025; 21(2): 5–11. DOI: 10.18127/j20729472-202502-0.
- [28] **Greenacre M, Groenen PJF, Hastie T, et al.** Principal component analysis. *Nat Rev Methods Primers*. 2022. Article number: 100. DOI: 10.1038/s43586-022-00184-w.

About the authors

Olga Muratovna Ataeva – Senior Researcher at the Dorodnicyn Computing Centre of the FRC CSC RAS, Candidate of Technical Sciences (2020). She graduated from the Faculty of Mathematics, North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov. Her areas of expertise include system programming, databases, knowledge engineering and ontology. Author ID (RSCI): 129291; ORCID: 0000-0003-0367-5575. oataeva@frccsc.ru.

Natalia Pavlovna Tuckkova – Senior Researcher at the Dorodnicyn Computing Centre of the FRC CSC RAS, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (2004), graduated from the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of the Lomonosov Moscow State University. Her research interests include algorithmic languages and information technologies. Author ID (RSCI): 102162; ORCID 0000-0001-5357-9640. ntuckkova@frccsc.ru. ✉

Artem Gennadievich Degtev (b. 1995), Master's student at MIPT, specializing in Data Science. AuthorID (РИНЦ): 1280137. ORCID: 0009-0006-6818-7782. Degtev_i_co@mail.ru.

Received September 15, 2025. Revised October 22, 2025. Accepted October 30, 2025.



Топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели

© 2025, А.В. Рипецкий¹, Е.А. Пелих¹ ✉, В.А. Брыкин¹, А.А. Колтаков²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ), Москва, Россия

²АО «Эколибри», Москва, Россия

Аннотация

Рассматриваются методы топологической оптимизации конструкций и особенности их применения. Описываются решётчатые и другие сложные геометрические структуры с регулярно повторяющимися элементарными ячейками, позволяющие обеспечить несплошное внутреннее заполнение деталей с учётом возможности их производства аддитивными технологиями. Выполнена топологическая оптимизация детали с использованием неявного представления геометрической модели для производства её по технологии селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций. В результате оптимизации получено снижение массы детали на 27% без ухудшения её прочностных характеристик за счёт изменения геометрии внутреннего заполнения детали. Отмечена важность верификации результатов топологической оптимизации изделий в соответствии с эксплуатационными нагрузками и с учётом особенностей технологий аддитивного производства.

Ключевые слова: геометрическая модель, топологическая оптимизация, масса, конструкция, деталь, аддитивные технологии, селективное лазерное плавление.

Цитирование: Рипецкий А.В., Пелих Е.А., Брыкин В.А., Колтаков А.А. Топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.614-628. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-614-628.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2023-0004).

Вклад авторов: Рипецкий А.В. – планирование исследования; Пелих Е.А. – анализ данных и представление результатов; Брыкин В.А. – проведение исследования, интерпретация результатов; Колтаков А.А. – анализ и интерпретация данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Требования к снижению массы конструкций [1] особенно актуальны в таких областях, как авиация, космонавтика [2, 3] и машиностроение. Аддитивное производство (АП) открыло новые возможности для создания объектов сложных геометрических форм. В частности, технология селективного лазерного плавления (СЛП) металлов [4, 5] позволяет изготавливать детали с внутренними решётчатыми структурами и топологически оптимизированными формами. Существующими стандартами для АП установлены требования к форме изделий, допустимым нависающим элементам и другие технологические ограничения [6, 7].

Цель данной работы – рассмотреть методы топологической оптимизации (ТО) деталей и на примере показать их применимость к АП.

1 Методы оптимизации и модели конструкции

Топологическая оптимизация. ТО – метод распределения материала в заданной области евклидова пространства при заданных нагрузках и граничных условиях [8, 9]. В результате

ТО удаляются менее нагруженные части материала. Недостатки ТО – чувствительность к граничным условиям и риск несоответствия требованиям стандартов для АП [6, 7]. Следствием является необходимость дополнительной обработки полученной модели или комбинирование ТО с другими методами.

Оптимизация формы. При таком подходе изменяется контур (поверхность) детали с целью улучшения её характеристик [10, 11]. Алгоритмы оптимизации формы обычно изменяют геометрические параметры элементов, чтобы уменьшить локальные концентрации напряжений или деформаций. Например, могут сглаживаться острые углы, увеличиваться радиусы переходов в местах высоких напряжений и т.д. При этом общая конструктивно-силовая схема детали сохраняется. Как правило, оптимизацию формы проводят после ТО.

Оптимизация размеров. Этот метод [12, 13] направлен на подбор оптимальных размеров элементов конструкции. Переменными являются размеры элементов (толщина, диаметр, высота и пр.), а целевой функцией – масса конструкции. Оптимизация размеров обеспечивает подстройку конструкции под нагрузки без изменения её общей структуры. Оптимизация размеров используется совместно с другими методами, в т.ч. с ТО.

Перфорации и фигурные вырезы. Это эффективный способ удаления материала в виде отверстий, полостей или вырезов в малонагруженных зонах [14, 15]. Перфорация снижает массу без изменения внешнего контура детали. Метод применим, когда известны распределения нагрузок и зоны, не участвующие в передаче нагрузок.

Орто- и изогридные структуры. Это тип решётчатых рёбер жёсткости, расположенных по регулярной схеме на поверхностях или внутри детали [16]. Ортогрид – решётка из пересекающихся продольных и поперечных рёбер, изогрид – решётка из перекрещивающихся рёбер, образующих треугольные ячейки (равносторонние треугольники). Возможности АП позволяют изготавливать решётчатые панели и расширить область их применения.

Решётчатые структуры. Подразумеваются объёмные периодические ячеистые структуры внутри детали, заменяющие сплошной материал [17]. Решётка состоит из стержней, рёбер или пластин, соединённых в узлах по заданной схеме (кубическая, октаэдрическая и др.). Применение внутренних решётчатых структур позволяет снизить массу, заполняя объём ячеистой материалоподобной средой вместо цельного металла.

Структуры с трижды периодической минимальной поверхностью (ТПМП-структуры). Особый класс периодических пористых структур представляют непрерывные гладкие поверхности сложной формы (минимальные поверхности в трёх измерениях) [18, 19]. К ТПМП относятся гироид, шароид и т.д. В отличие от решёток из стержней, ТПМП-структура образует единую непрерывную сетчатую оболочку внутри объёма. Гладкие формы ТПМП хорошо масштабируются и повторяются в объёме. Обычно ТПМП-вставки размещают внутри замкнутой внешней оболочки детали в зонах, где нагрузка невелика, чтобы уменьшить массу, но сохранить жёсткость. При проектировании изделия для СЛП ТПМП-структуры часто применяют после ТО.

Автоматическое проектирование [20, 21]. Задаются требования к конструкции (нагрузки, крепление, запретные зоны, цели оптимизации), и алгоритм автоматически генерирует допустимые варианты формы изделия. При автоматическом проектировании используются методы оптимизации, в т.ч. с элементами искусственного интеллекта. Например, в программных комплексах (*Autodesk Generative Design*, *nTop*, *SolidEdge* и др.) методом простого перебора предлагаются десятки вариантов формы детали с разными сочетаниями материалов и производственных процессов [22]. Автоматическое проектирование и АП — взаимодополняющие технологии: первая технология позволяет находить оптимальную форму, вторая — воплощает её в реальность.

Консолидация конструкции. Этот метод позволяет оптимизировать состав изделия, объединяя несколько частей в одну [23, 24]. Консолидация актуальна в АП, т.к. позволяет изготовить изделие без сборки из отдельных частей.

2 Топологическая оптимизация для аддитивного производства

Задача ТО не имеет аналитического решения в общем случае и решается численно.

Градиентные методы непрерывной оптимизации [25, 26]. На каждом шаге расчёта производится конечно-элементный (КЭ) анализ, вычисляются чувствительности целевой функции к изменению относительной плотности элемента, и её значения изменяются по правилу, увеличивающему жёсткость при соблюдении ограничения на объём. Процесс итеративный: относительные плотности КЭ постепенно сходятся к 0 или 1. Метод *SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)* [27, 28] гарантирует сходимость при правильных параметрах. Достоинства градиентных методов – относительная быстрота, недостатки – локальность экстремума.

Методы последовательного удаления/добавления материала. Эти алгоритмы работают непосредственно с дискретной структурой, например, *ESO (Evolutionary Structural Optimization)* [29] итеративно удаляет малонагруженные элементы и пересчитывает напряжения до тех пор, пока не будет выполнено условие оптимальности. Улучшенная версия *BESO (Bi-directional ESO)* [30] позволяет удалять и возвращать материал, если это приводит к достижению цели оптимизации.

Метод задания уровня: граница оптимизируемой формы описывается как уровень (обычно нулевой) скалярного поля $\Phi(x)$ – *level-set* функции [31, 32]. Материал присутствует там, где $\Phi(x) > 0$, а пустота – где $\Phi(x) < 0$. Граница $\Phi(x) = 0$ – это контур детали. *Level-set* метод обеспечивает гладкие границы и топологически допустимые формы с чётким разделением материал/пустота. *Level-set* учитывает геометрические ограничения (минимальную толщину перемычек, радиусы и т.п.), накладывая их на функцию Φ .

Методы гомогенизации [33], в которых материал представляется как сплошная среда с переменной пористостью (микроструктурой). Считается, что каждый точечный объём может быть пористым с оптимальной микрорешёткой внутри. Решается задача оптимального распределения микропористости и происходит формирование дискретной структуры – пористой (типа решётки) либо сплошной. Гомогенизация используется совместно с решётчатыми заполнениями: можно подобрать оптимальный тип и плотность периодической ячейки в каждой части детали для достижения заданных свойств.

Требования аддитивного производства. Результатами ТО является снижение массы детали, но при этом не всегда есть возможность учесть технологические особенности АП. Например, результат ТО может содержать нависающие горизонтальные тонкие элементы, которые невозможно напечатать без поддержек, или изолированные «островки» материала. В алгоритмы ТО вводят учёт производственных ограничений, например, ограничение на минимальный угол наклона элементов относительно горизонтали (чтобы не было неподдерживаемых нависаний). Результат ТО перед передачей в производство проходит этап проверки выполнения рекомендаций по проектированию для АП.

3 Решётчатые и ТПМП-структуры в аддитивном производстве

В традиционном производстве создание внутренних пустот сложной формы затруднено, а в АП это осуществляется с помощью программных комплексов моделирования с неявным представлением геометрической модели (*nTopology* [34], *Materialise 3-matic* [35] и др.).

Параметры и механика решётчатых структур. Решётка характеризуется топологией и размером ячейки. Это определяет относительную плотность материала $\bar{\rho} = m_{\text{решётки}} / m_{\text{полного}}$, которая линейно связана с массой, например, $\bar{\rho} = 0.2$ означает, что 80% – пустой объём. Эффективные свойства решёток зависят от $\bar{\rho}$: модуль упругости $E_{\text{eff}} = E_0 \bar{\rho}^n$ (где n – коэффициент имеет значение 1–2 для разных решёток), предел прочности $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_0 \bar{\rho}^m$ ($m \sim 1 - 1.5$). Например, для кубической решётки $n = 1$, а для решётки «октаэдр» $n = 2$. При проектировании надо принимать такие параметры ТО, чтобы сохранить достаточную жёсткость, в т.ч. с учётом возможной потери устойчивости решётки.

Выбор типа внутренней структуры. ТО определяется несущая структура детали и внутри полученного объёма добавляются периодические структуры: непрерывный ТПМП для равномерности либо решётка для контроля. Выбор зависит от характера нагружения.

- 1) Если требуется обеспечение одинаковых физических свойств во всех направлениях и равномерное распределение напряжений, то предпочтителен ТПМП (гироид) внутри оболочки.
- 2) Если важна неоднородность свойств в зависимости от направления нагрузки или нужны каналы для высыпания порошка, то выбирают решётку.

Проектирование решёток и ТПМП с учётом АП. При использовании внутренних пустотелых структур следует учитывать требования стандарта [7]. АП позволяет управлять толщинами каждого элемента за счёт изменения параметров технологических процессов. Если важны требования к точности формы изделия, то рекомендуется предварительно получить фрагменты решётки и экспериментально убедиться в её работоспособности. Можно смоделировать решётку как эффективную среду (через гомогенизацию) и выполнить прочностной анализ оптимизированной решётчатой детали. На практике зачастую ограничиваются оценкой по усреднённым свойствам или анализируют небольшой репрезентативный объём решётки с граничными условиями от макромоделей.

4 Оптимизация детали для селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций

Рассматривается пример оптимизации предназначенного для изготовления методом СЛП основания кожуха штанги толкателя (см. рисунок 1а,б,в) двигателя МП 1400 (см. рисунок 1г) для беспилотного летательного аппарата вертикального взлёта и посадки Р-265 (см. рисунок 1д) разработки АО «Эколибри». Изначально деталь спроектирована как тонкостенная литая, в основании которой имеется полый объём, не участвующий в работе. Цель оптимизации – снизить массу детали, обеспечив достаточную жёсткость при рабочих нагрузках.

4.1 Подготовка конечно-элементной модели

Трёхмерная модель спроектированного основания кожуха была импортирована в *nTopology* в формате *STEP* и преобразована в неявно заданное тело. Неявное представление геометрии в *nTopology* основано на использовании полевых функций, которые определяют форму объекта не через поверхности и сетки, а через непрерывные математические описания пространства. Такой подход позволяет легко создавать сложные конструкции, плавно сочетать различные области и обеспечивать устойчивость к изменениям параметров. В отличие от традиционных *CAD*-систем, где модель хранится в виде явных поверхностей, неявное ядро *nTopology* обеспечивает высокую гибкость при генеративном проектировании и оптимизации структур. Для задания граничных условий (см. рисунок 1б) выделены поверхности крепёжных отверстий и поверхности цилиндров штанг (зоны приложения нагрузки). Область проектирования – внутренний объём изделия с отступом 1 мм от поверхности изделия (см. рисунок 1в). Выбранные граничные условия и зоны нагружения адекватно воспроизводят

основные направления передачи сил и концентрации напряжений, достаточные для постановки задачи оптимизации.

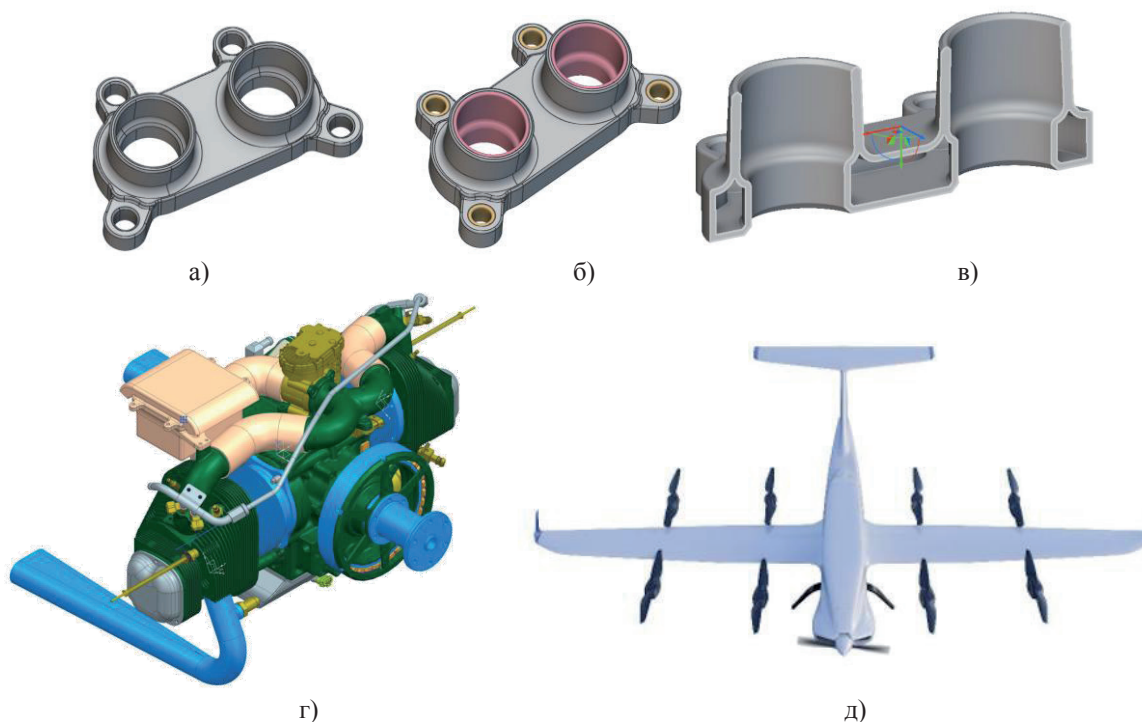


Рисунок 1 – а) Трёхмерная модель основания кожуха штанги толкателя в *nTopology*; б) STEP-модель и зоны фиксации/нагружения в *nTopology*; в) проектируемая область изделия; г) двигатель МП 1400; д) беспилотный летательный аппарат вертикального взлета и посадки Р-265

Для проведения расчёта неявно заданное тело детали необходимо представить КЭ моделью. В *nTopology* существует ряд блоков и инструментов, которые позволяют контролировать качество и структуру поверхностной сетки перед созданием твёрдотельной тетра-сетки: например, можно задать длину ребра, минимальный размер деталей и адаптивность по кривизне. После того, как поверхностная сетка приведена к нужному уровню качества и топологии, она может быть преобразована в твёрдотельную сетку, что обеспечивает совместимость интерфейсов и тетра-элементов на границах.

В начальной дискретизации использовано значение допуска 0,1 мм и максимальный размер элемента (треугольника сетки) – 3 мм. (см. рисунок 2а). Равномерная КЭ сетка с одинаковыми элементами перестроена с использованием адаптивных параметров (см. рисунок 2б) с настройками: размер ребра 0,2–0,5 мм; допуск – 0,01 мм; рост ребра – 2; тип элементов – тетраэдры линейного порядка; параметр учёта резких границ – 45°.

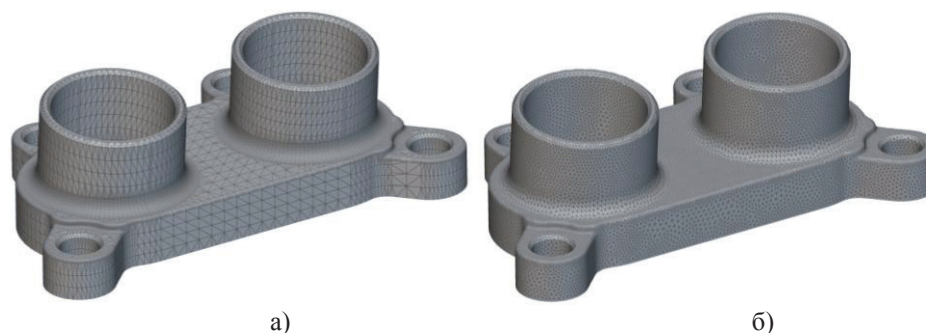


Рисунок 2 – а) сетка трёхмерной модели детали; б) перестроенная конечно-элементная сетка

Параметр роста ребра определяет, насколько быстро увеличивается размер элемента при удалении от геометрически сложных участков (например, от острых краёв). Значение 2 означает, что каждый следующий слой КЭ может быть в два раза крупнее предыдущего. Для большинства задач ТО (особенно на предварительном этапе) линейные КЭ предпочтительны. Настройка сетки выполнена с целью сохранения геометрических особенностей модели, в том числе радиусных сопряжений и тонкостенных зон, участвующих в восприятии нагрузки. Такая структура сетки позволяет адекватно отразить распределение напряжений в зонах с потенциальной концентрацией напряжений.

4.2 Первичный статический расчёт

Для проведения статического расчёта модели в *nTopology* использован материал *AlSi10Mg* из встроенной библиотеки, обладающий типичными для алюминиевых сплавов свойствами при СЛП: модуль упругости ~ 70 ГПа; предел текучести ~ 230 МПа; плотность $\sim 2,67$ г/см³. Предполагается применение российского аналога – сплава РС-300, сертифицированного для отечественных установок СЛП и имеющего незначительные отличия свойств.

Выполнен линейный статический расчёт напряжённно-деформированного состояния конструкции в установившемся режиме при заданных нагрузках и закреплениях. В номинальном режиме моделируется эксплуатационная нагрузка (см. рисунок 3а). В пиковом режиме моделируется ситуация перегрузки (см. рисунок 3б). Нагрузка распределялась по всей поверхности посадки цилиндров.

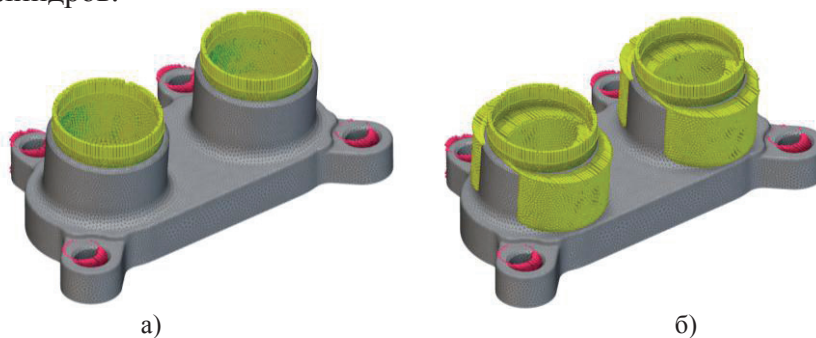


Рисунок 3 – Варианты нагружения для: а) номинального режима эксплуатации; б) пикового режима эксплуатации

Максимальные перемещения в модели (см. рисунок 4а) не превышают 41 мкм, наибольшие смещения наблюдаются в центральной зоне корпуса, между двумя цилиндрами штанги толкателя.

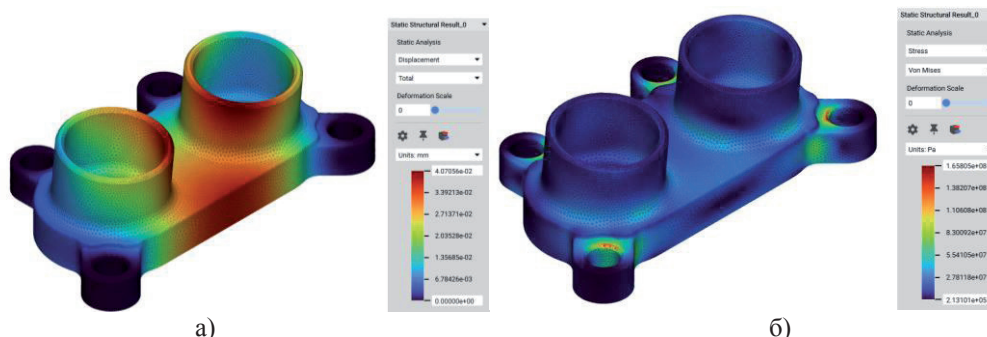


Рисунок 4 – Результаты статического расчёта: а) поле перемещений; б) распределение напряжений

Полученные деформации находятся в диапазоне допустимых для тонкостенных алюминиевых элементов с крепёжной функцией. Максимальные напряжения (по Мизесу, см. рису-

нок 4б) достигают 165,8 МПа и локализуются в зонах сопряжения опорных отверстий и боковых поверхностей корпуса. Эти зоны характеризуются геометрическими переходами и стыками с высокими градиентами напряжений. С учётом предела текучести для сплава *AlSi10Mg* в условиях СЛП-печати (240–260 МПа), полученные значения находятся в допустимой области.

Использование неявной геометрии в *nTopology* позволяет задавать нагрузки, закрепления и другие расчётные условия на этапе проектирования без многократного перехода между средой моделирования *CAD* и средой КЭ расчёта.

4.3 Топологическая оптимизация конструкции

Результаты статического расчёта позволяют перейти к оптимизации конструкции. В данном случае она осуществляется посредством ТО и ТПМП-заполнения. В модуле оптимизации задана цель: минимизация целевой функции при ограничении доли оставляемого объёма не более 20% от исходного. Параметры расчёта: максимальное число итераций 50; минимальное изменение функции цели (критерий сходимости) 0.0005; минимальная плотность (элементы с меньшей плотностью считаются незначимыми и отбрасываются) 0.01; штраф на границы (параметр, сглаживающий переходы) 0.5. Результатом оптимизации является распределение относительной плотности материала внутри исходного объёма (см. рисунок 5).

Близкие к единице значения (красная зона) соответствуют участкам, которые следует сохранить как несущие. Зоны с плотностью ниже порога отсекаются при формировании итоговой формы тела (см. рисунок 6).

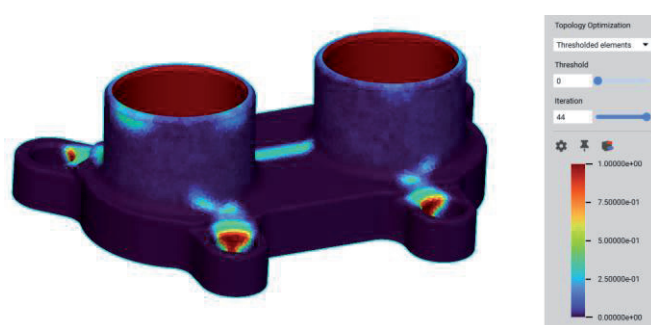


Рисунок 5 – Результат оптимизации: распределение плотности материала

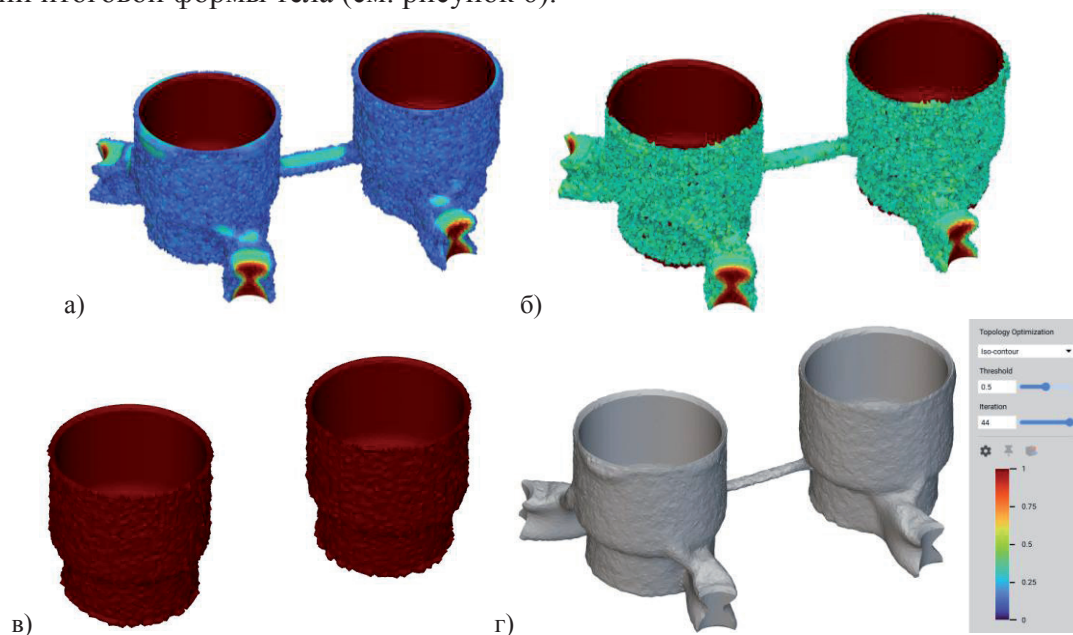


Рисунок 6 – Варианты формы (топологии) детали после оптимизации. Порог отсека: а) 0,1; б) 0,3; в) 1; г) 0,5

Значение порога отсечения влияет на то, какие элементы результирующей топологии сохраняются. Установка значения, стремящегося к нулю, приводит к включению в итоговую форму всех элементов, в т.ч. тех, которые получили нулевую плотность. В работе используется значение порога отсечения 0,5, что обеспечивает баланс между массой и сохранением несущих элементов (см. рисунок 6г).

В результате топологической оптимизации деталь имеет шероховатую, неровную структуру, в которой отдельные зоны могут быть плохо приспособлены к АП (например, содержать островки, острые пики, резкие перепады толщин). Для устранения этих недостатков используется инструмент сглаживания.

Результирующее тело (см. рисунок 7а) доступно для последующих операций, не теряя связности и параметричности. Отсечённый объём может быть использован для формирования внешней оболочки детали, внутренние полости которой заполняются в дальнейшем микроструктурой (см. рисунок 7б).

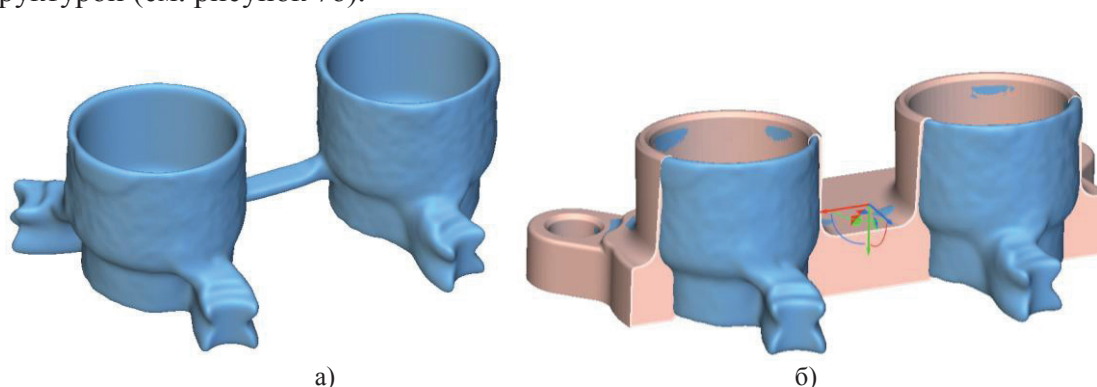


Рисунок 7 – а) модель изделия после топологической оптимизации и сглаживания;
б) области исходной CAD-геометрии, не вошедшие в топологически оптимизированную модель

Этот подход обеспечивает сохранение внешних габаритов и поверхностей, восполнение функционального объёма менее нагруженными, но жёсткими структурами и адаптацию конструкции для СЛП. В качестве базовой ТПМП-ячейки использована гироидная структура благодаря её непрерывной трёхмерной поверхности без самопересечений, что обеспечивает высокое отношение прочности к массе и одинаковые механические свойства в разных направлениях. Такая структура характеризуется равномерным распределением напряжений, что делает её перспективной для применения в АП.

Результат ТПМП-заполнения можно увидеть на поперечном срезе изделия (см. рисунок 8а, б). Гироидная структура расположена во внутреннем объёме. При этом внешняя оболочка толщиной 1 мм остаётся сплошной, что обеспечивает целостность поверхностей касания. При необходимости структура может быть адаптирована под переменную плотность.

Объединение результатов этапа ТО и гироидного заполнения выполнено с использованием операций булевой геометрии. Результат (см. рисунок 8в, г) включает внешнюю оболочку, полученную эквидистантным отходом от поверхности импортированной CAD-модели, результат ТО (каркас) и внутреннюю ТПМП-структуру, размещённую в оставшемся объёме. Булевая операция объединения выполняется между сглаженным неявным телом и телом, содержащим заполнение. При этом обеспечивается непрерывность формы, а внутреннее заполнение вписывается в оставшийся резервный объём без нарушения толщины стенок или пересечений. Такой подход позволяет одновременно сохранить оптимизированный несущий каркас в наиболее нагруженных участках, жёсткое, но лёгкое заполнение в менее нагруженных зонах, а также точную внешнюю форму. Объединение в одну геометрическую модель является особенностью геометрического ядра *nTopology*.

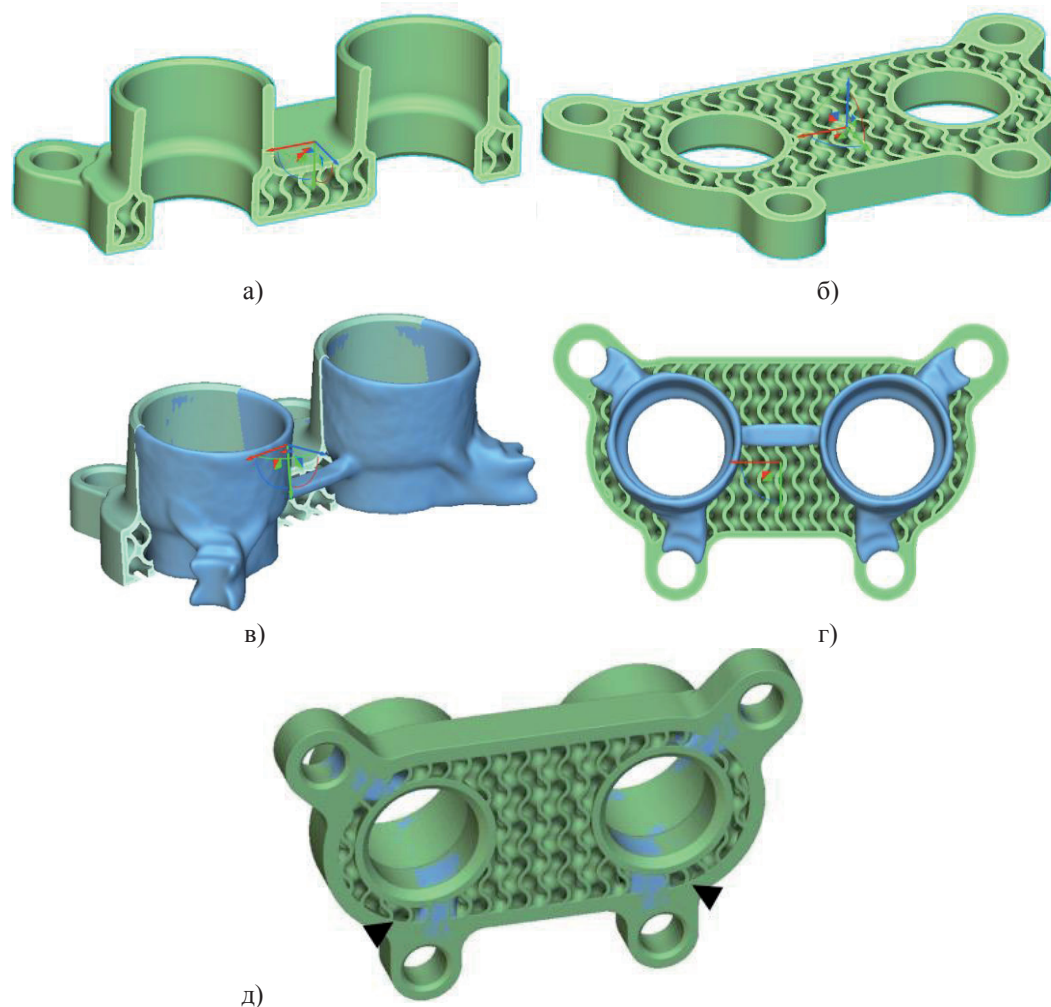


Рисунок 8 – а, б) разрезы детали с ТПМП-заполнением; в, г) итоговая конструкция после объединения оболочки, гироидного заполнения и оптимизированного каркаса (поперечный и фронтальный срезы); д) вырез для удаления порошка из ТПМП-структуры

Для обеспечения технологической реализуемости выполнен вырез внутреннего канала в зоне гироидного заполнения (см. рисунок 8д). Этот канал предназначен для удаления несплавленного порошка после печати.

После объединения оптимизированной оболочки и гироидного заполнения рекомендуется выполнить повторный статический анализ с целью проверки жёсткости и прочности итоговой модели. Важно провести расчёт с теми же граничными условиями. Прямая оценка механических характеристик ТПМП-структур затруднена в рамках КЭ расчёта и требует значительных вычислительных мощностей. Для поверочного расчёта прочности моделей с микроструктурным заполнением применяют многоуровневый подход: сначала вычисляются свойства элементарной ячейки, которые используются в общей модели конструкции, а затем свойства элементарной ячейки экстраполируются на весь объём детали.

В результате проведённой ТО удалось достичь снижения массы детали на 27 % при сохранении прочностных характеристик. Полученное решение сочетает преимущества ТО и ТПМП, что показывает возможность применения подхода на другие детали силовой установки.

4.4 Верификация и цифровая интеграция

При проектировании конструкций для АП необходимость проверки того, что оптимизированная геометрия детали удовлетворяет всем требованиям, обусловлена тем, что ТО может привести к появлению зон, работающих на пределе прочности. Неточность в расчётах или технологии способна вызвать местные нарушения прочности или потерю устойчивости. Поэтому каждая итерация оптимизации должна сопровождаться КЭ расчётом новой геометрической формы [36, 37].

Цифровая интеграция включает учёт технологических отклонений действительной формы от номинальной (усадка, погрешность лазера, шероховатость). Возможна проверка формы полученной детали её сканированием и сопоставлением с моделью. Если обнаружены расхождения (например, тонкие ребра не пропечатались полностью), то в цифровую модель можно внести поправки (усилить элементы) и повторить цикл.

На основе статистических данных (например, прочности материала с учётом пористости при печати, которую можно оценить неразрушающим контролем) модель можно уточнить. В итоге, пройдя все этапы: оптимизация → анализ → прототип → испытание → корректировка модели – можно утвердить итоговую конструкцию к серийному АП.

Заключение

Развитие методов ТО конструкции минимальной массы и их интеграция с АП открывают перед конструкторами новые возможности: сложные органические формы, внутренние решётки, объединение деталей – всё это можно осуществить при помощи АП, минуя ограничения традиционных технологий производства.

Применение описанных подходов позволяет добиться максимальной экономии массы и удовлетворения требований прочности, жёсткости с учётом производственных ограничений. Как показал пример, следование многоуровневой методике (*CAD* → КЭ расчёт → ТО → ТППИ-структуры → проверка технологичности → прототипирование) позволяет получить оптимизированную деталь, готовую для АП.

Ключевым этапом остаётся верификация – цифровая и физическая. Цифровые технологии позволяют проводить большую часть таких проверок виртуально.

Список источников

- [1] **Комаров В.А.** Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №2(24). С.191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- [2] **Космодемьянский Е.В., Нагиев А.В., Изратов Д.Ю., Кирпичев В.А., Давыдов П.А., Маркарова А.А., Козлова И.В., Окунин А.Ю., Пустовалов А.Ю.** Проект космического ракетного комплекса на базе ракетносителя сверхлёгкого класса. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4(30). С.523-539. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-523-539.
- [3] **Ткаченко И.С.** Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №4(42). С.478-499. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.
- [4] **Грибова В.В., Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Тимченко В.А.** Ансамбль онтологических моделей для обеспечения интеллектуальной 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.
- [5] **Кишов Е.А.** Математическое моделирование нестационарного теплопереноса в селективном лазерном плавлении на основе машинного обучения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.142-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-142-151.
- [6] ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations. — Geneva: ISO/ASTM International, 2018. 24 p.

- [7] ISO/ASTM 52911-1:2019. Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. — Geneva: ISO/ASTM International, 2019. 38 p.
- [8] **Bendsøe M.P., Sigmund O.** Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. 370 p.
- [9] **Deaton J.D., Grandhi R.V.** A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2014. Vol.49, №1. P.1-38. DOI: 10.1007/s00158-013-0956-z.
- [10] **Sokolowski J., Zolésio J.-P.** Introduction to Shape Optimization: Shape Sensitivity Analysis. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 250 p.
- [11] **Henrot A., Pierre M.** Variation et optimisation de formes: Une analyse géométrique. Berlin: Springer, 2005. 360 p.
- [12] **Arora J. S.** Introduction to Optimum Design. — 4th ed. — Oxford: Academic Press (Elsevier), 2016. 968 p.
- [13] **Kirsch U.** Optimum structural design: concepts, methods, and applications. New York: McGraw-Hill, 1981. 441 p.
- [14] **Burchill M.A., Paulino G.H.** A framework for optimal design of free-form holes in plates using an integral-equation approach. *Computers & Structures*. 2004. Vol.82, №23–26. P.1823–1840. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.05.013.
- [15] **Rezaeepazhand J., Jafari M.** Stress analysis of perforated composite plates. *Composite Structures*. 2005. Vol.71, №3–4. P.463–468. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.09.003.
- [16] **Wang D., Quek S. T., Ang K. K.** Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels. *Composite Structures*. 2015. Vol.119. P.20–28. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.08.015.
- [17] **Panesar A., Abdi M., Hickman D., Ashcroft I.** Hierarchical lattice structures: A review. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol.19. P.81–94. DOI: 10.1016/j.addma.2017.11.003.
- [18] **Maskery I., Sturm L., Aremu A. O., Panesar A., Williams C. B., Tuck C., Ashcroft I.** Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer AM. *Polymer*. 2018. Vol.152. P.62–71. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.11.049.
- [19] **Yang L., Harrysson O.L., West H., Cormier D.** Mechanical properties of gyroid TPMS for AM. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol.25. P.126–136. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.036.
- [20] **Wang C., Chen S., Ning X., Zhu J., Wang M.** Generative-Design by Embedding Topology Optimization. *Journal of Mechanical Design*. 2023. Vol.145, №11. 114501. DOI: 10.1115/1.4063319.
- [21] **Barbieri L., Colombo G., Degliesposti G., Favi C., Mandorli F.** Performance-driven engineering design approaches: from topology optimization to generative design. *Applied Sciences*. 2022. Vol.12, №23. 12298. DOI: 10.3390/app122312298.
- [22] nTopology. Structural Optimization: 7 Design Tips for Lighter Designs. *nTopology Blog*. 2022. <https://ntopology.com>.
- [23] **Schmelzle J., Kline E., Dickman C.J., Reutzel E.W., Jones G., Simpson T.W.** (Re)Designing for part consolidation: Understanding the challenges of AM. *Journal of Mechanical Design*. 2015. Vol.137, №11. 111404. DOI: 10.1115/1.4031156.
- [24] **Yang S., Zhao Y.F.** Additive manufacturing-enabled part count reduction: a lifecycle perspective. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. Vol.20, №3. P.316–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.07.001.
- [25] **Svanberg K.** The method of moving asymptotes — a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1987. Vol. 24, №2. P.359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- [26] **Svanberg K.** A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM Journal on Optimization*. 2002. Vol.12, №2. P.555–573. DOI: 10.1137/S1052623499362822.
- [27] **Bendsøe M.P.** Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*. 1989. Vol.1, №4. P.193–202. DOI: 10.1007/BF01650949.
- [28] **Rietz A.** Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001. Vol.21, №2. P.159–163. DOI: 10.1007/s001580050180.
- [29] **Tanskanen P.** The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002. Vol.191, №47–48. P.5485–5498. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00436-1.
- [30] **Huang X., Xie Y.M.** Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. Chichester: Wiley, 2010. 309 p.
- [31] **Wang M.Y., Wang X., Guo D.** A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2003. Vol.192, №1–2. P. 227–246. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00559-5.
- [32] **Allaire G., Jouve F., Toader A. M.** Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*. 2004. Vol.194, №1. P.363–393. DOI: 10.1016/j.jcp.2003.09.032.
- [33] **Allaire G.** Shape Optimization by the Homogenization Method. New York: Springer, 2002. 456 p.
- [34] **Song R., Liu Z., Wang X.** Lattice Design and Advanced Modeling to Guide the Design of High-Performance Lightweight Structural Materials. *Energies*. 2024. Vol.17, №6. 1468. DOI: 10.3390/en17061468.

- [35] **Bertolini M., et al.** Evaluation of segmentation accuracy and its impact on CFD results: comparison of Mimics (Materialise) и 3D Slicer. *The Visual Computer*. 2022. Vol.38, №10. P.3465-3478. DOI: 10.1007/s00371-021-02288-y.
- [36] **Peto M., Foy C., McPhillips M., et al.** Review on Structural optimization techniques for additively manufactured implantable medical devices. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol.10. Art. 1353108. DOI: 10.3389/fmech.2024.1353108.
- [37] **Özdemir M.** Light-weight design of aerospace components using genetic and dandelion optimization algorithms. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2024. Vol.17, №2. P.47-58.

Сведения об авторах



Рипецкий Андрей Владимирович, 1979 г.р. Окончил МАИ в 2002 г., к.т.н. (2006). Доцент кафедры инженерной графики МАИ. Руководитель лаборатории аддитивных технологий центра аэрокосмических материалов и технологий Передовой инженерной школы МАИ. В списке научных трудов более 120 работ в области аддитивных технологий. Author ID (РИНЦ): 144971; ORCID ID: 0000-0003-3446-6717. Author ID (Scopus): 55976658900; Researcher ID (WoS): S-6932-2019. a.ripetskiy@mail.ru.

Пелих Евгений Александрович, 1999 г.р. Окончил МАИ в 2017 г. Научный сотрудник НИО-904 кафедры инженерной графики МАИ. В списке научных трудов около 10 работ. Author ID (РИНЦ): 1232816. ORCID ID: 0009-0007-7337-8695. personal@eapelikh.ru. ✉.



Брыкин Вениамин Андреевич, 1996 г.р. Окончил МАИ в 2023 г., к.т.н. (2024). Инженер НИО-904 кафедры инженерной графики МАИ. В списке научных трудов 23 работы в области аддитивного производства, материаловедения и управления качеством производственных процессов. ORCID: 0000-0002-7456-9879; AuthorID (РИНЦ): 1056862; ORCID ID: 0000-0002-7456-9879. Author ID (Scopus): 57219448628. brykinva@mai.ru

Колтаков Артур Алексеевич, 1991 г.р. Окончил Воронежский государственный технический университет в 2014 г. Инженер АО «Эколибри». Область научных интересов: проектирование и топологическая оптимизация новых конструкций ДВС, новые методы производства деталей ДВС. a.k@ecolibri.aero



Поступила в редакцию 01.08.2025, после рецензирования 16.10.2025. Принята к публикации 22.10.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-614-628

Topology optimization of components using an implicit geometric model representation

© 2025, A.V. Ripetskiy¹, E.A. Pelikh¹ ✉, V.A. Brykin¹, A.A. Koltakov²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University, MAI), Moscow, Russia

²JSC Ecolibri, Moscow, Russia

Abstract

This paper explores methods for topological optimization of structures and the particularities of their implementation. It describes lattice and other complex geometric structures with regularly repeating unit cells that provide non-solid internal filling of components, taking into account the feasibility of their fabrication using additive manufacturing technologies. A case study of topological optimization using an implicit geometric model representation was conducted for a component intended for production via selective laser melting of metal powder alloys. The optimization resulted in a 27% reduction in the component's mass without compromising its mechanical strength, achieved through modification

of the internal geometry. The study emphasizes the importance of verifying the results of topological optimization under operational loads while accounting for the specific characteristics of additive manufacturing technologies.

Keywords: *geometric model, topological optimization, mass, structure, additive manufacturing, selective laser melting.*

For citation: *Ripetskiy AV, Pelikh EA, Brykin AV, Koltakov AA. Topology optimization of components using an implicit geometric model representation [In Russian]. Ontology of designing. 2025; 15(4): 614-628. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-614-628.*

Funding: the study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project code FSFF-2023-0004).

Authors' contributions *Ripetskiy A.V.* – research planning; *Pelikh E.A.* – data analysis and presentation of results; *Brykin V.A.* – conducting the study and interpreting the results; *Koltakov A.A.* – data analysis and interpretation.

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

List of figures

- Figure 1 – (a) CAD model of the push rod housing base in nTopology; (b) STEP model and fixation/loading zones in nTopology; (c) design area of the component; (d) MP-1400 engine; (e) R-265 vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle
- Figure 2 – (a) Mesh generated from the CAD model; (b) reconstructed finite element (FE) mesh
- Figure 3 – Loading conditions for: (a) nominal operating mode; (b) peak operating mode
- Figure 4 – Static analysis results: (a) displacement field; (b) stress distribution
- Figure 5 – Optimization result: material density distribution
- Figure 6 – Variants of component geometry (topology) after optimization. Cut-off threshold: (a) 0.1; (b) 0.3; (c) 1; (d) 0.5
- Figure 7 – (a) Component model after topological optimization and smoothing; (b) regions of the original CAD geometry not included in the topologically optimized model
- Figure 8 – (a, b) Cross-sections of the component with TPMP (triply periodic minimal surface) infill; (c, d) final structure after merging the shell, gyroid infill, and optimized frame (transverse and frontal sections); (e) cut-out for powder removal from the TPMP structure

References

- [1] **Komarov VA.** Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(2): 191-206. - DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- [2] **Kosmodemyansky EV, Nagiev AV, Izratov DYU, Kirpichev VA, Davydov PA, Markarova AA, Kozlova IV, Okutin AYU, Pustovalov AYU.** Space rocket complex project on the basis of a super-light class rocket-c [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(4): 523-539. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-523-539.
- [3] **Tkachenko IS.** Analysis of key technologies for creating multi-satellite orbital constellations based on of small spacecraft / [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(4): 478-499. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.
- [4] **Gribova VV, Kulchin YuN, Nikitin AI, Timchenko VA.** An ensemble of ontological models for intelligent support of laser additive manufacturing processes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 279-300. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.
- [5] **Kishov EA.** Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in selective laser melting based on machine learning [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 142-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-142-151.
- [6] ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing - Design - Requirements, guidelines and recommendations. – Geneva: ISO/ASTM International, 2018. 24 p.
- [7] ISO/ASTM 52911-1:2019. Additive manufacturing - Design - Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. – Geneva: ISO/ASTM International, 2019. 38 p.
- [8] **Bendsoe MP, Sigmund O.** Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. 370 p.
- [9] **Deaton JD, Grandhi RV.** A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2014; 49(1): 1–38. DOI: 10.1007/s00158-013-0956-z.

- [10] **Sokolowski J, Zolésio J-P.** Introduction to Shape Optimization: Shape Sensitivity Analysis. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 250 p.
- [11] **Henrot A, Pierre M.** Variation et optimisation de formes: Une analyse géométrique. Berlin: Springer, 2005. 360 p.
- [12] **Arora JS.** Introduction to Optimum Design. 4th ed. Oxford: Academic Press (Elsevier), 2016. 968 p.
- [13] **Kirsch U.** Optimum structural design: concepts, methods, and applications. New York: McGraw-Hill, 1981. 441 p.
- [14] **Burchill MA, Paulino GH.** A framework for optimal design of free-form holes in plates using an integral-equation approach. *Computers & Structures*. 2004; 82(23–26): 1823–1840. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.05.013.
- [15] **Rezaeepazhand J, Jafari M.** Stress analysis of perforated composite plates. *Composite Structures*. 2005; 71(3–4): 463–468. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.09.003.
- [16] **Wang D, Quek ST, Ang KK.** Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels. *Composite Structures*. 2015; 119: 20–28. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.08.015.
- [17] **Panesar A, Abdi M, Hickman D., Ashcroft I.** Hierarchical lattice structures: A review. *Additive Manufacturing*. 2018; 19: 81–94. DOI: 10.1016/j.addma.2017.11.003.
- [18] **Maskery I, Sturm L, Aremu AO, Panesar A, Williams CB, Tuck C, Ashcroft I.** Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer AM. *Polymer*. 2018; 152: 62–71. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.11.049.
- [19] **Yang L, Harrysson OL, West H, Cormier D.** Mechanical properties of gyroid TPMS for AM. *Additive Manufacturing*. 2018; 25: 126–136. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.036.
- [20] **Wang C, Chen S, Ning X, Zhu J, Wang M.** Generative-Design by Embedding Topology Optimization. *Journal of Mechanical Design*. 2023; 145(11): 114501. DOI: 10.1115/1.4063319.
- [21] **Barbieri L, Colombo G, Degliesposti G, Favi C, Mandorli F.** Performance-driven engineering design approaches: from topology optimization to generative design. *Applied Sciences*. 2022; 12(23): 12298. DOI: 10.3390/app122312298.
- [22] nTopology. Structural Optimization: 7 design tips for lighter designs. *nTopology Blog*. 2022. <https://ntopology.com>.
- [23] **Schmelzle J, Kline E, Dickman CJ, Reutzel EW, Jones G, Simpson TW.** (Re)Designing for part consolidation: Understanding the challenges of AM. *Journal of Mechanical Design*. 2015; 137(11): 111404. DOI: 10.1115/1.4031156.
- [24] **Yang S, Zhao YF.** Additive manufacturing-enabled part count reduction: a lifecycle perspective. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015; 20(3): 316–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.07.001.
- [25] **Svanberg K.** The method of moving asymptotes — a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1987; 24(2): 359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- [26] **Svanberg K.** A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM Journal on Optimization*. 2002; 12(2): 555–573. DOI: 10.1137/S1052623499362822.
- [27] **Bendsoe MP.** Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*. 1989; 1(4): 193–202. DOI: 10.1007/BF01650949.
- [28] **Rietz A.** Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001; 21(2): 159–163. DOI: 10.1007/s001580050180.
- [29] **Tanskanen P.** The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002; 191(47–48): 5485–5498. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00436-1.
- [30] **Huang X, Xie YM.** Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications. Chichester: Wiley, 2010. 309 p.
- [31] **Wang MY, Wang X, Guo D.** A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2003; 192(1–2): 227–246. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00559-5.
- [32] **Allaire G, Jouve F, Toader AM.** Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*. 2004; 194(1): 363–393. DOI: 10.1016/j.jcp.2003.09.032.
- [33] **Allaire G.** Shape Optimization by the Homogenization Method. New York: Springer, 2002. 456 p.
- [34] **Song R, Liu Z, Wang X.** Lattice design and advanced modeling to guide the design of high-performance lightweight structural materials. *Energies*. 2024; 17(6): 1468. DOI: 10.3390/en17061468.
- [35] **Bertolini M., et al.** Evaluation of segmentation accuracy and its impact on CFD results: comparison of Mimics (Materialise) и 3D Slicer. *The Visual Computer*. 2022; 38(10): 3465–3478. DOI: 10.1007/s00371-021-02288-y.
- [36] **Peto M, Foy C, McPhillips M., et al.** Review on Structural Optimization Techniques for Additively Manufactured Implantable Medical Devices. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024; 10. Art.1353108. DOI: 10.3389/fmech.2024.1353108.
- [37] **Özdemir M.** Light-Weight Design of Aerospace Components Using Genetic and Dandelion Optimization Algorithms. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2024; 17(2): 47–58.

About the authors

Andrey Vladimirovich Ripetskiy (b. 1979) graduated from Moscow Aviation Institute in 2002, Candidate of Technical Science (2006). Associate Professor at the Department of Engineering Graphics, Moscow Aviation Institute. Head of the Additive Technologies Laboratory at the Center for Aerospace Materials and Technologies of the Advanced Engineering School of MAI. Author of more than 120 scientific publications in the field of additive manufacturing. Author ID (RINC): 144971; ORCID ID: 0000-0003-3446-6717. Author ID (Scopus): 55976658900; Researcher ID (WoS): S-6932-2019. *a.ripetskiy@mail.ru*.

Evgeni Alexandrovich Pelikh (b. 1999) graduated from Moscow Aviation Institute in 2017. Researcher at the Department of Engineering Graphics, Moscow Aviation Institute, a co-author of about 10 scientific publications. ORCID ID: 0009-0007-7337-8695. Author ID (RSCI): 1232816. *personal@eapelikh.ru* ✉.

Veniamin Andreevich Brykin (b. 1996) graduated from MAI in 2023, Candidate of Technical Science (2024). Engineer at the Department of Engineering Graphics, Moscow Aviation Institute. His list of scientific works includes 23 papers in the fields of additive manufacturing, materials science, and quality management of production processes. ORCID ID: 0000-0002-7456-9879. AuthorID (RINC): 1056862; Author ID (Scopus): 57219448628. *brykinva@mai.ru*.

Artur Alexeevich Koltakov (b. 1991) graduated from Voronezh State Technical University in 2014. Engineer at Ecolibri JSC. Research interests include the design and topological optimization of new internal combustion engine structures and novel manufacturing methods for engine components. *a.k@ecolibri.aero*

Received August 1, 2025. Revised October 16, 2025. Accepted October 22, 2025.

Индекс 29151

LVIII *exitus*
magazine

“**ONTOLOGISTS
AND DESIGNERS
OF ALL COUNTRIES
AND SUBJECT AREAS,
JOIN US!**”



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