Ontology of Designing

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

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Vol 15
2025
№2

Научный журнал -
Scientific journal

приоритет2030^
лидерами становятся

Передовые инженерные школы

22 31 десятилетие науки и технологий

Ontology of Designing - v.15 №2(54)/2025 - Онтология проектирования

Ontology of Designing
Ontologiâ proektirovaniâ (Ontol. proekt.)

ISSN 2223-9537 (Print)
ISSN 2313-1039 (E-version)

Scientific journal

Volume 15

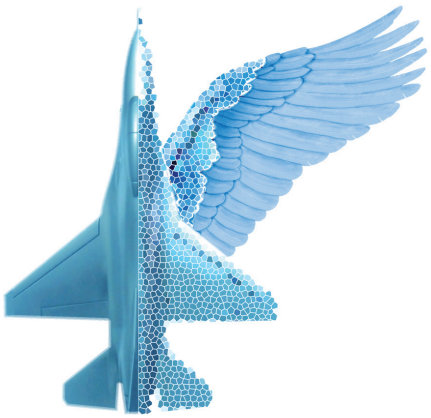
N 2

ОНТОЛОГИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 15

№ 2



2025

Индекс - 29151
Издаётся с 2011 года, 4 номера в год.
The journal has been published since 2011, quarterly.

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
том 15 № **2,** 2025

ISSN 2223-9537 (Print)
ISSN 2313-1039 (E-version)

Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAOA, AAAI. Samara, Russia
Stanislav N. **Vasiliev***, Doctor of Phys. and Math. Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
Tatiana A. **Gavrilova*,** Doctor of Technical Sciences, Professor, GSOM SPbU, St.-Petersburg, Russia
Vladimir G. **Gainutdinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, KNITU-KAI, Kazan, Russia
Vladimir V. **Golenkov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSUIR, Minsk, Belarus
Vladimir I. **Gorodetsky***, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «EVRIKA», St. Petersburg, Russia
Valeriya V. **Gribova***, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, IAPU of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia
Yury A. **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
Dzhavdet S. **Suleymanov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the AS of the RT, Kazan, Russia
Boris E. **Fedunov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
Andrei A. **Cherepashkov***, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Technical University. Samara, Russia
Altynbek **Sharipbay***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Astana, Kazakhstan

Боргест Николай Михайлович*, к.т.н., доцент, Самарский университет, член 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
Загорулько 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	Главный редактор	Скобелев П.О.	СамНЦ РАН, Самара, Россия
Deputy Chief Editor	**S.V. Smirnov**	Samara, Russia	Зам. главного редактора	Смирнов С.В.	ПГУТИ, Самара, Россия
Executive Editor	**N.M. Borgest**	Samara, Russia	Выпускающий редактор	Боргест Н.М.	Самарский университет, Самара, Россия
Editor	**D.M. Kozlov**	Samara, Russia	Редактор	Козлов Д.М.	Самарский университет, Самара, Россия
Technical Editor	**D.N. Borgest**	Samara, Russia	Технический редактор	Боргест Д.Н.	Самарский университет, Самара, Россия
Executive Secretary	**S.A. Vlasov**	Samara, Russia	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 размещен 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 **К1**) по научным специальностям 1.2.2., 2.3.1., 2.3.4., 2.3.5., 2.3.7., 2.3.8., 2.5.1., 2.5.13., 2.5.15., 5.12.4. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1,091** (2023).

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-70157 от 16.06.2017 г. (ранее выданное свидетельство ПИ № ФС77-46447 от 07.09.2011 г.)

© Самарский университет, Samara University, 2015-2025; © СамНЦ РАН, SamSC of RAS, 2015-2025; © ООО «Новая техника», «New Engineering» Ltd., 2011-2025

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

Дезинтеграция постоянства памяти **157-162**

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.М. Фаянс **163-173**
Об онтологии проектирования с позиций трансдисциплинарного подхода

Е.Б. Скворцов **174-186**
Онтология пассажирской авиации: метрика и закон развития

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Г.Ю. Порецкова, А.В. Иващенко, А.А. Тяжева, С.В. Плахотникова, Г.Э. Жданович, Е.В. Чекина **187-197**
Онтологический подход к цифровизации медицинских осмотров и диспансерного наблюдения на базе телемедицинской платформы

А.И. Семёнов, Б.В. Соколов, А.В. Спесивцев **198-210**
Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве

П.О. Скобелев, В.А. Галузин, А.В. Галицкая, А.А. Галузин **211-227**
Прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений

А.В. Соловов, А.А. Меньшикова **228-238**
Онтология компьютерного тестирования в обучении

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

П.А. Ломов **239-248**
Использование онтологий для контекстуализации запросов к большим языковым моделям

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

С.В. Микони **249-261**
Метод упорядочения альтернатив на основе заданных норм

Л.В. Аршинский **262-269**
О третьих формах конъюнкции и дизъюнкции в логиках с векторной семантикой

И.Н. Пожаркова **270-280**
Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола

Е.Б. Старцева, Н.О. Никулина, А.И. Малахова **281-294**
Система поддержки принятия решения для выбора профиля обучения

Дискуссия. Разбор понятий **295-300**

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

Правила подготовки рукописей статей размещены на сайте журнала «Онтология проектирования»: **http://agora.guru.ru/scientific_journal/**, а также на **https://www.ontology-of-designing.ru/.**

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

Контакты соучредителей

Самарский университет: 443086, Самара, Московское шоссе 34, корп. 10, тел.: +7 (846) 267 46 47, Боргест Н.М., borgest@yandex.ru.
СамНЦ РАН: 443001, Самара, Студенческий пер. 3а, тел.: +7 (846) 340 06 20. Соколов В.О. sokolov@ssc.smr.ru.
ООО «Новая техника» (издатель, редакция): 443010, Самара, ул. Фрунзе, 145, тел.: +7 (846) 332 67 84, +7 (846) 332 67 81.

Отпечатано в ООО «Новая техника» (типография), 443013, г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 15.04.2025. Тираж 100 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

Disintegration of memory persistence **157-162**

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

A.M. Fayans **163-173**
On the ontology of designing from the standpoint of a transdisciplinary approach

E.B. Skvortsov **174-186**
Ontology of passenger aviation: metric and law of development

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

G.Yu. Poretskova, A.V. Ivaschenko, A.A. Tyazheva, S.V. Plakhotnikova, G.E. Zhdanovich, E.V. Chekina **187-197**
An ontological approach to digitalization of medical check-ups and follow-up medical care based on a telemedicine platform

A.I. Semyonov, B.V. Sokolov, A.V. Spesivtsev **198-210**
An integrated approach to solving planning problems in forage production

P.O. Skobelev, V.A. Galuzin, A.V. Galitskaya, A.A. Galuzin **211-227**
Forecasting the development of agricultural crops in a digital twin of plant cultivation

A.V. Solovov, A.A. Menshikova **228-238**
Ontology of computer-based testing in learning

ONTOLOGY ENGINEERING

P.A. Lomov **239-248**
Using ontologies to contextualize queries to large language models

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

S.V. Mikoni **249-261**
Method of ranking alternatives based on given norms

L.V. Arshinskiy **262-269**
On the third forms of conjunction and disjunction in logic with vector semantics

I.N. Pozharkova **270-280**
Selection of numerical methods for modeling free jets from a fire nozzle

E.B. Startceva, N.O. Nikulina, A.I. Malakhova **281-294**
Decision support system for choosing a study program

Discussion. Analysis of concepts **295-300**

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

The current version of the Rules for the preparation of manuscripts of articles for the journal «Ontology of Designing» is on the journal website: **http://agora.guru.ru/scientific_journal/**, and **https://www.ontology-of-designing.ru/**.

The content of the scientific journal is distributed under a license **CC-BY 4.0**
(Creative Commons Attribution 4.0 International License)

Contacts of the co-founders

Samara University: 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia. Tel.: +7 (846) 267 46 47, N.M. Borgest, borgest@yandex.ru
Samara Scientific Center of the RAS: 3a, Studenchesky per., Samara, 443001, Russia. Tel.: +7 (846) 340 06 20. V.O. Sokolov, sokolov@ssc.smr.ru.
New Engineering LLC (publishing house, editorial office): 145, Frunze st., Samara, 443010, Russia. Tel .: +7 (846) 332 67 84, +7 (846) 332 67 81

ОТ РЕДАКЦИИ

Дезинтеграция постоянства памяти
Disintegration of memory persistence

Как может «быть потом» то, что есть,
Как могло бы «быть в прошлом»?
«Было» – значит, не есть; не есть, если «некогда будет»
Парменид. «О природе» [1]

Зачем дана нам память?
Прекрасное воспеть,
В веках его оставить –
И тленье одолеть
Родион Мулюков[2]

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

Искусственный интеллект в разных формах вторгается в нашу жизнь[3], помогая решать наши проблемы и создавая при этом новые. Его бурное, относительно нашей короткой жизни, появление заставляет переосмыслить наше представление о времени и бытии, о важнейших онтологических понятиях, о сложности мироустройства и скрытой от нас простоте того, что уже понято.

«Дезинтеграция постоянства памяти», *Сальвадор Дали* (1952-1954 гг.)

«Постоянство памяти», *Сальвадор Дали* (1931 г.)

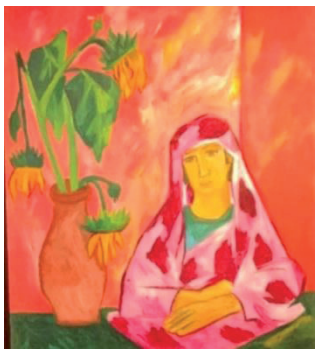
За основу или отправной точкой нынешнего обращения взяты образы в картинах испанского художника Сальвадора Дали, воспроизводящие тягучесть, непрерывность и субъективность времени, связанность прошлого, настоящего и будущего, декомпозицию бытия и времени. Картина «Дезинтеграция постоянства памяти» была представлена в 1954 году[4], а фактически это обновлённая и переосмысленная версия картины «Постоянство памяти», написанной художником в 1931 году. Дали, как сюрреалист, погружает зрителей в хаос беспорядочных, мистических снов, кажущихся удивительно реальными. На этих картинах реалистичные морской пейзаж, древо и даже часы сочетаются с трудно воспринимаемыми предметами, вид и композиция которых настраивают на поиск смысла их сосуществования, на их вписанность в сюжет, а также на желание зрителя раскрыть заложенную автором идею картины, понять его модель мира, его онтологию.

На картинах трое часов, символизирующих прошлое, настоящее и будущее. Следуя идеям Гераклита, Дали полагал, что время измеряется течением мысли[5]. Мягкие часы — символ нелинейного, субъективного и произвольно текущего времени. Твёрдые часы — это линейное время, которое само себя как бы съедает[6]. Дерево, как символ античной мудрости, изображено сухим, показывая тем самым отношение Дали к современному её состоянию. Пустынный берег – символ одиночества, а море – символ бессмертия и вечности. В новой картине Дали мягкие циферблаты плавно распадаются, мир расчленён на чёткие блоки, а само пространство находится под водой. Бурные 1950-е годы (ядерная энергетика, кибернетика, космос…) с послевоенной рефлексией и техническим прогрессом позволили Дали в новой картине иначе представить мир и заглянуть в его будущее. Сви-

[1] *Парменид.* «О природе» (с.295) из книги: «Фрагменты ранних греческих философов. Ч.1. От эпических теокосмогоний до возникновения атомистики» / изд. подгот. А.В. Лебедев; отв. ред. И.Д. Рожанский. М.: Наука, 1989. 576 с.
[2] *Родион Мулюков*. Зачем дана нам память? https://www.chitalnya.ru/work/160104/.
[3] AAAI 2025 Presidential Panel on the Future of AI Research. Published March 2025. 88 p.
[4] *Salvador Dalí*: liquid desire / Ted Gott, National Gallery of Victoria. Melbourne: National Gallery of Victoria, 2009. 328 с.
[5] *Кесседи Ф.Х.* Гераклит. М.: Мысль, 1982, 200 с.
[6] *Снежана Петрова*. «Постоянство памяти» Дали. 10.02.2017. https://diletant.media/articles/33996950/.

детелем этого броуновского движения в настоящем является каждый из нас. Так, даже обложка «Отчёта о глобальных рисках за 2025 год»[7] во многом напоминает идею Дали, показывая озабоченность учёных о «распадающемся на части мире» и их устремление к поиску консенсуса.

Интерпретация абстрактной и сюрреалистичной живописи во многом определяется тем опытом, тем контекстом, той сложившейся культурой восприятия и той онтологией, которые сформировались у зрителя, изучающего произведения искусства. Интерпретация это всегда попытка понять или настроить увиденное на своё представление, на свою модель мира. Значительное влияние на это восприятие и его оценку зрителем оказывает доступная информация о статусе художника, его творчестве, его судьбе. Картины – это попытка художника представить свою модель мира, модель той или иной ситуации или проблемы, исходя из своего образного и контекстного её понимания, используя те художественные средства и техники, которые удалось ему освоить. Изобразительный язык художника, как и его онтология, субъективен и уникален, но сложившийся в определённой культуре символьный опыт позволяет зрителю настраиваться на волну художественных смыслов, воспринимать и сопереживать их вместе с автором построенного визуального ряда. Важным посылом для зрителя, для раскрытия ориентира в восприятии им картины является название картины, в котором художник «кодирует» заложенный им смысл и идею своего творчества. Можно предположить, что текстовое описание (название картины) и визуальный ряд (сама картина) хорошо совпадают лишь в голове у художника, а у зрителя картины (у которого своя уникальная онтология) – всё может быть иначе.



«Женщина с подсолнухом» *Наталья Гончарова* (1910).

«Женщина с подсолнухом» *YandexART* (2024).

Третьяковка в Самаре продолжает соединять разные эпохи и художественные течения. На выставке «В круге цвета. Красный» (11.12.2024-30.03.2025) были представлены произведения, в которых красный цвет выступает доминантой. Развитие абстракции, прежде всего супрематизма, раскрыло в красном устремлённость в мир воображаемых утопий. На выставке можно было сравнить авангардные абстракции именитых авторов с тем, что может создавать искусственная нейросеть от Яндекса. Эта нейросеть вобрала в себя примерно 2,3 млрд пар «текст-картинка», где целевой размер набора данных в 303 млн был получен в результате тщательного отсева из почти триллиона изображений[8].

В качестве примера для визуального сопоставления приведены две картины «Женщина с подсолнухом» Натальи Гончаровой и «Улица» Татьяны Мавриной. По этим картинам подготовили промты[9], по которым были сгенерированы рисунки, полученных «глазами» Шедеврума (*https://shedevrum.ai*). Эти текстовые описания работ для имели вид:

- *Промт для картины «Женщина с подсолнухом»*: минимализм, картина маслом, крупные мазки, в красной пустой комнате за зелёным столом сидит женщина в фиолетовом платке, рядом слева на столе стоит ваза с подсолнухами, тусклые тона.
- *Промт для картины «Улица»*: на фоне домов, синий и красный автомобили, повозка с конём, много людей ходит, символизм, детский рисунок крупными мазками гуаши, минимализм.

Именно этим приведённым текстам, словесным описаниям картин соответствуют рисунки, сгенерированные *YandexART* на моделях 2024 года. Как уже отмечалось, у каждого человека в зависимости от его жизненного опыта, настроения, собственной картины мира и освоенного им языка может быть построена своя словесная интерпретация увиденного на картине. Таких интерпретаций картин столько, сколько зрителей, посмотревших их. Т.е. реконструкция зрителем замысла художника всегда индивидуальна. Художник использует язык образов,

[7] *Global Risks Report 2025*. https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/digest/.
[8] Как строили «Шедеврум». 24 мая 2024. https://dzen.ru/a/Zkr3sdF-E1_Wq3Qs.
[9] Промт (от англ. *prompt* — «подсказка») — это запрос, команда или набор инструкций, которые пользователь передаёт нейросети для выполнения определённой задачи.

который не формализован (ни семантически, ни синтаксически) и всегда индивидуален. При этом задачу, которую ставит перед собою художник (автор), всегда связана с воздействием (эмоциональное, психическое, поведенческое…) на зрителя (читателя, слушателя) с передачей ему своего представления о том или ином событии, явлении, ситуации, объекте, субъекте, об идее, прогнозе, фантазии и проч.

Создавая свой посыл зрителю, художник пытается не только раствориться и как бы размножить своё видение (здесь уместна аналогия с графами знаний «Истина»[10] и «Война и мир»[11], где рассматриваемые субъекты стремятся реализовать заложенную природой биологическую потребность в размножении, в захвате доступных ресурсов и в доминировании как в своём виде, так и среди других видов), но и «мозг и душу возбуждать»[12].

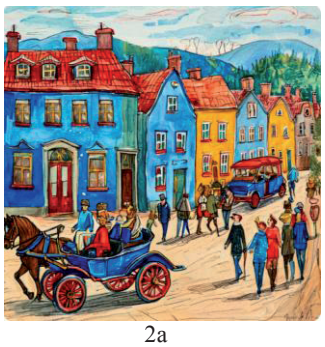
«Улица» *Татьяна Маврина* (1933)

Возвращаясь к промтам от Яндекса на представленные картины, видно, что визуальное их «воплощение» *YandexART* в стилевом решении отличается значительно, что объясняется содержанием используемого набора данных. При этом стоит отметить соответствие сгенерированных рисунков названию полотен авторов.

«Улица». *YandexART* (2024)

Было интересно проверить «работоспособность» этих промтов на наборах данных Яндекса в 2025 году, проведя повторные эксперименты. На рисунках, представленных ниже, сделаны четыре попытки генерации рисунка по промту «Улицы» и пять – по промту «Женщина с подсолнухом». Видно, как в первом случае алгоритм Яндекса произвольно изменяет приоритеты в расположении объектов (на рисунке 1а красного автомобиля нет, а на 4а нет повозки с конём), а во втором случае изменяется положение женщины за столом (на рисунке 3б она смотрит на зрителя, а на 4б повернулась к нему спиной, на остальных она смотрит на вазу с подсолнухами).

1а



2а

3а

4а

«Улица». Эксперименты с *YandexART* (2025)

1б

2б

3б

4б

5б

«Женщина с подсолнухом». Эксперименты с *YandexART* (2025)

Многослойность, многоплановость и многозначность содержания картин и передаваемого художником смысла могут у людей с разной культурной традицией, находящихся в разных эмоциональных состояниях, по-разному восприниматься и интерпретироваться. Если в понимание текстов есть робкие попытки выстроить некие теории (например, герменевтика),

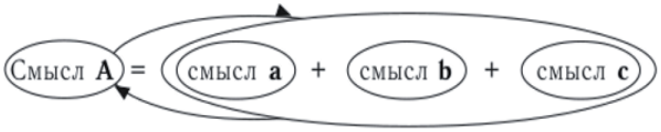
[10] *От редакции.* Что есть истина? *Онтология проектирования*. 2023, №4(50). С.469-473.
[11] *От редакции.* Война и мир: онтологические основания. *Онтология проектирования*. 2022, №1(43). С.5-10.
[12] *И.В. фон Гёте*. ФАУСТ. Перевод В. Гриба. https://www.literatur-viktor-prieb.de/Faust-Uebersetzung-Original.html.

способные помочь в передаче смысла, то в интерпретации увиденного всё намного сложнее. Лишь единый культурный код, ограниченный и однозначно толкуемый набор понятий позволяет прийти к пониманию передаваемой информации.

Герменевтический круг — метафора, описывающая процесс понимания в герменевтике, принцип, согласно которому понимание целого невозможно без понимания частей (см. рисунок и поясняющий текст). Понимание происходит за счёт взаимного согласования целого и частей[13]. Важные особенности герменевтического круга включают:

- процесс понимания не может быть завершён, повторное возвращение от целого к части и от частей к целому меняет и углубляет понимание смысла части;
- интерпретация связана с ситуацией интерпретатора, так как человек может построить историю только на основе конкретного набора обстоятельств, в которых он находится.

Древние греки считали, что способность понимать зависит от предубеждений и предрасположенностей. Человек обладает определённым уровнем «предварительного понимания», который включает предпочтения, предрасположенности и предубеждения[14].



«Как получается, что мы можем понимать только последовательно, одно за другим, а не всё в целом? Как можно понять отдельное, если оно опирается на понимание целого? Из этого круга нет выхода: я могу понять **a, b, c** только через **A**, но само это **A** – только посредством **a, b, c** и т. д. – но выхода нет только в том случае, если мыслить «**A**» и «**a, b, c**» как противоположности, которые взаимно обусловливают друг друга и служат друг для друга предпосылками, если не признаётся их единство, так что **A** не производится из **a, b** и **c** и не образуется посредством их, но и само предшествует им и пронизывает их таким образом, что **a, b** и **c** – это не что иное, как индивидуальные представления единственного **A**».

Аст Ф.. «Основные черты грамматики, герменевтики и критики» (1808). Оригинал на немецком. *Friedrich Ast*. Grundlinien der Grammatik, Hermeneutik und Kritik. Landshut. 1808. 227 p.

Герменевтический круг (попытки визуализации)

Мартин Хайдеггер использовал понятие герменевтического круга, утверждая, что для лучшего понимания произведения искусства необходимо знать о художнике и о сущности понятия «искусство». Искусство и художник существуют в развитии, где искусство отделено от произведения и его создателя, но выступает источником для них. Результат творчества нужно рассматривать в контексте мира, а не только в контексте художника[15]. Упрощённая схема того, как работает герменевтический круг, представлен на рисунке. «Текст» на схеме представлять всё, что мы пытаемся изначально понять.

Этот круг может использоваться также и как затягивающая воронка навязываемой информации. В теории средств массовой информации есть понятие эхо-камера, представляющее собой ситуацию, в которой определённые идеи усиливаются путём передачи сообщения и его повторением, заглушая другие информационные потоки. При этом любые высказывания аудитории приводят лишь к поддакиванию и поддержке. Особенно ярко эффект эхо-камеры распространяется в Интернете. Поисковые и социальные сети персонифицированы. Исходя из онлайн-поведения пользователя, системы выстраивают результаты поиска, а участник Интернет-сообщества окружает себя голосами тех участников, которые придерживаются той же точки зрения. Это усиливает систему убеждений пользователя, одновременно искажая картину действительности[14].

Возвращаясь к истокам художественного творения М. Хайдеггера, который изложил своё понимание в знаменитом эссе[16], важно представить умозаключение философа в виде некой структуры. Попытка такой упрощённой реконструкции представлена в форме графа.

---

[13] *Шестова Е.А.* Герменевтический круг. Большая российская энциклопедия. 1 июня 2022. https://bigenc.ru/c/germenevticheskii-krug-9be888.

[14] *Massimo Pigliucci*. The (hermeneutic) circle of understanding. From Ancient Greece to modern echo chambers—A guide to better thinking. Jan 22, 2025. Paid. https://substack.com/home/post/p-152577098.

[15] *Хайдеггер М.* Исток художественного творения / Пер. с нем. Михайлова А.В. (Философские технологии: философия). М.: Академический проект, 2008. 528 с.

[16] *Martin Heidegger*. THE ORIGIN OF THE WORK OF ART. Translated by Roger Berkowitz and Philippe Nonet. Draft, December 2006. PN revised.

Упрощённая попытка реконструкции эссе М. Хайдеггера «Происхождение произведения искусства» или «Исток художественного творения» в форме графа знаний[17]

Количество интерпретаций любого философского текста всегда стремится к бесконечности, данное эссе не является исключением. По Хайдеггеру происхождение произведения искусства означает, откуда и благодаря чему вещь является тем, чем она является; констатируется круговой путь мышления от работы к искусству и наоборот; отмечается вещественность и символизм произведения искусства.

В этой схеме не учтены важные постулаты Хайдеггера, касающиеся динамики процесса, его историчности. Исходный текст эссе Хайдеггера написан на немецком языке, и его перевод разными авторами на английский и русский потребовал от них значительной находчивости в формировании новых слов, чтобы приблизить текст к оригиналу. В противном случае пришлось бы полностью переписывать авторский текст, используя набор уже устоявшихся в языке слов. Представленная реконструкция не претендует на точное воспроизведение идей Хайдеггера, изложенных в его эссе. Важно выделить и зафиксировать те ускользающие традиционно у многих философов связи и отношения между понятиями, проследить некую последовательность (не алгоритмическую, но хотелось бы), которая позволила бы приблизить результат философских умозаключений к необходимой прагматике. Для примера различия культурных и языковых традиций можно привести такие термины и словосочетания как вещность и служебность, дельность изделия, бытийствует бытие, отъятие мира, несокрытость, созданность, незатворенность, разверстость, воление, здесьбытие и вершина сложного в содержании и наполнении: *Dasein* – быть там, присутствие, вот-бытие. Нужны значительные усилия для трактовки этих слов на языки других культурных сред. В частности, для инженерии.

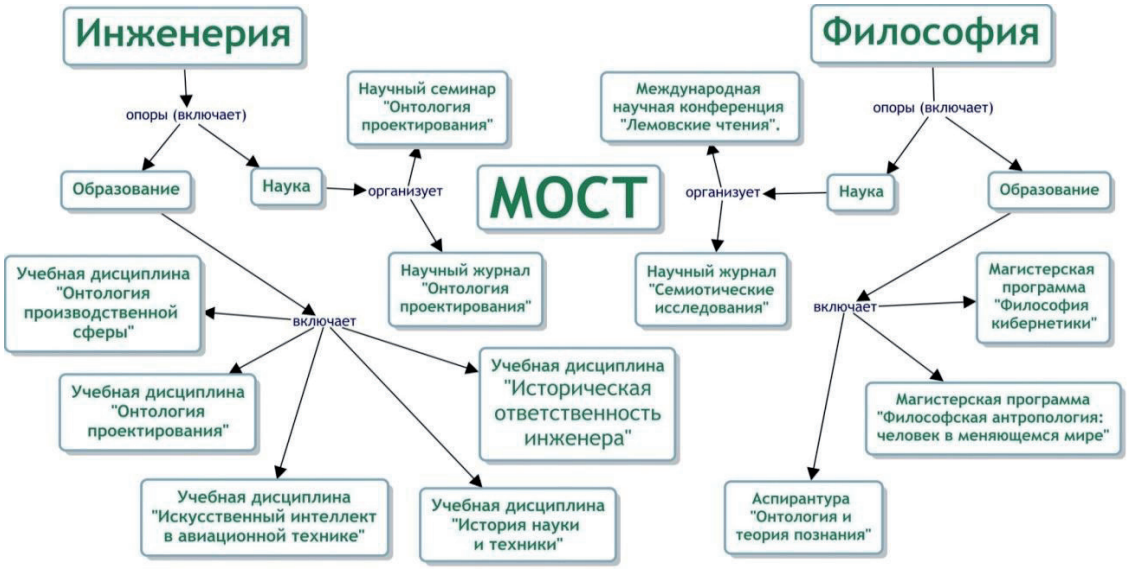
Объединяющие онтологии

Онтологии как модели мира, модели предметных областей способны объединить людей и машины. Это объединение важно сначала осуществить в понимании друг другом людей, разделённых предметными областями, и лишь затем включить в эту информационно-знаниевую связь создаваемые автономные артефакты.

3–5 апреля 2025 года в г. Екатеринбурге в рамках **X** Международного конвента «Гуманитарные векторы технологического лидерства России» на площадке Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина проходила Международная научно-практическая конференция «Инженерное мышление: техническая реальность и новые онтологии». На секции «Онтологические сдвиги в техническом мышлении: мост между инженерией и философией» был представлен доклад «Мост между инженерией и философией: проблемы и решения»[17], в котором приведён опыт Самарского университета в строительстве и функционировании этого моста.

[17] Схемы из доклада Н.М. Боргеста «Мост между инженерией и философией: проблемы и решения» на Международной научно-практической конференции «Инженерное мышление: техническая реальность и новые онтологии». Екатеринбург, УрФУ, 4 апреля 2025 г. https://ssau.ru/news/24108-prepodavateli-universiteta-prinyali-uchastie-v-mezhdunarodnom-konvente-posvyashchennom-voprosam-svyazi-filosofii-i-inzhenerii.

В любой развивающейся профессиональной области складывается свой язык, на котором общаются специалисты. Информационные технологии, инженерия и философия сформировали не только языки, но и выработали свои стили коммуникаций и изложения текстов. Потребности специалистов компьютерных наук и философии во взаимном обмене и обогащении знаниями накладывают ограничения на используемые языки и формы коммуникации. Обычно философы, «парящие на вершинах» человеческой мысли и оперирующие понятиями как облаками без границ, не ищут прагматики в своих умозаключениях. В то время как инженерам, представителям технической сферы, важно структурировать и формализовать знания, выработать язык коммуникации и трансляции этих знаний. Всегда трудно перейти на другой уровень, другую форму восприятия действительности с другим языком и сложившейся профессиональной культурой. Но такие коммуникационные мосты, соединяющие разделённые «плотиной» уровни представления знаний и самого его содержания, необходимы, а продолжающаяся дифференциация науки не может быть продуктивна без интеграционных, философских основ. Роль философии в проектировании, в моделировании будущего только возрастает. И это будущее во многом зависит от инженеров, тех, кто превращает свои знания в новые артефакты, изменяющие нашу жизнь. Творческий союз инженеров и философов важен, т.к. широта и глубина философских знаний востребована при построении семантических и математических моделей для будущих систем искусственного интеллекта.



Опыт Самарского университета (фрагмент) в строительстве моста между философией и инженерией по материалам научных семинаров, чтений, журналов и образовательных программ и дисциплин[17]

В номере

В разделе «*Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование*» рассмотрены: онтология проектирования с позиций трансдисциплинарного подхода (**Москва**); метрики и закономерности развития пассажирской авиации (**Жуковский**).

В разделе «*Прикладные онтологии проектирования*» рассмотрены: онтологический подход к цифровизации медицинских осмотров и диспансерного наблюдения (**Самара**); комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве (**Санкт-Петербург**); прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений (**Самара**); онтология компьютерного тестирования в обучении (**Самара**).

В разделе «*Инжиниринг онтологий*» рассмотрено использование онтологий для контекстуализации запросов к большим языковым моделям (**Апатиты**).

В разделе «*Методы и технологии принятия решений*» рассмотрены: метод упорядочения альтернатив на основе заданных норм (**Санкт-Петербург**); третьи формы конъюнкции и дизъюнкции в логиках с векторной семантикой (**Иркутск**); выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола (**Железногорск-Красноярск**); система поддержки принятия решения для выбора профиля обучения (**Уфа**).

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！

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 001.8, 001.4, 004.896 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-163-173

Об онтологии проектирования с позиций трансдисциплинарного подхода

© 2025, А.М. Фаянс

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

Аннотация

Представлен трансдисциплинарный подход к выявлению особенностей и места онтологии проектирования в научной картине мира на основе использования формулировок, связанных с местом понятия в структуре науки. Утверждается, что данный подход дополняет дисциплинарный и междисциплинарный подходы, позволяя проверять, уточнять полученные и формировать новые результаты. Предложена процедура, позволяющая в общем случае разделить полностью формализуемые (компьютеризируемые) и неформализуемые построения. Описан процесс решения сложных задач, существенной составляющей которого является построение онтологии. Следование предлагаемому процессу приводит к выводу о симбиозе и синергии творческих, неформализуемых возможностей человека и возможностей технических средств, реализующих формализуемые процедуры. Показано применение предлагаемого процесса к сложным многоаспектным системам, рассматриваемым на общем уровне.

Ключевые слова: *онтология, проектирование, формализация, трансдисциплинарный подход, технология решения задач.*

Цитирование: *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.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Многоплановость и разнообразие процедур проектирования указывает на возрастающую потребность практического использования онтологий как на самом высоком уровне обобщения, так и на уровне предметных областей (ПрО). Поэтому появление научного направления онтология проектирования (ОП) представляется вполне закономерным. При исследованиях такого уровня обычно используются дисциплинарный и междисциплинарный подходы (единство этих подходов обозначено как ДП) и трансдисциплинарный подход (ТП) [1, 2].

ОП посвящён ряд фундаментальных статей [3–8], в которых обобщён накопленный в этой области научный и практический опыт. Изложенные в них результаты отражают представление об онтологиях и процедурах, связанных с проектированием, на дисциплинарном и междисциплинарном уровнях в рамках существующей на данный момент дифференциации наук [3, с.8]. Отмечено, что «онтология проектирования, её понятийный аппарат, её базовые принципы инвариантны к предметной области» [3, с.10], указана связанность рассматриваемого направления с Абсолютом Знаний [4, с.14]. Оставаясь в рамках ДП, невозможно конструктивно ответить на ряд вопросов с позиций Абсолюта Знаний, отражающего в системе

знаний понятие Всеобщего[1] (взгляд «сверху»). ТП открывает возможность анализировать полученные результаты, формализовать нахождение слабых и сильных сторон, установить место теоретических построений[2] в целостной научной картине мира. ТП включает конструктивные процедуры обобщения, анализа, синтеза и конкретизации [9]. Следование ТП позволило сформировать структуру высшего уровня целостной картины, выделить ключевые задачи, образующие базис во множестве возможных задач, систематизировать общие методы решения любых задач [10]. ТП и ДП имеют много общего, но ДП следует от частного к общему, а ТП – от общего к частному. ТП через конструктивное обобщение позволяет разобраться в причинах, обусловливающих существование понятий и их связей, определяющих объект исследования.

1 Основные понятия онтологии проектирования

1.1 Понятие «онтология»

Коммюнике онтологического саммита 2021 года [11] определяет онтологию, как «*модель*, которая представляет вещи и отношения между ними, актуальные для определённой цели». Философский энциклопедический словарь[3] толкует онтологию, как «учение о бытии, как таковом, раздел философии, изучающий фундаментальные принципы бытия». ГОСТ Р 59277-2020 [12] определяет онтологию, как формализованное представление набора наименований понятий в ПрО и отношений между этими наименованиями понятий.

Абстрагирование от привязки толкования онтологии к понятию цели, при сохранении философского содержания, как учения о фундаментальных принципах бытия, приводит к пониманию онтологии, как *формализованному представлению, объективно и конструктивно отражающему сущность бытия, вещи и отношения между ними* вне зависимости от их практической значимости. Онтология, по сути, есть отражение континуальных отношений в целостном Всеобщем на счётное множество понятий, которым оперирует человек. Онтология представляется как конструктивная система отсчёта, позволяющая определить местоположение вещей, отношений, процессов, иных единичных и их классов в бытии Всеобщего. Это открывает возможность оперировать с понятиями, используя аппарат логики.

Основным назначением онтологии следует считать предельно достижимую формализацию в целостной картине вещей и отношений. Это позволяет сконцентрировать познавательную и практическую деятельность человека на творческом[4] осознании, осмыслении и максимально полном использовании накопленного опыта, применяя для этого формализуемые системы, в частности, системы с искусственным интеллектом. В отличие от методологии (согласно [14] – «организация деятельности») онтологию можно рассматривать, как средство для организации деятельности.

1.2 Понятие «проектирование»

Проектирование в философии[3] определяется как «один из основных … способов создания техники и других изделий и сооружений… Один из основных … механизмов, обеспечи-

[1] Всеобщее – закон существования, изменения и развития особенных и единичных явлений в их связи, взаимодействии и единстве. https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/1990/ВСЕОБЩЕЕ).
[2] Здесь под построением понимается система мыслей, рассуждений. https://dic.academic.ru/dic.nsf/dmitriev/3984/построение.
[3] Философия. Энциклопедический словарь. Под ред. А.А. Ивина. М.: Гардарики. 2004.
http://philosophy.niv.ru/doc/dictionary/encyclopedic/articles/910/ontologiya.htm.
[4] Творчество - деятельность, порождающая нечто качественно новое и отличающееся неповторимостью, оригинальностью и общественно-исторической уникальностью [13, с.1185]. С позиций ТП [9] понятию «творчество» отвечает выход деятельности активного мыслящего единичного за пределы действий, априори регламентированных для этого единичного.

вающий связь производства с потреблением». Термин «проектирование» встречается в педагогике, образовании, социологии, генетике, инженерной психологии и т.д. В [13] проектирование толкуется, как «процесс создания проекта – прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта, состояния».

Проектирование восходит к слову «проект» (от лат. *Projectus* — брошенный вперёд), которое согласно [13] имеет три значения: а) совокупность документов для создания изделия, состояния, б) предварительный текст какого-либо документа, в) замысел, план. В [15] проект определяется как «комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленный на создание уникального продукта или услуги в условиях временных и ресурсных ограничений».

Часто под проектом понимают технические и общественные крупные задачи, а также художественные, в основе которых лежат литературные, изобразительные, драматургические или иные замыслы. При этом становится очевидным такой аспект проекта, как его общественная значимость. В общем случае этот аспект может быть и не свойственен задаче. Поэтому проект – это вид задачи, отвечающей социально значимой потребности, характеризующейся множеством аспектов рассмотрения и разнообразием их связей.

В общем случае удовлетворение потребности, порождающей задачу, проходит через ряд стадий [9]: 1) осмысление потребности (в данном случае – это требования к проекту, действующие и возможные ограничения) и возникновение замысла по удовлетворению этой потребности; 2) сбор информации; 3) постановка задачи (сформулированная потребность, условия решения, требования к решению и его качеству; 4) выявление метода решения; 5) формирование и использование средств выполнения метода; 6) выполнение действий метода; 7) сбор результатов применения метода; 8) анализ результатов; 9) выводы (формирование новых задач, в т.ч. и корректировка исходной постановки задачи); 10) сохранение результатов полученного опыта.

Особенностью проекта, кроме выраженной социальной значимости, является оформление технического задания (ТЗ), нацеливающего на согласованную деятельность создаваемой под проект организационной структуры, ориентированной на его реализацию и эксплуатацию, а также наличие соответствующей документации, отвечающей каждой стадии проекта.

Отсюда, *проект есть задача, отражающая единство: а) целенаправленного общественно значимого замысла с явно выраженными качественно и/или количественно определимыми целями; б) реализации этого замысла; в) документального оформления задачи и результатов каждой стадии её реализации.* Конструктивная определимость целей позволяет установить факт завершения (или прекращения) проекта. Отсутствие признаков б) и/или в) делает проект незавершённым. В той же степени, в какой можно говорить о типовой (многократно возникающей) потребности и порождаемой ею задаче, можно говорить и о типовом проекте.

Процесс проектирования соответствует стадии выполнения проекта, выявлению потенциально реализуемых методов и средств, приводящих к достижению указанных в проекте целей. Отсюда ОП есть *формализованное представление, отражающее сущность и структуру задачи (проекта) и нацеленное на систематизацию выявления и/или выработки путей реализации и/или эксплуатации результатов решения задачи (проекта)*, включая и необходимые для этого связи, *и возможные методы решения задач проекта.*

1.3 Формализация при проектировании

Вопросы, связанные с формализацией, касаются всех стадий решения задачи. Рассмотрение специфики формализации с позиций ТП позволяет указать следующие её особенности.

- Для формализации требуется определённость (устойчивая повторяемость событий и связей).
- По мере роста неопределённости степень формализуемости падает.
- Индивидуальные, уникальные, неповторяющиеся события и связи принципиально неформализуемы.
- Только при возможности формализации можно говорить о соответствующей технологии.
- С позиций степени временны́х требований к актуальности потребности последние делятся на оперативные, тактические и стратегические, рассматриваемые соответственно на краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных промежутках. По мере увеличения промежутка времени влияние факторов неопределённости

растёт, а возможности формализации снижаются. Наличие тактических потребностей обусловливает существование оперативных потребностей, а наличие стратегических потребностей обусловливает существование как тактических, так и оперативных потребностей. Это указывает на иерархию потребностей.

- Из общих методов решения задач [10] в условиях полной неопределённости могут быть использованы только естественные методы, интуиция и некоторые опосредованные методы, в т.ч. опирающиеся на модели, которые могут формироваться в процессе обучения и/или адаптации. Применение прочих общих методов требует полной формализации описания и оперирования с ними.
- Решение частично формализуемых задач достигается комбинированием методов, основанных на интуиции, и формализуемых методов.
- В методе решения по частям используются процедуры комбинирования. Для анализа таких процедур необходимо выявление комбинируемых составляющих. Это сводится к построению онтологий потребности и рассматриваемого метода. Каждая из комбинируемых составляющих может быть исследована на предмет синтеза её возможных реализаций при условии её непротиворечивости с остальными составляющими (достижение консенсуса).

Предельно достижимая степень формализации определяется потенциальной возможностью *переложить на конечные автоматы* выполнение любой стадии задачи. Если проект или процедуры проектирования полностью формализуемы, то они могут выполняться в автоматическом режиме.

Искомую границу формализации определяет применимость понятия «*творчество*», уникального неформализуемого явления, результат которого способен стать общим достоянием, в т.ч. и вполне формализуемым, своего рода товаром, имеющим спрос[5]. Творчество, как правило, неразрывно связано с навыками – формализованными элементами деятельности, на которые опирается и от которых во многом зависит творчество.

Творческие способности индивидуальны, их можно и нужно развивать, используя примеры проявления творчества, как средства развития. Активным стимулом к творческому росту является нахождение в творческой среде, живое общение с творческими личностями. Для развития интуиции имеются и специальные методики (например, [16]).

Одним из значимых неформализуемых признаков является способность нести ответственность за результат деятельности, в т.ч. за эффективность использования ресурсов. Нетворческим моментам, напротив, присуще использование решений, ответственность за результат которых либо несущественна, либо априори приемлема при автоматическом выполнении действий и процедур в заранее указанных границах. Выход из этих границ предполагает использование творческих процедур.

При переходе от оперативных к тактическим и, далее, к стратегическим проектам имеет место рост ответственности за последствия принимаемых действий. Это обусловливает и степень необходимости использования неформализованных или принципиально не формализуемых процедур.

2 О технологии проектирования

Принятое толкование технологии[6]: «совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, форм сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции; научная дисциплина, изучающая физико-химические, механические и другие закономерности, действующие в технологических процессах. Технологиями также называются операции добычи, обработки, транспортировки, хранения, контроля, являющиеся частью общего производственного процесса». Это определение дополня-

[5] Отношение между творчеством и его формализованной реализацией точно выражено А.С. Пушкиным в его стихотворении «Разговор книгопродавца с поэтом»: «Не продаётся (т.е. не формализуется) вдохновенье, но можно рукопись (результат) продать».

[6] Новая философская энциклопедия: В 4-х томах. Под ред. В.С. Стёпина. М.: Мысль. 2001. https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/9217/ТЕХНОЛОГИЯ.

ется тем, что «в состав технологии включается и технический контроль производства. Технологией принято также называть описание производственных процессов, инструкции по их выполнению, технологические правила, требования, карты, графики и др.»[7].

Согласно ТП *технология – это тиражируемая, в определённой степени формализованная, логически связная совокупность действий (методов), приводящая к решению задачи, с использованием средств реализации этих действий (методов).*

Такое толкование обеспечивает однозначность на высшем уровне обобщения, допуская множественные частные варианты, указанные в известных определениях. При этом оно указывает на необходимость разделения понятий «технология», «технологический процесс» (*порядок использования, в частности, эксплуатации средств реализации технологии*), «технологическая документация» (*выполненные в соответствии со стандартами информационные материалы, обеспечивающие возможность воспроизведения, в частности, тиражирования рассматриваемой технологии и/или технологического процесса с достижением желаемого конечного результата*), «дисциплина, изучающая технологические процессы».

Технология предполагает выполнение определённых действий. В этом случае используемые методы могут носить искусственный характер (см. [10]), хотя вполне допустимо и использование естественных методов (например, временна́я выдержка при сушке древесины в процессе изготовления музыкальных инструментов).

Детализацию процесса проектирования технологии целесообразно выполнять на основе общих методов решения задач. Поскольку проектирование связано с временны́ми, финансовыми, материальными и иными ограничениями, то предпочтение следует отдавать: 1) методам, известным из опыта, 2) непосредственным методам, 3) опосредованным методам [10].

В сложных проектах, характеризующихся множеством тесно связанных между собой и качественно различающихся признаков, на первое место выдвигается метод решения задачи по частям (декомпозиция задачи), что требует построения соответствующей онтологии. В этом случае открывается потенциальная возможность достижения симбиоза и синергии решений разных задач проекта. Условием синергии становится допустимость совместного использования одних и тех же действий (методов) в процессах проектирования, реализации проекта и его функционирования.

На рисунке 1 представлена предлагаемая структура технологии. Номера на этом рисунке указывают рекомендуемый порядок рассмотрения задач и методов, в основу которого положено убывание значимости области рассмотрения, а также возрастание временны́х и иных затрат ресурсов на выработку и использование методов. ТЗ соответствует постановке задачи, отвечающей проекту. Рисунок 1 отражает технологию синтеза на основе комбинирования базовых методов, но рекомендуемое ранжирование имеет значение в процессе выбора комбинируемых составляющих. Схема на рисунке 1 допускает, в случае необходимости, многократные, в т.ч. и рекурсивные возвращения к пройденным стадиям.

Важным представляется учёт морально-нравственной стороны потребности, вызывающей к жизни проект: нацеленность его на поддержание и усиление *гармонии* (в смысле, указанном в [17]: баланс между возникновением, существованием и исчезновением единичных во Всеобщем) или, напротив, на её ослабление и разрушение. По мере перехода от оперативной к тактической и, далее, к стратегической сторонам проекта морально-нравственная сторона становится всё более существенной. При этом следует отдать предпочтение нацеленности на поддержание и усиление гармонии.

Процедура проектирования соответствует технологии ТП, образованной следующими стадиями:

1) однозначная формулировка и анализ используемых понятий и их связей;

[7] Большая советская энциклопедия. Технология. https://gufo.me/dict/bse/Технология.

2) родовое обобщение путём исключения менее существенных признаков и/или разделение на связанные составляющие, а также анализ каждой из них; при необходимости переход к стадии 1;

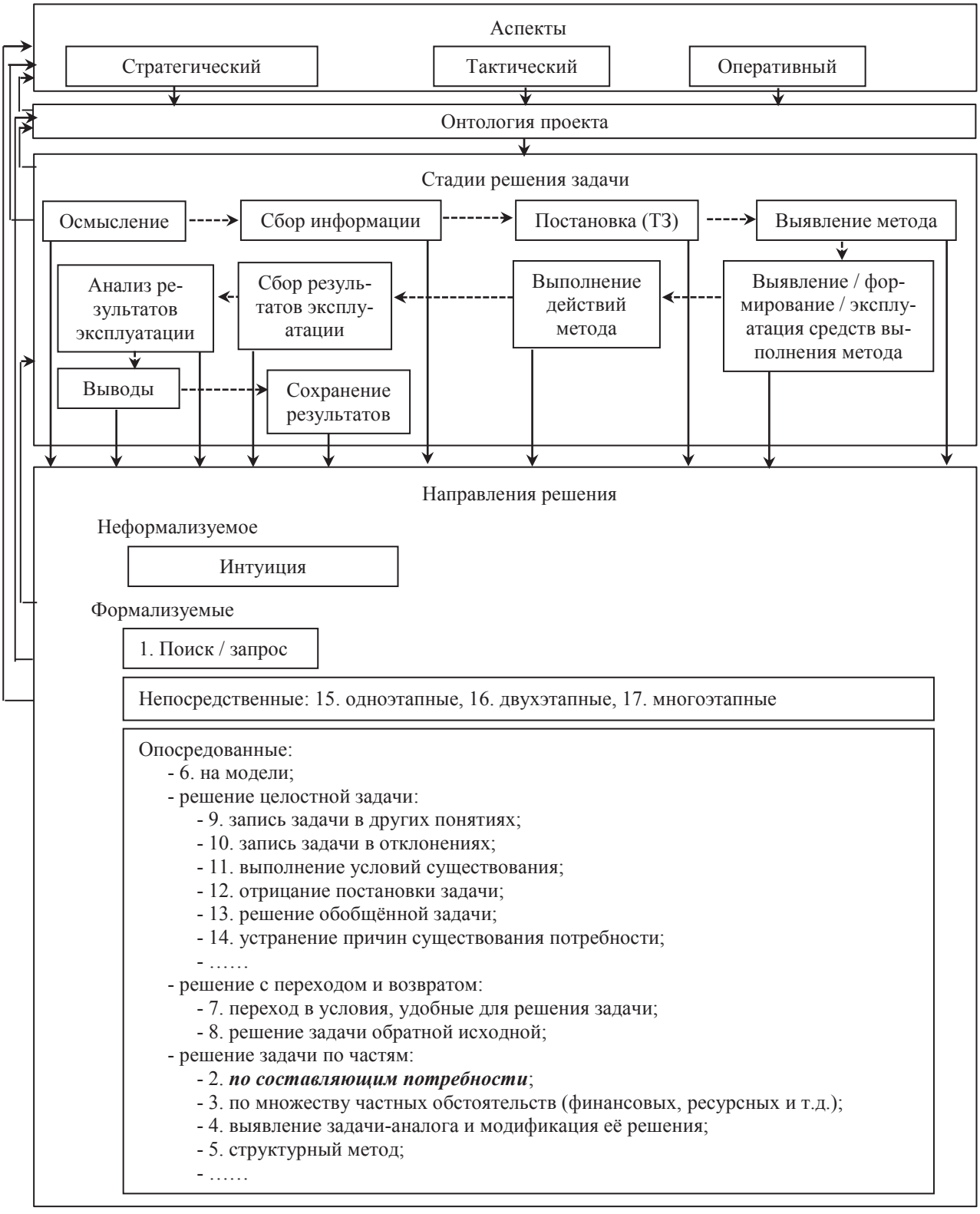


Рисунок 1 - Рекомендуемый порядок формирования технологии решения задачи

3) формирование онтологической схемы понятий, их связей и способов комбинирования; определение открывающихся возможностей, начиная с высшего уровня обобщения, на котором число рассматриваемых признаков минимально; фиксация позиций понятий и связей в целостном построении;
4) многократный дедуктивный переход к разновидностям понятий и фиксация отмечаемых видовых признаков, уточнение формулировок рассматриваемых разновидностей; расширение онтологической схемы; процедура дедуктивного перехода может заканчиваться как на уровне исходных формулировок, так и продолжаться далее;
5) определение возможностей синтеза на выделенном уровне рассмотрения, возникающих ограничений на связи отдельных признаков и их фиксация; при необходимости переход к стадии 4 или к стадии 1.

Только творческий подход позволяет предварительно оценить с позиций гармонии последствия реализации проекта и, учитывая ответственность за последствия, выработать сбалансированное решение.

Отсюда, процесс проектирования, равно как и реализация проекта, качественно реализуем только в рамках симбиоза и/или синергии как формализуемых, так и неформализуемых построений на основе интуиции.

3 Понятийный анализ сложных многоаспектных систем

Сложные многоаспектные системы получили название «крупномасштабные системы» (КС)[8], где масштаб в основном определяется значительным территориальным разбросом компонент системы и её общественной значимостью. Специфика КС состоит в наложении друг на друга множественных аспектов. Это позволяет использовать КС для иллюстрации рассматриваемой в данной статье технологии [18].

КС определяют, как «класс сложных (больших) систем, характеризующихся комплексным (межотраслевым, межрегиональным) взаимодействием элементов, распределённых на значительной территории, требующих для развития существенных затрат ресурсов и времени». Выполняя в соответствии с ТП процедуру обобщения путём поэтапного отсечения в приведённом определении менее значимых признаков, можно прийти к родовым признакам высшего уровня обобщения. Искусственная система – «совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует определённую целостность, единство»[9]. При этом выявляются задачи, актуальные для любых искусственно образованных единичных, а именно: создания; обеспечения их существования в требуемом режиме функционирования; ликвидации в случае необходимости в рамках ограничений (априори заданных и, возможно, впоследствии корректируемых) на сроки создания, существования и ликвидации, а также определение затрат, необходимых для решения этих задач, и выделения соответствующих средств.

Место понятия «система» определяется последовательностью: Всеобщее → единичное → множество единичных → связь (взаимосвязь) единичных → целостная совокупность связанных (взаимосвязанных) единичных. Остальные признаки можно рассматривать, как результат конкретизации, применяемой к понятию «система». Так, в приведённом определении КС размер указывается в качестве уточнения понятия сложности, равно, как и комплексность, межрегиональность и межотраслевой характер. В определении также указываются ограничения на затраты, производимые исключительно в целях *развития* КС, но упускаются процессы создания, обеспечения функционирования и ликвидации системы.

Признаки, указанные в определении в качестве конкретизирующих, могут выступать в качестве самодостаточных понятий (например, сложность). В этом случае логичней было бы говорить не о конкретизации, а о комбинировании понятий.

[8] Лаборатория крупномасштабных систем ИПУ РАН. https://www.ipu.ru/node/11906.
[9] Философская энциклопедия. Система. https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/3310/СИСТЕМА.

Анализ, выполненный с позиций ТП, позволил выявить перечень признаков КС, который включает следующие обозримые, конкретизирующие, независимые или находящиеся в иерархическом подчинении и конъюнктивных (соединительных) отношениях признаки:

- *многоаспектность целей* и, следовательно, их множественность со своими внутренними связями;
- *сложность* («свойство системы или компонента, имеющих устройство, исполнение или поведение, трудные для понимания или верификации со стороны субъекта»[10]; следование ТП приводит к трактовке сложности, как наличию в описании объекта множества независимых характеристик);
- *значительный размер системы* (наличие огромного числа элементов и связей);
- динамическое и статическое *взаимодействие* элементов (существенное взаимное влияние элементов друг на друга или их полное слияние);
- *комплексность* (полнота, системность рассмотрения[11]);
- *многообразие продолжительностей жизненных путей*, относящихся как к системе, так и к её элементам и связям (здесь под жизненным путём понимается последовательность этапов: появление определённого единичного, развитие, существование, деградация или модернизация, исчезновение);
- *межотраслевой характер* (отнесение характеристик~~и~~ элементов к разным отраслям деятельности);
- *разбросанность* элементов системы на значительной территории, и, как частный случай разбросанности, их *межрегиональный характер* (особенности элементов отражают специфику разных регионов и развитых в них видов деятельности);
- существенные финансовые, материальные и людские *ресурсы*, требуемые для создания, функционирования и ликвидации КС;
- существенные *затраты времени* на создание и обеспечение функционирования КС (при этом размеры выделяемых затрат ограничены ресурсами, выделенными на нужды КС, имеющимися возможностями и целесообразностью их выделения, исходя из имеющейся потребности);
- *многообразие внутренних и внешних факторов* (случайных, устанавливающих степень неопределённости в системе, и регулярных), препятствующих желаемому функционированию процессов создания и обеспечения существования системы.

Упоминание деятельности в перечне признаков отражает активное участие человека, как элемента или элементов КС.

Приведённая совокупность признаков, рассматриваемая в неразрывной целостности, позволяет определить понятие КС, как единство множества задач, отвечающих перечисленным признакам и связанных общей потребностью. Полнота перечня признаков в соединении с полнотой этапов жизненного пути является основанием для выявления связанных между собой задач, решение которых обеспечивает создание КС, обладающей требуемой функциональностью при заданных ограничениях, её существование и ликвидацию. Управление при этом рассматривается как один из возможных путей решения упомянутых задач (здесь управление - это *искусственный метод решения задачи, существенно использующий воздействия на объект и/или на среду*). Приведённое определение управления отличается от определений, встречающихся в литературе, например, в [19].

Таким образом, КС – *класс сложных систем, распределённых на значительной территории, характеризующихся необходимостью комплексного учёта многоаспектности, тесного взаимодействия элементов и многообразия продолжительности их жизненных путей, трансотраслевого и трансрегионального характера создания и существования системы, необходимости выделения на нужды системы значительных (в т.ч. финансовых и временных) ресурсов, а также способностью систем этого класса отвечать своему предназначению в условиях влияния многообразных мешающих факторов*.

Потребность, вызывающая к жизни КС, носит стратегический, долговременный характер, хотя имеет тактические и оперативные аспекты. Это приводит к необходимости

[10] ГОСТ Р МЭК 61513-2011. Атомные станции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования. https://docs.cntd.ru/document/1200089290.

[11] Энциклопедический словарь экономики и права. Комплексность. https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_economic_law/6384/КОМПЛЕКСНОСТЬ.

рассмотрения на всех этапах жизненного пути КС соответствующей иерархии. Условия, в которых возникает стратегическая потребность, стационарны или допускают вариации, не приводящие к исчезновению потребности или блокированию целесообразности её реализации. Относительно тактических потребностей вполне допустимы и их более значительные вариации, которые, приводя к определённым потерям, находятся в рамках допустимых значений. Условия возникновения и удовлетворения оперативных потребностей могут различаться существенно и удовлетворяться, не требуя слишком значительных затрат.

Следствием сказанного является особая значимость фактора ответственности за принимаемые решения. Отсюда обязательное наличие человека в качестве элемента КС на стратегическом и тактическом уровнях. Такое наличие не является обязательным при условии полной формализации процессов в соответствующей подсистеме КС. Использование человеческого ресурса допускает как жёсткую организационную иерархию, так и коллективные методы выработки и принятия решений [20].

Для создания и функционирования КС требуются стратегическое, тактическое и оперативное распределение и перераспределение выделяемых ресурсов, корректировка сроков решения задач для повышения эффективности использования результатов решения.

Перечисленные особенности могут быть использованы для синтеза и обеспечения функционирования любых многоаспектных систем.

Заключение

Рассмотрена возможность осуществления на основе ТП познавательной процедуры выявления места онтологии проектирования и связанных с ней элементов в научной картине мира. Представленный переход от понятийного анализа к выявлению основ технологии, требуемой для выполнения проекта, позволяет разделить роли творческих (неформализуемых) и формализуемых стадий и указать возникающие при этом связи.

Проектирование представляет собой симбиоз и синергию творчества и формализации с учётом стратегических, тактических и оперативных целей, для достижения которых предназначен проект. ОП позволяет формализовать организацию соответствующих процессов.

Список источников

[1] 1st World Congress of Trandisciplinarity // Convento da Arrábida. Portugal. November 2-6. 1994. https://web.archive.org/web/20041205093617/http://perso.club-internet.fr/nicol/ciret/english/charten.htm.

[2] ***Князева Е.Н.*** Трансдисциплинарные стратегии исследований. *Вестник Томского государственного педагогического института* (ТГПУ). 2011. 10(112). С.193-201.

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

[4] ***Боргест Н.М.*** Ключевые термины онтологии проектирования: обзор, анализ, обобщения. *Онтология проектирования*. № 3(9). 2013. С.9-31.

[5] ***Боргест Н.М.*** Границы онтологии проектирования. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №1(23). С.7-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.

[6] ***Боргест Н.М.*** Онтологии проектирования от Витрувия до Виттиха. *Онтология проектирования.* 2018. Т.8, №4(30). С.487-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.

[7] ***Боргест Н.М.*** Онтология проектирования научного направления: формирование, развитие, примеры. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.136-157. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-136-157.

[8] ***Borgest N.M.*** Design Ontology: Genesis and Development. *Pattern Recognit. Image Anal.* **34**, 434–439 (2024). DOI: 10.1134/S1054661824700172.

[9] ***Фаянс А.М., Кнеллер В.Ю.*** Об онтологии видов задач и методов их решения. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №3(37). С.273-295. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-273-295.

[10] ***Фаянс А.М.*** Взгляд на формализацию смысла с позиций трансдисциплинарного подхода. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №3(41). С.294-308. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-294-308.

[11] ***Баклавски К.*** Онтологический саммит 2021. Коммюнике: генерация и гармонизация онтологий. Ноябрь 2021 / К. Баклавски, М. Беннет, Г. Берг-Кросс, Л. Дикерсон, Т. Шнайдерд, С. Сеппалая, Р. Шарма, Р.Д. Шрирам, А. Вестеринен. Перевод с англ. Д. Боргест // Онтология проектирования 2021. Т.11, №4(42). С.533-548. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-533-548.
[12] ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. Дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ 2021. 16 с. https://docs.cntd.ru/document/1200177292.
[13] Большой энциклопедический словарь. Под ред. А.М. Прохорова. М.: БЭС. С-П.: Норинт. 1997.
[14] ***Новиков А.М., Новиков Д.А.*** Методология. Изд. 2-е испр. М.: Красанд. 2014. 632 с.
[15] ГОСТ Р 54869-2011. Требования к управлению проектом. Дата введения 2012-09-01. Москва: Стандартинформ. 2011. 9 с. https://www.isopm.ru/download/gost-54869.pdf.
[16] ***Норбеков М.С.*** Интуиция дурака. М: АСТ. 2016.
[17] ***Фаянс А.М.*** Построение онтологии фундаментальных понятий на основе трансдисциплинарного подхода. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №4(46). С.454-469. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-454-469.
[18] ***Fayans A.M.*** A Look at The Metrology of Synthesis of Large-Scale Systems and Their Control from the Position of a Transdisciplinary Approach. Proceedings of the 16th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). M.: IEEE, 2023. С. 1-5 // https://ieeexplore.ieee.org/document/10303996.
[19] ***Новиков Д.А.*** Методология управления. М.: Либроком, 2011. 128 с. Стр.13-15
[20] ***Виттих В.А.*** Избранные труды по эвергетике. Самара: Новая техника, 2022. 419 с.

Сведения об авторе

Фаянс Александр Михайлович, 1948 г. рождения. Окончил Московский физико-технический институт в 1972 г. Научный сотрудник ИПУ РАН, Москва. В списке научных трудов более 30 работ и изобретений в области измерительной техники и преобразования информации. Author ID (РИНЦ): 766983. Author ID (Scopus): 57006695900. *alfayans@mail.ru.*

Поступила в редакцию 19.11.2024, после рецензирования 18.02.2025. Принята к публикации 28.02.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-163-173

On the ontology of designing from the standpoint of a transdisciplinary approach

© 2025, A.M. Fayans

Institute of Control Sciences Academician VA Trapeznikov, Moscow, Russia

Abstract

A transdisciplinary approach to identifying the features and place of ontology of designing in the scientific picture of the world is presented, based on the use of formulations related to the position of the concept within the structure of science. It is argued that this approach complements both disciplinary and interdisciplinary approaches, enabling verification, refinement of obtained results, and the generation of new insights. A procedure is proposed that, in general, allows for the distinction between fully formalizable (computerizable) and non-formalizable constructs. The process of solving complex problems, where ontology construction is a key component, is described. Following the proposed process leads to the conclusion that there is a symbiosis and synergy of creative, non-formalizable human capabilities and the capabilities of technical systems that implement formalizable procedures. The application of the proposed process to complex, multi-aspect systems considered at a general level is shown.

Keywords: *ontology, designing, formalization, transdisciplinary approach, problem solving technology*.

For citation: *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.

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

List of figures

Figure 1 - Recommended order of forming the problem-solving technology

References

[1] 1st World Congress of Trandisciplinarity // Convento da Arrábida. Portugal. November 2-6. 1994https://web.archive.org/web/20041205093617/http://perso.club-internet.fr/nicol/ciret/english/charten.htm.

[2] ***Knyazeva EN.*** Transdisciplinary research strategies. [In Russian] Bulletin of the Tomsk State Pedagogical Institute (TSPI). 2011; 10(112): 193-201.

[3] ***Borgest NM.*** The scientific basis of the ontology of designing [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013; 1(7): 7-25.

[4] ***Borgest NM.*** Key terms of ontology of designing: overview, analysis, generalizations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013; 3(9): 9-31.

[5] ***Borgest NM.*** Boundaries of the ontology of designing [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(1): 7-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.

[6] ***Borgest NM.*** The ontologies of designing from Vitruvia to Vittikh [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(4): 487-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.

[7] ***Borgest NM.*** Ontology of designing a scientific direction: formation, development, examples [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(2): 136-157. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-136-157.

[8] ***Borgest NM.*** Design Ontology: Genesis and Development. *Pattern Recognit. Image Anal.* **34**, 434–439 (2024). DOI:10.1134/S1054661824700172.

[9] ***Fayans AM, Kneller VU.*** On the ontology of task types and methods of their solution [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020;10(3): 273-295. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-273-295.

[10] ***Fayans AM.*** A look at the formalization of the meaning from the standpoint of a transdisciplinary approach. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(3): 294-308. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-294-308.

[11] ***Baclawski K, Bennett M, Berg-Cross G, Dickerson L, Schneider T, Seppälä S, Sharma R, Sriram RD, Westerinen A.*** Ontology Summit 2021 Communiqué: Ontology generation and harmonization', Applied Ontology, 2022; 17(2): 233-248. DOI: 10.3233/AO-220266.

[12] GOST R 59277-2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems [In Russian]. Date of introduction 01-03-2021. Moscow: Standartinform 2021. 16 c. https://docs.cntd.ru/document/1200177292.

[13] Large encyclopedic dictionary. Edited by A.M. Prokhorov AM [In Russian]. Moscow: LED. S-P.: Norint. 1997/ https://gufo.me/dict/bse/Технология.

[14] ***Novikov AM, Novikov DA,*** Methodology. Ed. 2nd edition. [In Russian] Moscow: Krasand. 2014. 632 p.

[15] GOST R 54869-2011 Project management requirements [In Russian]. https://www.isopm.ru/download/gost-54869.pdf.

[16] ***Norbekov MS.*** The intuition of a fool [In Russian] Moscow: AST. 2016.

[17] ***Fayans AM.*** Building an ontology of fundamental concepts based on a transdisciplinary approach [In Russian] *Ontology of designing*. 2022; 12(4): 454-469. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-454-469.

[18] ***Fayans AM.*** A Look at The Metrology of Synthesis of Large-Scale Systems and Their Control from the Position of a Transdisciplinary Approach. Proceedings of the 16th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). IEEE, 2023. P. 1-5. https://ieeexplore.ieee.org/document/10303996.

[19] ***Novikov DA.*** Methodology of control [In Russian] Moscow: Librocom, 2011. 128 p.

[20] ***Vittikh VA.*** Selected works on euergetics [In Russian] Samara: New technique, 2022. 419 p.

About the author

Alexander Mikhailovich Fayans (b. 1948) graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology in 1972. Reseacher at the Institute of Control Sciences of the RAS. He is the author or a co-author of more than 30 publications and inventions in the field of of measurement techniques and transformation information processes. Author ID (RSCI): 766983. Author ID (Scopus): 57006695900. *alfayans@mail.ru.*

Received November 19, 2024. Revised February 18, 2025. Accepted February 28, 2025.

УДК 629.735 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-174-186

Онтология пассажирской авиации: метрика и закон развития

© 2025, Е.Б. Скворцов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» («ЦАГИ»), Жуковский, Россия

Аннотация

Работа посвящена классификации основных показателей, характеризующих транспортную задачу пассажирского самолёта: перевозимой нагрузки, дальности полёта и потребной длины взлётно-посадочной полосы. Выполнено обобщение информации по указанным характеристикам пассажирских самолётов. Цель статьи – разработка метрики для рынка пассажирских самолётов. Выполнено обоснование построенной топологической модели воздушных перевозок между населёнными пунктами на земной поверхности и предложено восемь классов дальности перевозок и четыре категории транспортного ряда по пассажировместимости. Методами теории информации выделены восемь классов пассажировместимости воздушных судов в каждом транспортном ряде и определены их диапазоны. Установлена корреляция между классами пассажировместимости и дальности перевозок. Выявлены закономерности развития авиационного рынка, полезные для прогнозов и планирования. На основе математической модели рассмотрена классификация условий базирования пассажирской авиации. Получена шкала классов длины взлётно-посадочной полосы, близкая к принятой на практике. Предложен способ идентификации пассажирских самолётов в разработанной трёхмерной структуре классов, составлена метрика пассажирской авиации.

Ключевые слова: *онтология, пассажирская авиация, математическая модель, метрика, закон развития*.

Цитирование: *Скворцов Е.Б.* Онтология пассажирской авиации: метрика и закон развития. *Онтология проектирования:* 2025. Т.15, №2(56). С.174-186. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-174-186.

Благодарности: автор выражает благодарность ведущему инженеру ЦАГИ С.В. Шелеховой за помощь в подготовке рукописи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Данное исследование онтологии пассажирской авиации направлено на выявление её сути, а именно концептуальных основ реального объекта, в т.ч. его структуры и организации. В этой области известны различные структуры классификации пассажирской авиации [1], которые основаны на опыте и корпоративных представлениях о строении парка самолётов. Отсутствие единого метрологического стандарта вызывает необходимость в создании научно обоснованной метрики[1] пассажирской авиации. В настоящей работе с этой целью в рассмотрение включены основные показатели транспортной задачи, описывающие всё многообразие условий базирования, варианты полезной нагрузки и диапазоны дальности перевозок, которые можно представить математической моделью мировой авиации на основе статистических данных самолётов транспортной категории [2].

[1] *См. например:* Методика и порядок определения конкурентоспособных аналогов авиационной техники. Министерство экономики РФ (МЭ РФ). 1999; Методика оценки конкурентоспособности гражданских самолетов. 2002.

1 Топология перевозок и классификация расстояний

Для классификации транспорта по дальности перевозок необходимо установить, каков порядок распределения населённых пунктов на поверхности Земли с учётом суждений общего характера.

- Население по поверхности планеты распределено дискретно в населённых пунктах.
- Число больших городов значительно меньше, чем мелких поселков и деревень.
- Между крупными городами расстояние больше, чем между мелкими.
- Между населёнными пунктами происходят товарно-денежный обмен, перемещения людей и грузов.
- Инфраструктурную основу взаимодействия поселений составляют транспорт и связь.

В 1933 году В. Кристаллером была предложена теория «центральных мест» (ЦМ) в виде закона размещения населённых пунктов вокруг более крупного ЦМ [3]. Теория ЦМ основана на понятии идеализированной территории, т.н. изотропной поверхности обитания. Согласно этой модели, население размещено равномерно, транспортные издержки пропорциональны расстоянию и равноудалённые зоны сбыта любого товара представляются кругами. Место производства товара располагается в ЦМ, а все поселения, которые снабжаются из этого центра, являются «зависимыми» периферийными местами. Для построения модели размещения населённых пунктов был принят принцип экономии времени, сил и средств для достижения ЦМ населением из меньших населённых пунктов.

С увеличением издержек спрос на большинство товаров уменьшается, и поэтому с ростом расстояния спрос на любой товар в любом направлении будет уменьшаться до тех пор, пока не будет достигнуто геометрическое место точек, где на соответствующие товары и услуги не найдётся ни одного потребителя.

Теория ЦМ была дополнена в работах А. Лёша, который сформулировал теорию «экономического ландшафта» [4]. В модель распределения населённых пунктов был внесён ряд новых факторов (торговых, транспортных, административных), требующих учёта.

Описанная модель взаимного размещения иерархически соподчинённых населённых пунктов не является всеобщей. Практическая область её применения ограничена плоской шестиугольной топологией, что допустимо лишь для локальной системы поселений.

Энергосиловая модель Земли.

Современные исследователи геоморфологии считают, что Земля является энергетическим кристаллом, имеющим грани, узлы и связывающие их геоэнергетические линии, которые находятся под действием геофизических и космических процессов [5]. На кристаллическое строение Земли указывалось уже в древних источниках [6], изображавших структурно-энергетические модели Земли в виде икосаэдра и додекаэдра, где додекаэдр есть трёхмерная структура, состоящая из 12 правильных пятиугольников (рисунок 1). Исследователи этой модели показали, что в особых точках этого каркаса располагаются центры мировой религии и культуры, места с уникальной фауной и флорой, крупнейшие залежи полезных ископаемых. Наряду с глобальной сеткой были выявлены более мелкие структуры.

Рисунок 1 – Икосаэдро-додекаэдрический энергосиловой каркас Земли [5]

Классификация по дальности сообщений.

Пусть основу энергосиловой модели поверхности Земли составляет додекаэдр, геометрические пропорции которого подчиняются «золотому сечению» [7]. Коэффициентом пропорциональности является иррациональное число Фидия $\varphi \approx 1{,}618$ [8]. Другое свойство пентаграммы состоит в том, что она относится к фракталам, т.е. самоподобным формам.

Достаточно привести пример с пятиугольником на полусфере, внутри которого размещаются шесть подобных фигур (рисунок 2), линейные размеры которых отличаются в φ^2 раз. Отмеченные особенности описываются основным соотношением для числа Фидия: $\varphi^2 = 1 + \varphi$. При сравнении сферической и плоской фигур их линейные размеры совпадают, отличие наблюдается в величинах углов при вершинах.

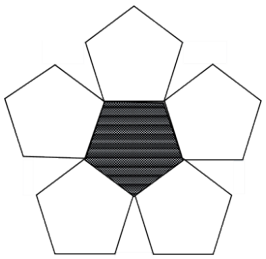


Рисунок 2 – Раскрой на плоскости правильного сферического пятиугольника

В связи с принципом фрактальности для пентаграмм возможно многократное самоповторение, в котором роль центров изменяется в зависимости от их категории в глобальной иерархии. Такая категория может быть определена как логарифм расстояния по основанию φ.

Радиус описанной сферы Земли $R_з$ связан со стороной вписанного плоского пятиугольника додекаэдра a соотношением [9]: $R_з = a/4 \cdot (1 + \sqrt{5}) \cdot \sqrt{3}$.

Отсюда для додекаэдра a = 4546,76 км, а его проекция на сферу – 4648 км. Используя принцип самоподобия, можно на этой основе построить последовательный ряд уровней дальности сообщения для различных категорий в иерархии ЦМ (рисунок 3), где: $r\{r0, r1, \ldots, r7\}$ является информационным кодом класса дальности сообщений, а степени числа φ ограничивают r – диапазоны дальности перевозок (таблица 1).

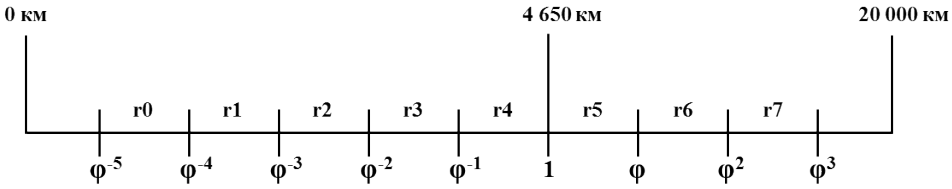


Рисунок 3 – Шкала относительных расстояний

Минимальный диапазон дальности перевозок в таблице 1 характерен для так называемой авиации общего назначения (АОН), которая подпадает под действие НЛГ-23 [10]. К этому типу относятся самолёты нормальной и многоцелевой категории со взлётной массой не более 5700 кг (не более 9 пассажиров), а также самолёты переходной категории массой не более 8600 кг (не более 19 пассажиров). Право на коммерческие перевозки самолёты этого типа получают при одновременном соблюдении НЛГ-25 [2]. Принятым для этой категории диапазоном являются дальности 420-680 км. Типичным представителем АОН является самолёт Ан-2, имеющий дальность полёта 420 км с максимальной нагрузкой 12 пассажиров (1500 кг) при базировании на взлётно-посадочной полосе (ВПП) длиной 600-700 м.

Таблица 1 – Классификация по дальности сообщений

Класс дальности перевозок	Диапазон дальности перевозок, км	
	Предложенная шкала	Методика МЭ РФ[1], 1999
Региональные:		
$\boldsymbol{r0}$ – АОН	420 – 680	
$\boldsymbol{r1}$	680 – 1100	
$\boldsymbol{r2}$	1100 – 1780	
$\boldsymbol{r3}$	1780 – 2870	
$\boldsymbol{r4}$	2870 – 4650	до 3000-4000
Магистральные:		
$\boldsymbol{r5}$	4650 – 7520	до 6000-7000
$\boldsymbol{r6}$	7520 – 12170	более 7000
$\boldsymbol{r7}$	12170 – 19690	

Ограничением справа является расстояние в половину экватора. В принятой математической модели эта величина составляет 19690 км, что на 1,7 % меньше действительной половины экватора. Это объясняется тем, что рассматривается сообщение с ЦМ, которое является небольшой по площади фигурой, а не точкой.

В рассматриваемой классификации ключевой ($\varphi^0 = 1$) является дальность 4650 км, которая определяется моделью энергосилового додекаэдра Земли. Транспортные самолёты, обладающие дальностью полёта 4500-5000 км с максимальной нагрузкой, имеют возможность совершать кругосветные рейсы с посадками на сложившейся системе аэродромов.

2 Классификация пассажировместимости самолётов

В теории измерений и вычислений сложились определённые представления об экономичных системах счисления, позволяющих с наименьшими затратами ресурсов производить измерения физических величин и выполнять логические операции [11].

2.1 Число классов пассажировместимости

Основание двоичной системы счисления одновременно является основанием модели планирования экспериментов. Пусть n – число независимых факторов влияния, которые поразному сочетаются при проведении испытаний в поисках наилучшего сочетания, воплощённого в исследуемом объекте. Тогда общее множество предложенных вариантов составляет 2^n. На этом основано планирование опытов, в данном случае на рынке самолётов. В сбытовой модели оно приобретает смысл сравнения вариантов, число которых составляет ассортимент и гарантирует успешный выбор на основе представленной потребителю информации. Условием успешного решения является независимость повторных испытаний. Вероятность появления искомого события должна определяться в результате планирования опытов, определённых заранее. В таком плане и заключается смысл понятия «ассортимент».

В двоичной системе измерения ассортимента n – число независимых факторов, определяющих потребительские свойства самолёта на рынке, в т.ч. объём перевозок и условия базирования, представленные альтернативными значениями в каждом из восьми *r*-классов дальности перевозок. Если число потребительских факторов составляет $n = 2$, то количество классов пассажировместимости в числе возможных при $r = const$ составляет $2^n = 4$. Поэтому ассортимент пассажирских самолётов может быть представлен четырьмя классами пассажировместимости, которые могут быть предложены на рынок для выполнения перевозок в одном классе дальности.

2.2 О «ширине» класса пассажировместимости

Диапазон пассажировместимости характеризует единичный класс из ассортимента воздушных судов (ВС). Изготовление ВС в разное время разными производителями на основе разных технологий приводит к тому, что фактические данные проектов оказываются несовпадающими, но относительно близкими. Нужно знать, насколько эти данные могут отличаться, чтобы принадлежать одному классу.

Пользуясь системой счисления с основанием x, можно записать y чисел (от 0 до $y - 1$), для этого потребуется s цифровых знаков (по x цифр для каждого из s/x разрядов). Например, в десятичной системе счисления ($x = 10$) можно 1000 записать как $y = 10^3$, где показатель степени 3 – это число разрядов. Тогда число знаков, которые необходимы для записи всех чисел, составляет $s = x \times 3 = 30$.

Рациональной можно считать систему счисления с основанием *x*, которая обеспечит запись максимального множества чисел $y = x^{s/x}$ при известном числе знаков $s = \text{const}$. Экстремум такой системы определяется из условия $dy/dx = 0$. Решение этой задачи известно [11], а именно, оптимальной является величина $x = e$ (иррациональное число Непера 2,718…). Тогда максимальное число $y = \left(\sqrt[e]{e}\right)^s$, а при $s = 1$ $y = 1{,}444$ ... Пользуясь аналогией с наиболее про-

дуктивной информационной системой, число $\sqrt[e]{e} = 1.444$ ... можно рассматривать как относительную «ширину» одного класса пассажировместимости. В периодической системе классов пассажировместимости она создаёт максимальную возможность размещения измеренных данных пассажирских самолётов на рынке.

На практике рассеяние фактических данных с близкими значениями пассажировместимости самолётов действительно укладывается в расчётный диапазон. Таким образом, теоретические и эмпирические основания позволяют определить верхние границы диапазона максимальной пассажировместимости для каждого класса в 1.444 раз выше нижней границы диапазона.

2.3 Статистический анализ пассажирской авиации

В предварительное рассмотрение включено около 150 самолётов, данные по которым приведены к единообразному виду:

- максимальное число пассажиров в экономическом классе;
- практическая дальность полёта с максимальной пассажировместимостью и стандартными резервами топлива;
- потребная длина искусственной ВПП в стандартных атмосферных условиях для полёта на максимальную дальность с максимальным числом пассажиров.

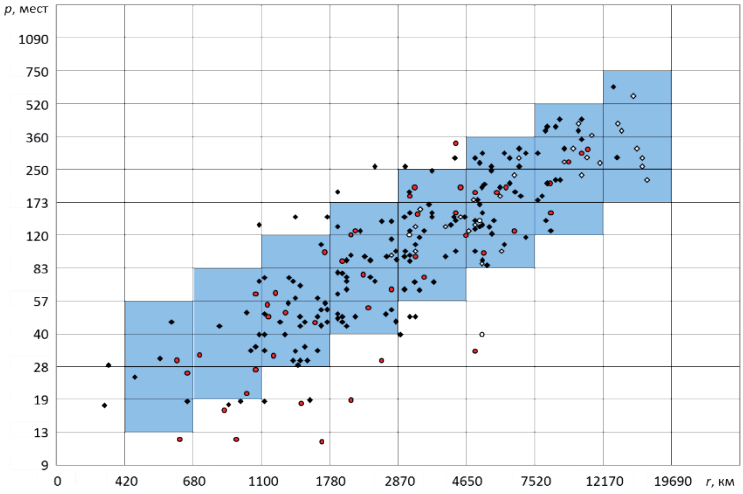


Рисунок 4 – Число пассажиров (p) и дальность перевозок (r)

На рисунке 4 в логарифмическом масштабе представлены статистические данные в координатах «число пассажиров – дальность перевозок», которые моделируются четырьмя рядами «малой – умеренной – средней – большой» пассажировместимости в таблице 2. Видно, что возрастающие требования к дальности полёта приводят к логарифмически пропорциональному увеличению расчётной пассажировместимости.

Таблица 2 – Двухкоординатная P(r) структура рынка пассажирских самолетов (часть 1)

Класс дальности перевозок, км	$r0$	$r1$	$r2$	$r3$	$r4$	$r5$	$r6$	$r7$
	420-680	680-1100	1100-1780	1780-2870	2870-4650	4650-7520	7520-12170	12170-19690
Категория транспортного ряда:	Класс пассажировместимости, мест							
– P1. малый	13-19	19-28	28-40	40-57	57-83	83-120	120-173	173-250
– P2. умеренный	19-28	28-40	40-57	57-83	83-120	120-173	173-250	250-360
– P3. средний	28-40	40-57	57-83	83-120	120-173	173-250	250-360	360-520
– P4. большой	40-57	57-83	83-120	120-173	173-250	250-360	360-520	520-750

Основные элементы этой системы (без показателей базирования) для рынка пассажирских самолётов представлены двухкоординатной шкалой измерений, разделённой на отрезки-классы [12].

3 Закономерности авиационного рынка

Если «метрика» пассажирской авиации – это система измерения её свойств посредством различных показателей, то «закон» развития пассажирской авиации представляет собой сочетание взаимосвязанных закономерностей, регулирующих авиационный рынок и имеющих социально-экономическую природу. Как и прочие законы природы, этот закон устанавливается эмпирически, а его закономерности выражаются математически.

В соответствии с принятой классификацией выполнен ретроспективный анализ развития пассажирской авиации. Факт появления самолёта конкретного типа отмечался по дате его сертификации или начала эксплуатации. Исторический процесс, начиная с 1944 г., разделён на этапы длительностью 9 лет (полупериод поколения). Развитие мирового рынка авиатехники рассматривалось как последовательность возникновения того или иного класса ВС из числа сочетаний в таблице 2. Создание на одном этапе времени двух или более типов ВС от разных производителей, но отвечающих одному классу дальности и пассажировместимости, учитывалось как проявление одного класса.

Собранные статистические данные позволили установить, что развитие рынка ВС происходит с соблюдением следующих закономерностей.

Закономерность 1. За короткий период времени (9 лет) происходит появление нескольких классов ВС, образующих единый товарный ряд (пример на рисунке 5). При этом создание каждого ВС является независимым событием. Одновременное появление нескольких новых классов ВС, имеющих одинаковую принадлежность, позволяет говорить о проявлениях другого рыночного объекта – типоразмерного товарного ряда из нескольких упорядоченных классов ВС. Таким образом, эволюцию мирового рынка пассажирских ВС можно рассматривать как процесс возникновения, чередования и изменения товарных рядов в отдельные периоды времени.

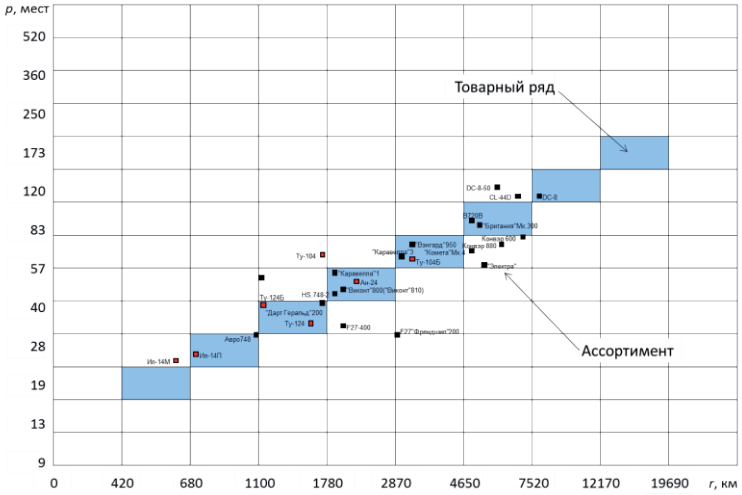


Рисунок 5 – Умеренный транспортный ряд и ассортимент ВС на мировом рынке 1954-1962 годов

Закономерность 2. Установлено (рисунок 6), что в мировой авиации необходимость в тех или иных товарных рядах возникает при достижении рынком пассажирских авиаперевозок определённого объёма годового пассажирооборота.

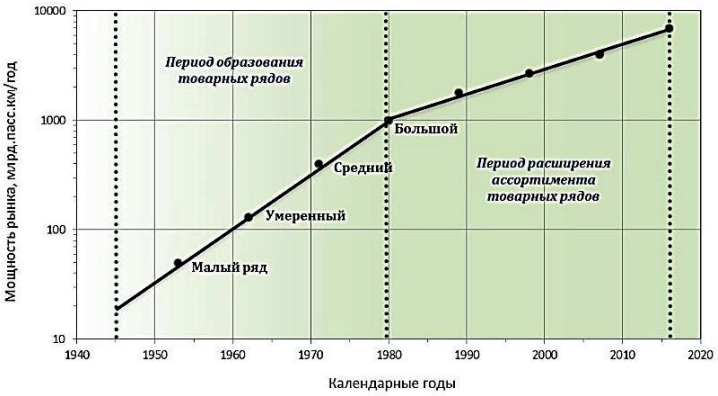


Рисунок 6 – Годовой пассажирооборот мирового рынка авиаперевозок [13]

Логарифмически линейная связь между мощностью рынка пассажирских перевозок и категорией товарно-

го ряда свидетельствует о её предопределённости и согласованности со структурой авиарынка в таблице 2.

Для того, чтобы несколькими классами ВС был проявлен малый ряд, потребовалось увеличение годового пассажирооборота в мире до 50 млрд. пасс.-км. Дальнейшее наполнение этого товарного ряда происходило в процессе последующего развития мирового рынка. В таблице 3 показаны уровни годового объёма рынка пассажирских перевозок, побуждающие авиастроение к созданию товарного ряда ВС соответствующей категории.

Таблица 3 – Корреляция рынка авиаперевозок и рынка поставок воздушных судов

Годовой объём рынка авиаперевозок, млрд. пасс.-км	Категория товарного ряда ВС
50	Малый ряд
130	Умеренный ряд
400	Средний ряд
1000	Большой ряд

Таким образом, закономерность 2 показывает связь между спросом и предложением на рынках пассажирских авиаперевозок и поставок пассажирских самолетов.

Закономерность 3. Из рисунка 6 видна прямая связь между календарными сроками развития пассажирской авиации и логарифмическими показателями мощности (годового объёма) рынка пассажирских перевозок. Из этой связи можно сделать вывод о запрограммированном характере воздушных перевозок в условиях мирового экономического развития.

Формирование четырёх товарных рядов в основном завершилось в период с 1944 по 1980 год. В дальнейшем происходило их последовательное наполнение с обновлением и увеличением числа используемых в ряду классов. Этот процесс отмечен значительно меньшими темпами логарифмически линейного роста ежегодного пассажирооборота, чем в первый период развития.

Закономерность 4. Эволюция числа вновь возникающих классов как в отдельных рядах, так и в целом на рынке пассажирских самолётов (рисунок 7) свидетельствует об исчерпании экстенсивного пути развития мировой авиации в период до 2016 года. Возможный характер дальнейшего развития требует специального изучения.

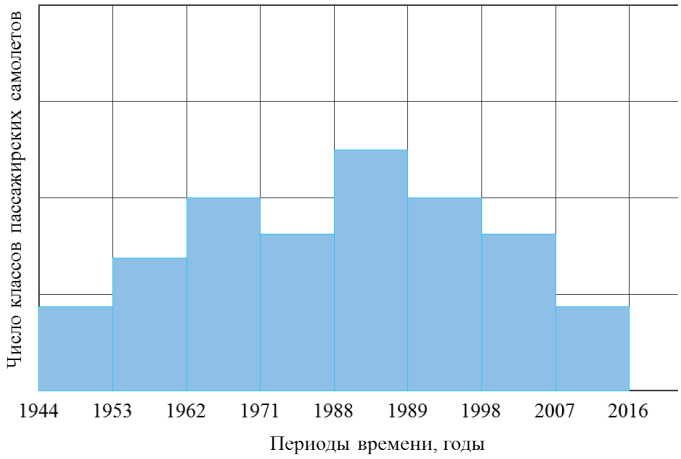


Рисунок 7 – Эволюция мирового рынка пассажирских авиаперевозок [13]

Закономерность 4 свидетельствует о периодическом характере программы развития рынка воздушных перевозок. Программный период составил 72 года.

Принятая структура рынка пассажирских самолетов (таблица 1) и её связь с мощностью исследуемого рынка (рисунок 6) образуют инструменты для анализа рынка авиатехники и оценки возможных вариантов развития продуктовой политики авиапрома.

4 Классификация длины ВПП

Разнообразие факторов, описывающих условия базирования самолётов, включает многие характеристики, в т.ч. качество покрытия ВПП, уклон её поверхности, высоту аэродрома и т.д. В данном исследовании в рассмотрение включена потребная длина ВПП (d), которая

сравнивается с располагаемой длиной ВПП аэродромов, включённой в известные классификации.

Статистический анализ в прогнозах развития гражданской авиации обычно ограничивается планом $p(r)$. Однако эту функцию нельзя считать исчерпывающей, т.к. она не позволяет в явном виде представить связи с потребной длиной ВПП. Анализ фактических данных (рисунок 8) позволяет заключить, что между множеством данных по длине ВПП и дальностью перевозок существует корреляционная зависимость $d(r)$. Она показывает, что с увеличением требований к дальности сообщений в 10 раз действует общая тенденция к увеличению потребной длины ВПП примерно в 2 раза. В то же время относительно медианного значения этой логарифмически линейной функции существует значительное рассеяние. При одном значении дальности перевозки потребная длина ВПП может отличаться в 2 раза.

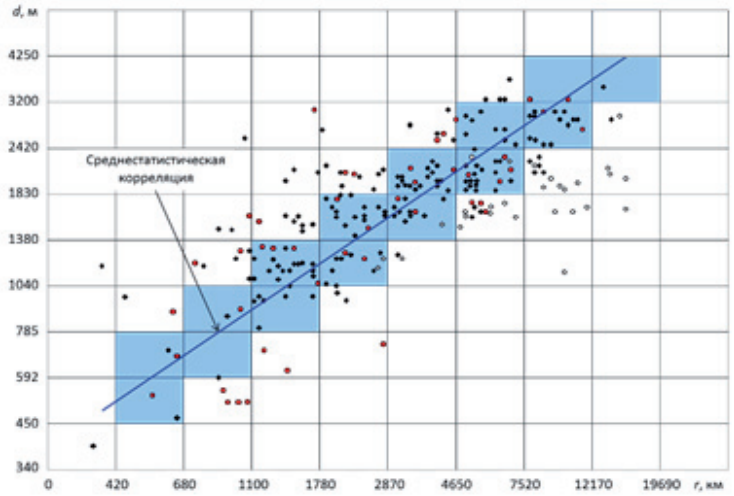


Рисунок 8 – Длина ВПП (d) и дальность перевозок (r)

Расчётная модель ВПП. Формирование модели классификации ВПП можно связывать со статистическими данными при условии, что переход от одного класса дальности к другому сопровождался изменением ВПП не меньше, чем на 1 класс. При этом каждому классу дальности полёта соответствует выбор не менее чем из двух классов ВПП. Выдвинутые условия должны быть выполнены при соблюдении среднестатистической корреляционной зависимости. Модель, полученная при учёте всех требований, представлена на рисунке 8. Корреляционный анализ показывает, что дискретное изменение класса ВПП вслед за изменением класса дальности перевозки должно сопровождаться изменением длины ВПП в 1,325 раз. Это соотношение называется «серебряным сечением» или числом Р. Падована [14], которое является решением уравнения: $\Psi^3 = 1 + \Psi$.

Это число, так же, как и число Фидия, является пределом для некоторой последовательности чисел, но сходящейся более медленно. Число Падована Ψ тоже упорядочивает геометрические величины, но в другом, а именно, неравностороннем пятиугольнике $ABCDE$ (рисунок 9а), стороны которого соотносятся как $1,\ \Psi,\ \Psi^2, \Psi^3, \Psi^4$. Такой «серебряный» пятиугольник, как и «золотая» пентаграмма является фрактальной фигурой. Он обладает свойством самоподобия в присутствии треугольного «гномона», который последовательно включается в исходную фигуру (рису-

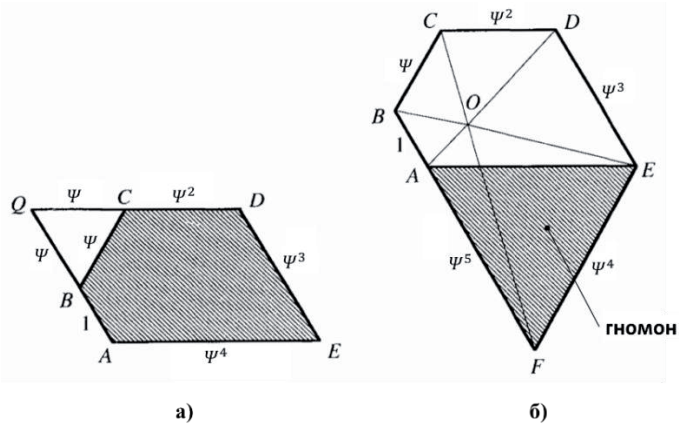


Рисунок 9 – Серебряный пятиугольник (а) и гномон серебряного пятиугольника (б)

нок 9б), чтобы возникли подобные фигуры другого масштаба [14].

Полученный ряд отражает классификацию длины ВПП (таблица 4), которая может быть рекомендована для практического применения. Основное отличие рекомендованной классификации от нормативной состоит в детальной градации класса Е [15].

В качестве базовой величины ВПП ($\Psi^0 = 1$) принята граница классов С / D ИКАО (В / Г по АП-139), равная 1829 м в связи с наибольшей повторяемостью в различных классификациях, включая военные. Этот уровень с достаточной для практики точностью близок к одной морской миле (1852 м), которая определяется как дуга земного меридиана, заключённая в пределах одной угловой минуты.

В связи с линейной связью $d(r)$ классифицированной длины ВПП и дальности перевозок (рисунок 8), можно получить аэропортовый аналог двухкоординатной транспортной структуры $p(r)$, который станет второй частью метрики пассажирской авиации (таблица 5).

Таблица 4 – Рекомендуемая классификация ВПП с искусственным покрытием

АП-139 [15]		Рекомендуемая классификация		Шкала ЦМ относительной длины ВПП*)
Класс	Длина ВПП*), м	Класс	Длина ВПП*), м	
			4250	Ψ^3
кл. А	3200	кл. А	3200	Ψ^2
кл. Б	2600	кл. Б	2420	Ψ^1
кл. В	1800	кл. В	1830	1
кл. Г	1300	кл. Г	1380	Ψ^{-1}
кл. Д	1000	кл. Д	1040	Ψ^{-2}
кл. Е	500	кл. Е2	785	Ψ^{-3}
		кл. Е1	592	Ψ^{-4}
		кл. Е0	450	Ψ^{-5}

*) Минимальная длина ВПП в стандартных условиях

Таблица 5 – Двухкоординатная $d(r)$ структура рынка пассажирских самолётов (часть 2)

Класс дальности перевозок, км	$r0$ 420-680	$r1$ 680-1100	$r2$ 1100-1780	$r3$ 1780-2870	$r4$ 2870-4650	$r5$ 4650-7520	$r6$ 7520-12170	$r7$ 12170-19690
Категория аэропортового ряда	Класс взлётно-посадочной полосы (ВПП), м							
– $d1$. Первый	E_1 592-785	E_2 785-1040	Д 1040-1380	Г 1380-1830	В 1830-2420	Б 2420-3200	А 3200-4250	
– $d2$. Второй	E_0 450-592	E_1 592-785	E_2 785-1040	Д 1040-1380	Г 1380-1830	В 1830-2420	Б 2420-3200	А 3200-4250

Таблица 5 включает два смежных аэропортовых ряда, обозначенных как $d_1(r)$ и $d_2(r)$. Их особенность состоит в том, что при одном классе дальности перевозок второй ряд включает ВПП с длиной, сокращённой на один класс. Единственным фактором влияния, который вызвал потребность в выборе того или иного ряда является развитость/неразвитость сети аэродромов базирования, зависящая от уровня социально-экономического развития и почвенно-климатических условий связанных населённых пунктов. В частности, большая терри-

тория с разнообразными условиями может иметь разные классы аэропортов прилёта и вылета на одной линии перевозок.

Пассажирские самолёты создаются для применения на ВПП либо одного класса, либо на меньшем из двух возможных в условиях эксплуатации. Например, самолёты Ту-134 и Як-42, относящиеся примерно к одному классу пассажировместимости (83-120 мест), рассчитаны на разную длину ВПП – соответственно 2500 м и 1800 м из двух смежных аэропортовых рядов $d_1(r4)$ и $d_2(r4)$. При этом известно, что Як-42 рассчитан на расширенные условия базирования, обеспечивающие доступность небольших населённых пунктов.

5 Идентификация класса воздушных судов

Итог построения системы измерения пассажирской авиации во всём её разнообразии состоит в том, что два аэропортовых ряда $d(r)$ в таблице 5 дополняют четыре транспортных ряда $p(r)$ в таблице 2. Общее поле их классификации в трёхкоординатной системе, описывающей транспортные возможности ВС, насчитывает 60 вариантов.

Для выделения одного идентификатора ВС в представленной системе измерения необходимо определить три категории – класс дальности перевозок r, транспортный ряд $p(r)$ и аэропортовый ряд $d(r)$. Результатом будут диапазоны соответствующих значений дальности перевозок, пассажировместимости и потребной длины ВПП. Например, $r4[2870, 4650]$ км, $p2[83, 120]$ мест, $d1[1830, 2420]$ м. Применение последовательности $r4$, $p2$, $d1$ в обозначении общего идентификатора позволило бы сократить запись трёхмерного класса пассажирского самолёта до минимума. В предложенной классификации пассажирских самолётов использовались математические ряды, основанные на геометрической прогрессии. Выбор такой номенклатуры показателей отвечает требованиям к параметрической стандартизации [16, 17]. Этот способ не является единственно возможным. Не исключено образование общего идентификатора пассажирских самолётов с указанием не на ряды *p(r)* и *d(r)*, а непосредственно на отдельные классы дальности перевозок, пассажировместимости и длины ВПП.

Заключение

В работе показана возможность классификации и измерения рынка пассажирских самолётов транспортной категории по дальности перевозок, полезной нагрузке и длине ВПП. Её основу составила математическая модель, описывающая основные связи между транспортными характеристиками. Онтологическая модель представляет собой дискретные линейные зависимости информационных кодов, которыми являются логарифмы указанных физических величин. Предложен способ идентификации класса самолётов.

Для формализованного описания топологии перевозок определены и классифицированы возможные типы сообщений, связывающих населённые пункты на расстояниях, пропорциональных степени числа 1,618 (число Фидия).

Показано, что диапазон пассажировместимости, соответствующий одному классу самолётов, должен иметь ширину, пропорциональную $\sqrt[e]{e}$≈1,444 (здесь e – число Непера). В этом диапазоне могут быть представлены самолёты одного назначения с близкими, но несовпадающими характеристиками.

Показано, что изменение класса аэродромов вслед за изменением класса дальности перевозок должно сопровождаться изменением длины ВПП в 1,325 раз (число Падована). Полученная модель длины ВПП близка к нормативной классификации.

На основе выявленных зависимостей составлена метрика пассажирской авиации, которая включает 60 классов самолётов на основе сочетаний восьми *r* диапазонов дальности перево-

зок, четырёх $p(r)$ транспортных рядов пассажировместимости и двух $d(r)$ аэропортовых рядов длины ВПП.

Применение классификации транспортных характеристик ВС позволило выявить ряд закономерностей развития авиарынка. На их основе стало возможным решение практических задач [13]. Предложенная модель измерения авиарынка может быть рекомендована в качестве метрологической основы при планировании, управлении в авиационной отрасли и для определения самолётов-аналогов.

Список источников

[1] ***Коноплева В.М., Лесничий И.В., Самойлов И.А., Скворцов Е.Б., Шелехова С.В.*** О классификации воздушных судов на рынке пассажирских самолетов. *Техника воздушного флота.* 2019. №1. С.35-41.

[2] Нормы летной годности самолетов транспортной категории. НЛГ-25. Федеральное агентство воздушного транспорта. 2023. 379 с.

[3] ***Christaller Walter.*** Die zentralen Orte in Süddeutschland. Jena: Gustav Fischer. 1933. 331 p.

[4] ***Шупер В.*** Август Леш признанный, но забытый гений. *Знание – сила.* 2007. №2(956). С.53-57.

[5] ***Лачугин К.А.*** Земля – большой кристалл? М: «Захаров», 2005. 224 с.

[6] ***Волошинов А.В.*** Пифагор: союз истины, добра и красоты. М: «Просвещение», 1993. 224 с.

[7] ***Ливио Марио.*** Число Бога. Золотое сечение – формула мироздания. М: «АСТ», 2015. 425 с.

[8] ***Стахов А.П.*** Коды золотой пропорции. М: «Радио и связь». 1984. 152 с.

[9] ***Рывкин А.А., Рывкин А.З., Хренов Л.С.*** Справочник по математике, М: Высшая школа, 1970, 556 с.

[10] Нормы летной годности гражданских легких самолетов. НЛГ-23, 2023, 236 с.

[11] ***Фомин С.В.*** Система Счисления. М: «Наука», 1980. 48 с.

[12] ***Скворцов Е.Б., Коноплева В.М., Шелехова А.С., Шелехова С.В.*** Законы авиационного рынка и управление развитием авиастроения / XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сб. науч. тр. М: ИПУ РАН, 2019. С.2272-2279.

[13] ***Скворцов Е.Б., Шелехова С.В., Самойлов И.А., Лесничий И.В***. Измерение авиарынка и планирование поставок пассажирских самолётов. *Полёт*. 2022. №5. С.3-13.

[14] ***Газале М.*** Гномон. От фараонов до фракталов // Пер. с англ. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2002. 272 с.

[15] Авиационные правила. Часть 139. Сертификационные требования к аэродромам. АП-139, 1996, 85 с.

[16] ***Сигов А.С., Нефедов В.И., Битюгов В.К., Самохина Е.В.*** Метрология, стандартизация и сертификация. – М.: «Форум», 2012. 33 с.

[17] ***Берновский Ю.Н.*** Основы идентификации продукции и документов. М.: «ЮНИТИ-ДАНА». 2007. 351 с.

Сведения об авторе

Скворцов Евгений Борисович, 1947 г. рождения. Окончил Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе (МАИ) в 1971 г., к.т.н. (1993). Начальник научно-исследовательского отдела ЦАГИ. В списке научных трудов около 80 работ, включая 8 патентов на изобретения. Область научных интересов – исследование перспектив развития авиационной техники, разработка технических концепций и новых технологий создания летательных аппаратов. *skvortsov-tsagi@yandex.ru.*

Поступила в редакцию 13.12.2024, после рецензирования 05.03.2025. Принята к публикации 13.03.2025.

CC BY

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-174-186

Ontology of passenger aviation: metric and law of development

© 2025, E.B. Skvortsov

Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N.E. Zhukovsky (TsAGI), Zhukovsky, Russia

Abstract

This paper focuses on the classification of key indicators characterizing the transport capabilities of a passenger aircraft, including the transported load, flight range, and required runway length. The specified characteristics of passenger aircraft are summarized. The purpose of the article is to develop a metric for the passenger aircraft market. The paper provides a rationale for the constructed topological model of air transportation between populated areas on the Earth's surface and introduces eight classes of transportation range along with four categories of a transport row based on passenger capacity. Using the methods of information theory, eight classes of aircraft passenger capacity are identified within each transport row, and their corresponding ranges are determined. A correlation between passenger capacity classes and transportation range is established. The study reveals aviation market development patterns useful for forecasting and planning. Based on a mathematical model, the classification of passenger aviation basing conditions is examined, resulting in a runway length classification scale that closely aligns with practical standards. A method for identifying passenger aircraft in the developed three-dimensional class structure is proposed, and a metric for passenger aviation is compiled.

Keywords: *ontology, passenger aviation, mathematical model, metric, law of development.*

For citation: *Skvortsov EB.* Ontology of passenger aviation: metric and law of development [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 174-186. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-174-186.

Acknowledgment: the author expresses their gratitude to the leading engineer of TsAGI S.V. Shelekhova for her help in preparing the article.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Icasahedron-dodecahedral energy-power frame of the Earth [5]
Figure 2 – Cutting a regular spherical pentagon on the plane
Figure 3 – Relative distance scale
Figure 4 – Number of passengers (p) and transportation range (r)
Figure 5 – Moderate transport range and assortment of aircraft on the world market 1954-1962
Figure 6 – Annual passenger turnover of the global air transportation market [13]
Figure 7 – Evolution of the global passenger air transportation market [13]
Figure 8 – Runway length (d) and transportation range (r)
Figure 9 – The silver pentagon (a) and the gnomon of the silver pentagon (b)
Table 1 – Classification by flight range
Table 2 – Two-coordinate P(r) structure of the passenger aircraft market (Part 1)
Table 3 – Correlation of the air transportation market and the aircraft supply market
Table 4 – Recommended classification of artificial turf runways
Table 5 – Two-coordinate $d(r)$ structure of the passenger aircraft market (Part 2)

References

[1] ***Konopleva VM, Lesnichy IV, Samoilov IA, Skvortsov EB, Shelekhova SV.*** On the aircraft classification in the passenger aircraft market [In Russian]. *Air fleet technology*. 2019; 1: 35-41.
[2] Airworthiness standards for transport category aircraft [In Russian]. NLG-25. 2023. 379 p.
[3] ***Christaller Walter.*** The Central Asian Region in South Germany. Jena: Gustav Fischer. 1933. 331 p.
[4] ***Shuper V.*** August Lesch: a recognized but forgotten genius [In Russian]. *Knowledge is power*. 2007; 2(956): 53-57.
[5] ***Lachugin KA.*** Is Earth a Big Crystal? [In Russian]. Moscow: "Zakharov", 2005. 224 p.

[6] ***Voloshinov AV.*** Pythagoras: Union of Truth, Goodness and Beauty [In Russian]. Moscow: "Prosveshchenie", 1993. 224 p.
[7] ***Livio Mario.*** The Number of God. The Golden Section: the Formula of the Universe [In Russian]. Moscow: "AST", 2015. 425 p.
[8] ***Stakhov AP.*** Codes of the golden ratio [In Russian]. Moscow: "Radio and communication". 1984. 152 p.
[9] ***Ryvkin AA, Ryvkin AZ, Khrenov LS.*** Handbook of mathematics [In Russian]. Moscow: Higher school, 1970. 556 p.
[10] Airworthiness standards for civil light aircraft [In Russian]. NLG-23, 2023. 236 p.
[11] ***Fomin SV.*** Number system [In Russian]. Moscow: "Science", 1980. 48 p.
[12] ***Skvortsov EB, Konopleva VM, Shelekhova AS, Shelekhova SV***. Laws of the aviation market and management of aircraft industry development [In Russian]. XIII All-Russian Conference on Management Problems VSPU-2019: Coll. sci. tr. [Electronic resource]. Moscow: IPU RAS, 2019. P.2272-2279.
[13] ***Skvortsov EB, Shelekhova SV, Samoilov IA, Lesnichy IV***. Measuring the aviation market and planning passenger aircraft deliveries [In Russian]. *Flight*. 2022; 5: 3 13.
[14] ***Gazale M.*** Gnomon. From pharaohs to fractals [In Russian]. Translated from English. Moscow - Izhevsk: Institute of Computer Research. 2002. 272 p.
[15] Aviation regulations. Part 139. Certification requirements for aerodromes. AP-139, 1996, 85 p.
[16] ***Sigov AS, Nefedov VI, Bityugov VK, Samokhina EV.*** Metrology, standardization and certification [In Russian]. Moscow: "Forum", 2012. 33 p.
[17] ***Bernovsky YuN.*** Fundamentals of product and document identification [In Russian]. Moscow: "UNITY-DANA". 2007. 351 p.

About the author

Evgeniy Borisovich Skvortsov (b. 1947) graduated from the Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (MAI) in 1971, Ph.D. (1993). Head of the Research Department at FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of about 80 works, including 8 patents for inventions. The scientific interests include the study of the prospects for aviation technology development, as well as the development of technical concepts and new technologies for aircraft design. *skvortsov-tsagi@yandex.ru.*

Received December 13, 2024, Revised March 05, 2025. Accepted March 13, 2025.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.5 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-187-197

Онтологический подход к цифровизации медицинских осмотров и диспансерного наблюдения на базе телемедицинской платформы

© 2025, Г.Ю. Порецкова, А.В. Иващенко✉, А.А. Тяжева, С.В. Плахотникова, Г.Э. Жданович, Е.В. Чекина

Самарский государственный медицинский университет (СамГМУ), Самара, Россия

Аннотация

Предложен онтологический подход к построению цифровой телемедицинской платформы, обеспечивающий возможность конфигурирования и настройки процессов сбора и обработки медицинских данных в потоковом режиме в зависимости от назначения и применения. Впервые сформулирована обобщённая задача о медицинском осмотре как многокритериальная оптимизационная задача исследования операций. Предложены варианты реализации цифровой телемедицинской платформы для ведения периодических медицинских осмотров и диспансерного наблюдения пациентов и даны рекомендации по программной архитектуре, способной адаптироваться к условиям решения задачи в практическом здравоохранении. База знаний цифровой телемедицинской платформы представлена в виде семантической сети, которая объединяет понятия с соответствующими атрибутами и связывает цифровые профили пациентов с результатами медицинской диагностики. Применение онтологии обеспечивает конфигурируемость и адаптивность цифровой телемедицинской платформы, что способствует высокой эффективности её использования для сбора данных в учреждениях здравоохранения. Опыт внедрения цифровой телемедицинской платформы с возможностью настройки процессов сбора данных на базе онтологии показал необходимость адаптировать информационно-логические модели хранимых данных и процессы их внесения средствами интерактивных пользовательских интерфейсов, повышая производительность медицинского персонала. Предложенный подход имеет перспективу при сборе данных для обучения искусственных нейронных сетей в системах поддержки принятия врачебных решений.

Ключевые слова: *телемедицина, персонализированная медицина, медицинский осмотр, цифровая медицина, онтология, база знаний, семантическая сеть.*

Цитирование: *Порецкова Г.Ю., Иващенко А.В., Тяжева А.А., Плахотникова С.В., Жданович Г.Э., Чекина Е.В.* Онтологический подход к цифровизации медицинских осмотров и диспансерного наблюдения на базе телемедицинской платформы. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.187-197. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-187-197.

Вклад авторов: Порецкова Г.Ю. – разработка концепции статьи, проработка плана исследования, редактирование текста статьи; Иващенко А.В. – разработка формальной постановки задачи о медицинском осмотре; Тяжева А.А. – проведение тестирования, обработка полученных результатов; Плахотникова С.В. – проведение тестирования, структурирование и обработка полученных результатов тестирования; Жданович Г.Э. – реализация программного обеспечения; Чекина Е.В. – разработка информационно-логических моделей.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие медицинского Интернета вещей и телемедицинских платформ [1-3] позволяет по-новому решать задачи медицинского обследования и лечения пациентов. Инструменталь-

ный сбор данных о состоянии здоровья с помощью датчиков и диагностических комплексов обеспечивает технологический базис для создания и ведения цифрового профиля каждого пациента, что соответствует современным тенденциям развития дистанционного мониторинга здоровья [4] и персонализированного здравоохранения [5].

Опыт создания и практического использования цифровой телемедицинской платформы Самарского государственного медицинского университета *Health Check-up* [6] подтверждает широкие возможности по сбору разнообразной диагностической информации и использования её для поддержки принятия врачебных решений. В настоящее время в платформу интегрировано более 50 датчиков и систем, что позволяет собирать различные показатели здоровья пациентов в потоковом дистанционном режиме.

Такое разнообразие обеспечивает высокую адаптивность телемедицинских услуг, однако на практике может привести к дополнительным задержкам и трудозатратам на автоматизацию процесса сбора информации. Для накопления в медицинской информационной системе данных с датчиков и документации (экспертные заключения профильных врачей, результаты проведения диагностических исследований, дневники лечащих врачей) требуется структурирование информации. Для этого может быть использован онтологический подход к конфигурированию и настройке телемедицинской платформы сбора и обработки медицинских данных [7, 8]. Использование онтологии, как формальной модели предметной области, позволяет структурировать собираемые показатели и процедуру их сбора и обработки. В результате обеспечивается производительность и адаптивность телемедицинской платформы, необходимая для её использования на практике.

1 Существующие подходы

При практическом применении универсальной цифровой телемедицинской платформы необходима её настройка под каждую методику медицинской диагностики. Данные вопросы рассматриваются отдельно в работах по цифровизации процессов медицинского осмотра [9, 10] и диспансерного наблюдения [11, 12]. Стоит также отметить важность решения организационных вопросов [13]. Для комплексного решения задачи автоматизации медицинских осмотров необходимо перестроить подход к внедрению телемедицинских платформ с учётом современных тенденций и перспектив [14-16].

Процесс сбора данных в ходе периодических медицинских осмотров отличается от процедуры контроля состояния здоровья в ходе диспансеризации. В первом случае необходимо за минимальное время собрать одинаковый набор параметров с максимальной группы пациентов. Это обеспечит высокую пропускную способность и эффективность работы медицинского персонала. В рамках диспансерного учёта требуется раздельно вести каждого пациента, подстраивая последовательности измерений параметров его здоровья в соответствии с индивидуальными особенностями, характером и формой течения заболевания. Для повышения эффективности информационной поддержки лечения необходимо внедрить в информационные медицинские системы процесс непрерывного слияния данных и знаний в разных форматах из различных источников. Решение этой задачи, как правило, осуществляется с использованием онтологического подхода [17, 18]. Результатом применения такого подхода является единое представление данных, которое можно использовать, например, для прогноза течения болезни, планирования лечения и др.

Современная цифровая телемедицинская платформа должна обеспечивать полноценное решение обеих задач, для чего на уровне конфигурации баз данных и алгоритмов сбора информации необходимо реализовать соответствующие сервисы настройки. В данной статье используется онтологический подход построения базы знаний (БЗ) в виде семантической се-

ти, которая объединяет понятия с атрибутами и связывает цифровые профили пациентов с результатами медицинской диагностики посредством отношений между ними.

2 Формализация задачи медицинского осмотра

Медицинский осмотр можно представить как последовательность фиксации параметров здоровья пациента в виде временного ряда событий и рассматривать как оптимизационную задачу исследования операций. Состояние здоровья пациента p_i можно описать характеристиками здоровья $c_{i,j,k}$ рядом параметров:

$$c_{i,j,k} = c_{i,j,k}\left(p_i, g_j, w_{i,j,k}, t'_{i,j,k}\right) = \{0,1\}, \tag{1}$$

где: g_j – тип параметра, $t'_{i,j,k}$ – время актуальности измерения параметра, $w_{i,j,k}$ – его истинное значение, $i = 1..N_p$ – идентификатор пациента, $j = 1..N_g$ – условный порядковый номер параметра, $k = 1..N_w$ – условный порядковый номер значения характеристики.

Характеристика $c_{i,j,k}$ представляет собой булеву переменную, её значение можно считать равным «1», если оно известно и измеримо.

Параметры здоровья пациента изменяются объективно в связи с появлением и последующим течением заболевания. Для получения данной информации врачу необходимо провести инструментальную медицинскую диагностику очно или средствами телемедицинского обследования. Каждый параметр регистрируется инструментально специальным медицинским датчиком или сенсорным оборудованием. Событие измерения параметра в процессе медицинской диагностики $s_{i,j,m,n}$ можно описать в виде:

$$s_{i,j,m,n} = s_{i,j,m,n}\left(p_i, g_j, d_m, v_{i,j,m,n}, t_{i,j,m,n}, \Delta t_{i,j,m,n}\right) = \{0,1\}, \tag{2}$$

где d_m – задействованный медицинский персонал, $m = 1..N_d$ – идентификатор сотрудника, $v_{i,j,m,n}$ – измеренное значение, $t_{i,j,m,n}$ – время измерения, $\Delta t_{i,j,m,n}$ – продолжительность обследования, $n = 1..N_v$ – условный порядковый номер измерения.

Эффективная диагностика состоит в подборе такого временного ряда $\{s_{i,j,m,n}\}$, который максимально соответствует по контролируемым параметрам, времени и точности измерений временному ряду $\{c_{i,j,k}\}$. Следовательно, задачу медицинского осмотра можно представить в виде задачи многокритериальной оптимизации по следующим целевым функциям для группы пациентов $\{p_i\}$.

Во-первых, необходимо обеспечить своевременность, т.е. для каждого изменения параметра найдётся соответствующее измерение, проведённое в течение заданного интервала времени:

$$\forall c_{i_1,j_1,k}\ \exists s_{i_2,j_2,m,n} : \left(p_{i_1} = p_{i_2}\right) \wedge \left(g_{j_1} = g_{j_2}\right) \wedge t_{i_2,j_2,m,n} \in \left[t'_{i_1,j_1,k}, t'_{i_1,j_1,k} + \Delta\xi\right], \tag{3}$$

где $\Delta\xi$ – допустимое отклонение по времени (опоздание).

Для обеспечения этих условий при априорной неопределённости $c_{i,j,k}$ необходим максимум измерений, то есть:

$$N = \sum_{i,j,km,n} c_{i,j,k} \cdot s_{i,j,m,n} \cdot \delta\left(t_{i,j,m,n} \in \left[t'_{i,j,k}, t'_{i,j,k} + \Delta\xi\right]\right) \to \max, \tag{4}$$

где $\delta(x) = \begin{cases} 1, x = true; \\ 0, x = false. \end{cases}$

Во-вторых, должна быть обеспечена точность измерения:

$$\forall c_{i_1,j_1,k}, s_{i_2,j_2,m,n}, \left(p_{i_1} = p_{i_2}\right) \wedge \left(g_{j_1} = g_{j_2}\right) \wedge t_{i_2,j_2,m,n} \in \left[t'_{i_1,j_1,k}, t'_{i_1,j_1,k} + \Delta\xi\right]: \\ \left|w_{i_1,j_1,k} - v_{i_2,j_2,m,n}\right| \to 0. \tag{5}$$

Для этого нужно, например, обеспечить минимум среднего линейного отклонения:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i,j,km,n} c_{i,j,k} \cdot s_{i,j,m,n} \cdot \delta\left(t_{i,j,m,n} \in \left[t'_{i,j,k}, t'_{i,j,k} + \Delta\xi\right]\right) \cdot \left|w_{i,j,k} - v_{i,j,m,n}\right| \to 0. \tag{6}$$

Данная задача должна быть дополнена подзадачей организационного управления по минимизации загрузки врачей при максимизации количества пациентов:

$$D = \sum_{i,j,m,n} s_{i,j,m,n} \cdot \Delta t_{i,j,m,n} \to \min; \\ P = \sum_{i} p_i \to \max; \\ \forall d_m : t_{i,j,m} \in \left\{\left(t_m^{нач(1)}, t_m^{ок(1)}\right), \left(t_m^{нач(2)}, t_m^{ок(2)}\right), \ldots, \left(t_m^{нач(M)}, t_m^{ок(M)}\right)\right\}. \tag{7}$$

Введённые целевые функции предполагают минимизацию избыточных измерений. Задача о медицинском осмотре представляется сложной для решения с учётом неопределённости $c_{i,j,k}$, однако она может быть упрощена для частных случаев.

Например, задача о периодическом медицинском осмотре (можно принять $j = k$) может быть сформулирована следующим образом:

$$N = \sum_{i,j} \sum_{m,n} c_{i,j} \cdot s_{i,j,m} \to \max; \\ D = \sum_{i,j,m} s_{i,j,m} \cdot \Delta t_{i,j,m} \to \min; \\ P = \sum_{i} p_i \to \max; \\ \forall d_m : t_{i,j,m} \in \left\{\left(t_m^{нач(1)}, t_m^{ок(1)}\right), \left(t_m^{нач(2)}, t_m^{ок(2)}\right), \ldots, \left(t_m^{нач(M)}, t_m^{ок(M)}\right)\right\}. \tag{8}$$

В такой постановке она становится близка задаче о назначениях [19].

Задачу о диспансерном наблюдении можно сформулировать по типу задачи построения расписания (планирования) [19] следующим образом:

$$N = \sum_{i,j,km,n} c_{i,j,k} \cdot s_{i,j,m,n} \cdot \delta\left(t_{i,j,m,n} \in \left[t'_{i,j,k}, t'_{i,j,k} + \Delta\xi\right]\right) \to \max; \\ L = \frac{1}{N} \sum_{i,j,km,n} c_{i,j,k} \cdot s_{i,j,m,n} \cdot \delta\left(t_{i,j,m,n} \in \left[t'_{i,j,k}, t'_{i,j,k} + \Delta\xi\right]\right) \cdot \left|w_{i,j,k} - v_{i,j,m,n}\right| \to 0; \\ P = \sum_{i} p_i \to \max. \tag{9}$$

3 Онтология медицинского осмотра

Введённые определения и постановки использованы при внедрении цифровой телемедицинской платформы *Health Check-up* в медицинских организациях Самары для проведения периодических медицинских осмотров, диспансерного наблюдения, дистанционного мониторинга состояния пациентов. Необходимость решения оптимизационных задач в этих случаях обусловлена требованиями высокой производительности процесса сбора медицинской

информации. Необходимо эффективно использовать диагностические приборы телемедицинской платформы для максимизации количества обследованных пациентов в минимальное время и с оптимальной загрузкой медицинского персонала.

Настройка телемедицинской платформы в соответствии с особенностями решаемой задачи (периодический медицинский осмотр или диспансерное наблюдение) согласно введённым целевым функциям обеспечивается онтологией, определяющей основные понятия и параметры цифровой диагностики. Онтология представляет БЗ предметной области в виде семантической сети, объединяющей концепты с соответствующим атрибутивным описанием с помощью отношений, связывающих цифровые профили пациентов с результатами медицинской диагностики. Использование онтологии позволяет обеспечить конфигурируемость и адаптивность цифровой телемедицинской платформы и добиться высокой эффективности её применения для сбора данных в учреждениях практического здравоохранения.

Информационно-логическая модель БЗ для периодического медицинского осмотра (см. рисунок 1) основана на результатах измерений, собранных с использованием платформы *Health Check-up*, и профилактических осмотров. В этой БЗ представлены данные, необходимые для узкоспециализированного периодического медицинского осмотра и медицинского скрининга.

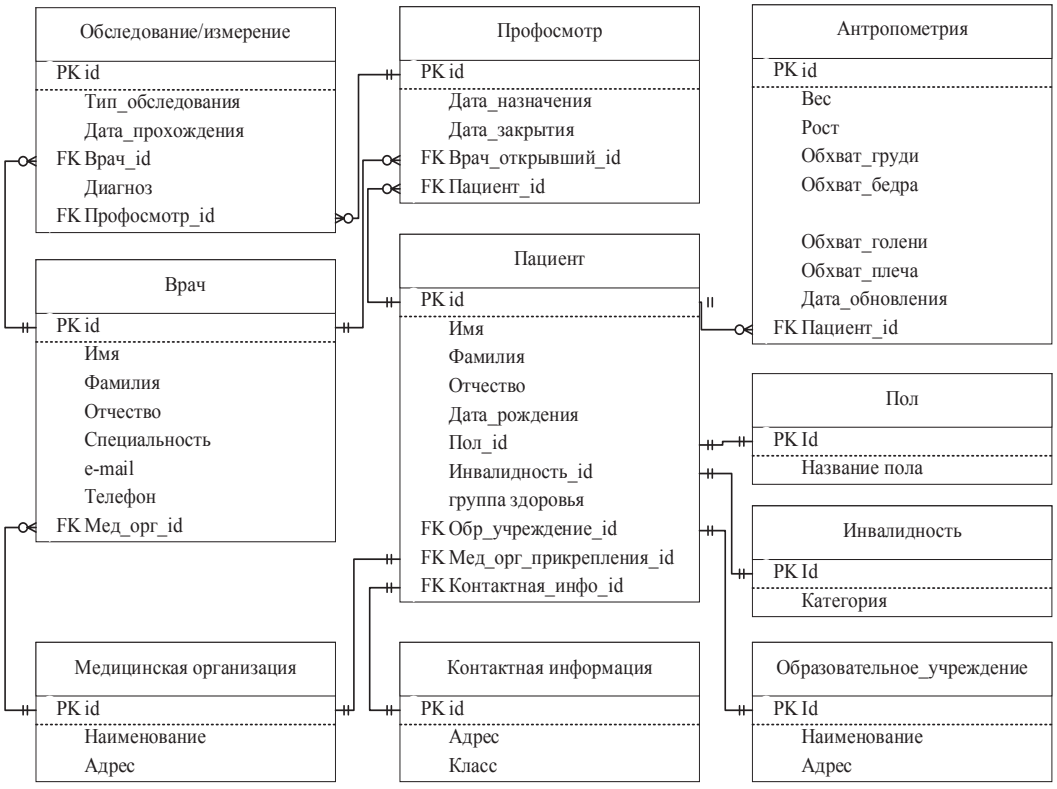


Рисунок 1 – Основные концепты базы знаний цифровой телемедицинской платформы периодического медицинского осмотра обучающихся (школьников)

Структура БЗ телемедицинской платформы диспансерного наблюдения (см. рисунок 2) более детализирована и включает возможность отслеживания истории пациента и лечения с мониторингом его состояния, проведённых лечебно-профилактических мероприятий, назначенной помощи или проведения углублённых обследований по каждому из диагнозов.

При диспансерных осмотрах детей отслеживается изменение антропометрических данных и показателей здоровья, введена таблица с нормами по половозрастному признаку, что

позволяет врачам видеть отклонения от нормы. На завершающем этапе автоматически формируется карта диспансерного осмотра. Схема поддерживает сложные связи между пациентами и их медицинскими данными, что позволяет отслеживать динамику здоровья и способствует улучшению качества медицинского обслуживания.

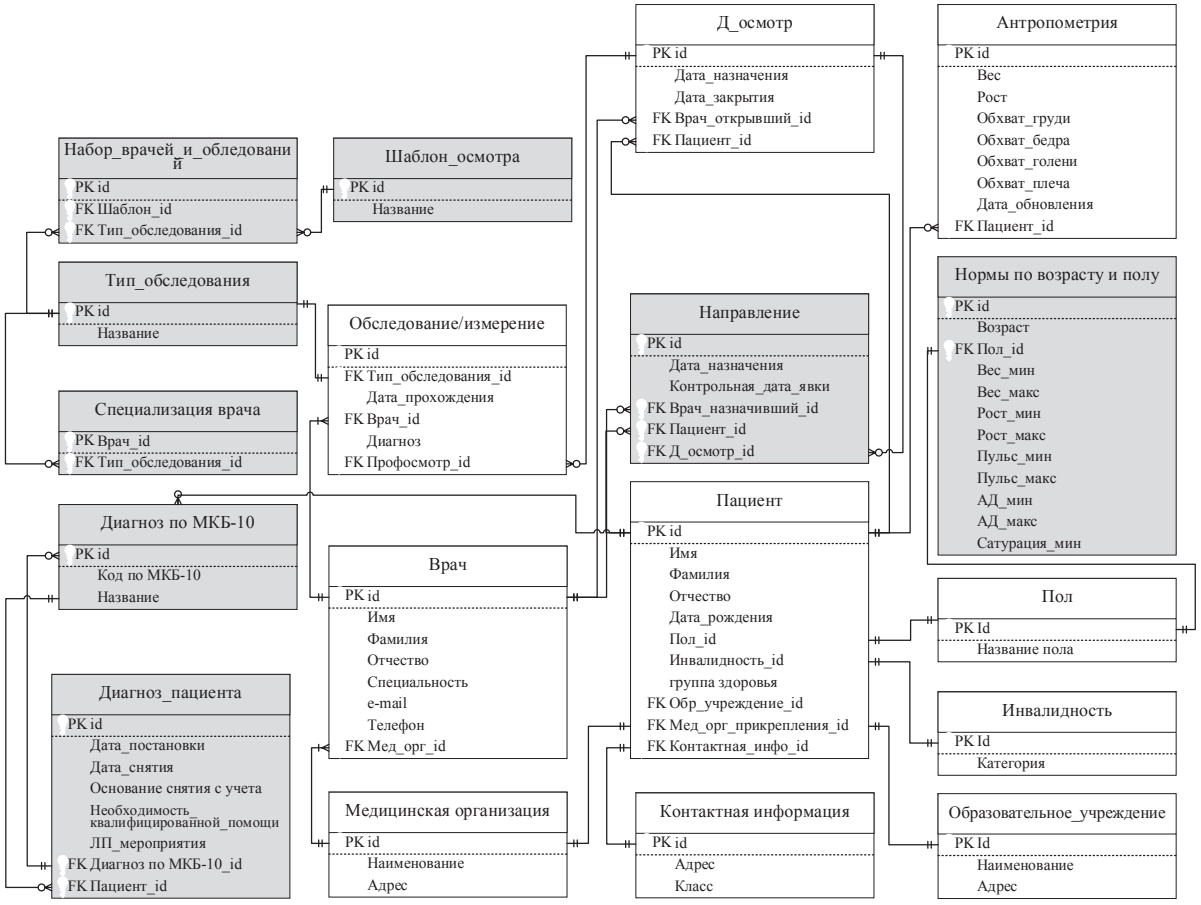


Рисунок 2 – Основные концепты базы знаний цифровой телемедицинской платформы диспансерного наблюдения обучающихся (школьников)

С учётом предложенной концептуальной схемы БЗ в пользовательском интерфейсе телемедицинской платформы диспансерного наблюдения доработано окно проведения диспансерного осмотра. Процедура заполнения медицинской информации формализуется в виде процесса последовательного заполнения соответствующих форм. При адаптированном подходе к организации этого процесса медицинский персонал освобождается от избыточного ввода данных. Это достигается за счёт однократного ввода данных пациента, которые дополняются при повторных осмотрах.

Адаптированный подход к организации процесса сбора медицинских данных содержит три этапа.

1) Проектирование методики сбора данных с учётом нормативов времени, необходимого на подготовку к процедурам и проведение измерений (необходимо учитывать время на заполнение согласий и другой документации, если это требуется).
2) Подготовка места для проведения обследования с учётом возможности имеющихся помещений и их оснащения для проведения обследований и ожидания (необходимо учесть траектории группового движения обследуемых и предусмотреть места для ожидания).
3) Конфигурирование пользовательского интерфейса программного обеспечения телемедицинской платформы для ускорения ввода данных.

Онтологическое описание данных позволяет группировать поля ввода медицинской информации в зависимости от характера решаемой задачи и сокращать время медицинского персонала, необходимое на ввод данных.

4 Практическое применение

Рассматриваемые в статье задачи связаны с практическим здравоохранением и касаются удобства и производительности процесса ввода медицинских данных с использованием приборов цифровой телемедицинского платформы и дополнения их ручным способом. Опыт внедрения цифровой платформы *Health Check-up* показал необходимость адаптировать информационно-логические модели хранимых данных и процессы их ввода средствами интерактивных пользовательских интерфейсов с целью сокращения затрат времени и повышения производительности медицинского персонала.

Доработка пользовательского интерфейса позволила применить цифровую телемедицинскую платформу для профилактического осмотра в образовательных организациях г. Самары. В апробации участвовали 128 обучающихся общеобразовательных школ и 50 обучающихся спортивной школы [15], которая показала, что внедрение цифровой телемедицины позволяет сократить время осмотра. Временные затраты при заполнении формы данных на одного пациента при использовании прежнего и разработанного интерфейса составили 3,5 и 2,2 минуты соответственно.

Сокращение времени получено и за счёт однократного внесения данных пациентов, отображаемых далее при автоматизированном формировании заключений специалистов и карты диспансерного наблюдения. Предложенный интерфейс позволяет обеспечить полный и правильный ввод данных, исключить ошибки при анализе антропометрических и физиометрических показателей за счёт представления диапазона нормальных значений параметров и характеристик для каждого возраста пациентов. Интерфейс позволяет формировать варианты итоговой отчётности с градацией по полу, возрасту, диагнозу, времени повторного осмотра, объёма требуемых мероприятий для оздоровления.

В этом заложен резерв повышения качества медицинского обслуживания детей за счёт автоматизации и контроля процесса ведения пациентов, находящихся на диспансерном наблюдении. Это позволяет своевременно выявлять возможные осложнения заболевания, назначать необходимое лечение и принимать меры для поддержания и улучшения общего физического и психологического состояния детей.

Заключение

Развитие телемедицинских технологий – это важный этап совершенствования персонализированной медицины и повышения эффективности системы здравоохранения в целом. Адаптация пользовательских интерфейсов и систем хранения данных позволяет обеспечить эффективность применения цифровых решений в медицине и облегчить труд медицинского персонала по обследованию пациентов и вводу медицинских данных.

Предложенная в данной статье онтологическая модель и постановка задачи о медицинском осмотре в терминах теории исследования операций позволяет учесть требования эффективности и производительности сбора медицинской информации на этапе проектирования БЗ и построения её информационно-логической модели. В результате может быть построена адаптивная цифровая платформа универсального применения, что расширяет область её использования на практике и снижает трудоёмкость внедрения и последующей эксплуатации.

Список источников

[1] ***Аксенова Е.И., Горбатов С.Ю..*** Интернет медицинских вещей (IoMT): новые возможности для здравоохранения. М.: ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ», 2021. 36 с.

[2] ***Mathkor D., Mathkor N., Bassfar Z., Bantun F., Sláma P., Ahmad F., Haque S.*** Multirole of the Internet of Medical Things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends. Journal of Infection and Public Health. Vol.17. Issue 4. 2024. P.559-572. DOI: 10.1016/j.jiph.2024.01.013.

[3] ***Dwivedi R., Mehrotra D., Chandra S.*** Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research. Vol. 12(10). Issue 2. 2022. P.302-318. DOI: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010.

[4] ***Дедов И.И., Тюльпаков А.Н., Чехонин И.П. и др.*** Персонализированная медицина: современное состояние и перспективы. *Вестник РАМН*. 2012. №12. С.4-12. DOI: 10.15690/vramn.v67i12.474.

[5] ***Владзимирский А.В., Лебедев Г.С.*** Основы применения телемедицинских технологий. М.: Издательство Сеченовского университета, 2022. 48 с.

[6] ***Колсанов А.В., Гаранин А.А.*** Опыт организации центра телемедицины в университетских клиниках. *Врач и информационные технологии*. 2024. № 1. С.82-91. DOI: 10.25881/18110193_2024_1_82.

[7] ***Грибова В.В, Петряева М.В., Окунь Д.Б., Шалфеева Е.А.*** Онтология медицинской диагностики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №1(27). С.58-73. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-58-73.

[8] ***Грибова В.В., Шалфеева Е.А.*** Онтология диагностики процессов. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.449-461. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-449-461.

[9] ***Сенкевич Ю.И.*** Автоматизация территориальных и ведомственных медицинских систем профилактических осмотров населения. *Медицинская техника*. 2008. № 4. С.47-52.

[10] ***Яковленкова А.О.*** Проблемы автоматизации амбулаторно-поликлинического приема в рамках автоматизации и цифровизации сферы здравоохранения. *Наукосфера*. 2024. № 1-2. С.62-65.

[11] ***Утева А.Г., Кудрина Е.А.*** Применение информационных технологий при проведении профилактических осмотров и диспансерного наблюдения лиц пожилого и старческого возраста в Удмуртской республике. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*. 2022. № 1. С.535-551. DOI: 10.24412/2312-2935-2022-3-786-803.

[12] ***Безрукова Г.А., Поздняков М.В., Новикова Т.А.*** Использование цифровых технологий в социально-гигиеническом мониторинге состояния здоровья работающих во вредных условиях труда. *Гигиена и санитария*. 2021. Т.100. №10. С.1157-1162. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1157-1162.

[13] ***Ларионова И.И., Туренко О.Ю., Калинин И.В.*** Использование информационных технологий по управлению потоками пациентов при проведении медицинских осмотров. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. 2023. Т.25. №1. С.12-17. DOI: 10.26787/nydha-2686-6838-2023-25-1.

[14] ***Порецкова Г.Ю., Тяжева А.А., Плахотникова С.В., Напалкова С.А.*** Автоматизированные комплексы в медицинских осмотрах: особенности и перспективы. *Перспективы науки*. 2024. № 9 (180). С.44-48.

[15] ***Порецкова Г.Ю., Тяжева А.А., Плахотникова С.В. и др.*** Возможности использования цифровых технологий при профилактическом осмотре школьников г. Самары. *Врач и информационные технологии*. 2023. №3. С.84-92. DOI: 10.25881/18110193_2023_3_84.

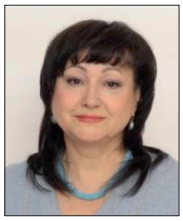
[16] ***Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025611346*** Российская Федерация. Программное обеспечение для модуля «Диспансерное наблюдение детей» аналитического программно-аппаратного комплекса для оценки состояния детей различного возраста: №2024693230, опубл. 17.01.2025 / А.В. Колсанов, Г.Ю. Порецкова, С.В. Плахотникова и др.

[17] ***Лебедев С.В., Жукова Н.А.*** Слияние медицинских данных на основе онтологий. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №2(24). С.145-159. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-145-159.

[18] ***Горобец Е.А., Диязитдинова А.Р.*** Применение онтологического подхода при проектировании медицинского мобильного приложения. *Инфокоммуникационные технологии*. 2021. Т.19. №.2. С.224-231. DOI: 10.18469/ikt.2021.19.2.11.

[19] ***Хемди А. Таха.*** Введение в исследование операций / Ун-т Арканзаса, Фейетвилл [пер. с англ. и ред. А.А. Минько]. 7-е изд. М.: Вильямс, 2007. 901 с.

Сведения об авторах



Порецкова Галина Юрьевна, 1966 г. рождения. Окончила Куйбышевский медицинский институт им. Д.И. Ульянова в 1989 г., доцент (2015), д.м.н. (2020). Заведующая кафедрой факультетской педиатрии СамГМУ. В списке научных трудов более 200 научных работ. Author ID (РИНЦ): 413526; ORCID ID – 0000-0002-3131-1368; Author ID (Scopus): 57194330674, g.yu.poreckova@samsmu.ru.

Иващенко Антон Владимирович, 1980 г. рождения. Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева в 2003 г., д.т.н. (2012), профессор (2018). Директор Передовой медицинской инженерной школы СамГМУ. В списке научных трудов более 400 научных работ. Author ID (РИНЦ): 330112; ORCID ID – 0000-0001-7766-3011; Author ID (Scopus): 42661608400, anton.ivashenko@gmail.com.

Тяжева Алёна Александровна, 1984 г. рождения. Окончила СамГМУ в 2006 г., к.м.н. (2011), доцент (2021). Доцент кафедры детских болезней СамГМУ. В списке научных трудов более 110 научных работ. Author ID (РИНЦ): 750890; ORCID ID – 0000-0001-8552-1662; Author ID (Scopus): 57193347776; a.a.tyazheva@samsmu.ru.

Плахотникова Светлана Валентиновна, 1982 г. рождения. Окончила СамГМУ в 2008 г., к.м.н. (2020). Доцент кафедры факультетской педиатрии СамГМУ. В списке научных трудов более 35 научных работ. Author ID (РИНЦ): 955414; ORCID ID – 0000-0003-0693-7737; Author ID (Scopus): 57806781000, *s.v.plahotnikova@samsmu.ru.*

Жданович Герман Эдуардович, 2001 г. рождения. Окончил Самарский государственный университет путей сообщения в 2023 г. Магистрант Передовой медицинской инженерной школы СамГМУ, ассистент кафедры медицинской физики, математики и информатики СамГМУ. В списке научных трудов 9 научных работ. AuthorID (РИНЦ): 1265642; ORCID ID – 0009-0001-4497-4216; *g.e.zhdanovich@samsmu.ru.*

Чекина Елена Владимировна, 1995 г. рождения. Окончила Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва в 2019 г. Ассистент кафедры медицинской физики, математики и информатики СамГМУ. В списке научных трудов более 30 научных работ. Author ID (РИНЦ): 1097227; ORCID ID – 0000-0002-1345-2562; *ev-chekina@yandex.ru.*

Поступила в редакцию 04.03.2025, после рецензирования 14.03.2025. Принята к публикации 26.03.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-187-197

An ontological approach to digitalization of medical check-ups and follow-up medical care based on a telemedicine platform

© 2025, G.Yu. Poretskova, A.V. Ivaschenko ✉, A.A. Tyazheva, S.V. Plakhotnikova, G.E. Zhdanovich, E.V. Chekina

Samara State Medical University, Samara, Russia

Abstract

An ontological approach to developing a digital telemedicine platform is proposed, enabling the configuration and customization of medical data collection and processing workflows in real-time based on specific objectives and applications. For the first time, the generalized problem of medical check-up is formulated as a multicriteria optimization problem of operations research. Implementation options for a digital telemedicine platform designed for periodic medical check-ups and patient monitoring are presented, along with recommendations for a software architecture that can adapt

to practical healthcare requirements. The platform's knowledge base is structured as a semantic network, integrating concepts with their corresponding attributes and linking digital patient profiles to medical diagnostic results. The use of ontology ensures the configurability and adaptability of the digital telemedicine platform, enhancing its efficiency in healthcare institutions for medical data collection. The experience of implementing a digital telemedicine platform with ontology-based customization of data collection processes has highlighted the need to adapt both the information and logical models of stored data, as well as data entry processes via interactive user interfaces, thereby improving medical personnel productivity. The proposed approach has potential for collecting data for training artificial neural networks in medical decision support systems.

Keywords: *telemedicine, personalized medicine, medical check-up, digital medicine, ontology, knowledge base, semantic network*.

For citation: *Poretskova GYu, Ivaschenko AV, Tyazheva AA, Plakhotnikova SV, Zhdanovich GE, Chekina EV.* An ontological approach to digitalization of medical check-ups and follow-up medical care based on a telemedicine platform [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 187-197. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-187-197.

Authors' contributions: Poretskova G.Yu. – conceptual design, research design, text editing; Ivaschenko A.V. – formal problem statement; Tyazheva A.A. – testing, processing of the obtained results; Plakhotnikova S.V. – testing, structuring and processing of the obtained test results; Zhdanovich G.E. – software implementation; Chekina E.V. – development of information and logical models.

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

List of figures

Figure 1 – Basic concepts of the knowledge base of the digital telemedicine platform for periodic medical check-ups of students (schoolchildren)

Figure 2 – Basic concepts of the knowledge base of the digital telemedicine platform for follow-up medical care of students (schoolchildren)

References

[1] ***Aksenova EI, Gorbatov SY.*** Internet of Medical Things (IoMT): new opportunities for healthcare [In Russian]. Moscow: GBU "NIIOZMM DZM", 2021. 36 p.

[2] ***Mathkor D, Mathkor N, Bassfar Z, Bantun F, Sláma P, Ahmad F, Haque S.*** Multirole of the Internet of Medical Things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends. *Journal of Infection and Public Health*. 2024; 17(4): 559-572. DOI: 10.1016/j.jiph.2024.01.013.

[3] ***Dwivedi R, Mehrotra D, Chandra S.*** Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2022; 12(2): 302-318. DOI: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010.

[4] ***Dedov II, Tulpakov AN, Chekhonin IP. et al.*** Personalized medicine: current state and prospects [In Russian]. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2012; 12: 4-12. DOI: 10.15690/vramn.v67i12.474.

[5] ***Vladzimirskiy AV, Lebedev GS.*** Fundamentals of the application of telemedicine technologies [In Russian]. Moscow: Sechenov University Press, 2022. 48 p.

[6] ***Kolsanov AV, Garanin AA.*** The experience of organizing a telemedicine center in university clinics [In Russian]. *Doctor and information technologies*. 2024; 1: 82-91. DOI: 10.25881/18110193_2024_1_82.

[7] ***Gribova VV, Petryaeva MV, Okun DB, Shalfeeva EA.*** Ontology of medical diagnostics for intelligent decision support systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(1): 58-73. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-58-73.

[8] ***Gribova, VV, Shalfeeva EA.*** The ontology of diagnosis of processes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 449-461. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-449-461.

[9] ***Senkevich YuI.*** Automation of territorial and departmental medical systems of preventive examinations of the population [In Russian]. *Medical equipment*. 2008; 4: 47-52.

[10] ***Yakovlenkova AO.*** Problems of automation of outpatient admission in the framework of automation and digitalization of the healthcare sector [In Russian]. *Naukosphere*. 2024; 1-2: 62-65.

[11] ***Uteva AG, Kudrina EA.*** The use of information technologies in conducting preventive examinations and follow-up of elderly and senile people in the Udmurt Republic [In Russian]. *Modern problems of healthcare and medical statistics*. 2022; 1: 535-551. DOI: 10.24412/2312-2935-2022-3-786-803.

[12] ***Bezrukova GA, Pozdnyakov MV, Novikova TA.*** The use of digital technologies in socio-hygienic monitoring of the health status of workers in harmful working conditions [In Russian]. *Hygiene and Sanitation*. 2021; 100(10): 1157-1162. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1157-1162.

[13] ***Larionova II, Turenko OYu, Kalinin IV.*** The use of information technologies for managing patient flows during medical examinations [In Russian]. *Medical and pharmaceutical journal Pulse*. 2023; 25(1): 12-17. DOI: 10.26787/nydha-2686-6838-2023-25-1.

[14] ***Poretskova GYu, Tyazheva AA, Plakhotnikova SV, Napalkova SA.*** Automated complexes in medical examinations: features and prospects [In Russian]. *Perspectives of science*. 2024; 9(180): 44-48.

[15] ***Poretskova G.Yu., Tyazheva A.A., Plakhotnikova S.V. et al.*** The possibilities of using digital technologies in the preventive examination of schoolchildren in Samara [In Russian]. *Doctor and information technology*. 2023; 3: 84-92. DOI: 10.25881/18110193_2023_3_84.

[16] ***Certificate of state registration of computer program*** No. 2025611346 Russian Federation. Software for the module "Children's outpatient observation" of the analytical hardware and software complex for assessing the condition of children of different ages [In Russian]: No. 2024693230, published 17.01.2025 / A.V. Kolsanov, G.Yu. Poretskova, S.V. Plakhotnikova et al.

[17] ***Lebedev SV, Zhukova NA.*** Integration of Medical Data Based on Ontologies [In Russian]. *Ontology of designing.* 2017; 7(2): 145-159. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-145-159.

[18] ***Gorobets EA, Diiazitdinova AR.*** Application of the Ontological Approach in Designing a Medical Mobile Application [In Russian]. *Infocommunication Technologies*. 2021; 19(2): 224-231. DOI: 10.18469/ikt.2021.19.2.11.

[19] ***Hamdy A.Taha.*** Operations research: an introduction. Tenth Edition. Global Edition. University of Arkansas, Fayetteville. Pearson Education Limited, 2017. 849 p.

About the authors

Galina Yurievna Poretskova (b. 1966) graduated from the Kuibyshev Medical Institute in 1989, Associate Professor (2015), Doctor of Medical Sciences (2020), Head of the Department of Faculty Pediatrics at Samara State Medical University. The list of scientific papers includes more than 200 scientific papers. Author ID (RSCI): 413526; ORCID ID – 0000-0002-3131-1368; Author ID (Scopus): 57194330674, *g.yu.poreckova@samsmu.ru.*

Anton Vladimirovich Ivaschenko (b. 1980) graduated from the Samara State Aerospace University in 2003, Doctor of Technical Sciences (2012), professor (2018), Director of the Higher School of Medical Engineering at the Samara State Medical University. The list of scientific papers includes more than 400 scientific papers. Author ID (RSCI): 330112; ORCID ID – 0000-0001-7766-3011; Author ID (Scopus): 42661608400, *anton.ivashenko@gmail.com.* ✉

Alyona Alexandrovna Tyazheva (b. 1984) graduated from the Samara State Medical University in 2006, PhD (2011), Associate Professor (2021), Associate Professor at the Department of Pediatric Diseases at the Samara State Medical University. The list of scientific papers includes more than 110 scientific papers. Author ID (RSCI): 750890; ORCID ID – 0000-0001-8552-1662; Author ID (Scopus): 57193347776, *a.a.tyazheva@samsmu.ru.*

Svetlana Valentinovna Plakhotnikova (b. 1982) graduated from the Samara State Medical University in 2008, PhD (2020), Associate Professor at the Department of Faculty Pediatrics at the Samara State Medical University. The list of scientific papers includes more than 35 scientific papers. Author ID (RSCI): 955414; ORCID ID – 0000-0003-0693-7737; Author ID (Scopus): 57806781000, *s.v.plahotnikova@samsmu.ru.*

German Eduardovich Zhdanovich (b. 2001) graduated from the Samara State University of Railway Communications in 2023. He is a Master's student at the Higher School of Medical Engineering of the Samara State Medical University, Assistant at the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics of the Samara State Medical University. The list of scientific papers includes 9 scientific papers. AuthorID: 1265642 (RSCI); ORCID ID – 0009-0001-4497-4216; *g.e.zhdanovich@samsmu.ru.*

Elena Vladimirovna Chekina (b. 1995) graduated from the Samara National Research University in 2019. Assistant at the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics of the Samara State Medical University. The list of scientific papers includes more than 30 scientific papers. Author ID (RSCI): 1097227; ORCID ID – 0000-0002-1345-2562; *ev-chekina@yandex.ru.*

Received March 4, 2025. Revised March 14, 2025. Accepted March 26, 2025.

УДК 004.891.2 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210

Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве

© 2025, А.И. Семёнов ✉, Б.В. Соколов, А.В. Спесивцев

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассмотрен комплексный подход к решению задачи планирования процесса уборки трав, являющийся заключительным этапом процесса кормопроизводства. Автоматизация решения задач планирования уборки трав включает составление расписания работ сельскохозяйственных кормоуборочных технических средств для выполнения технологических операций. Она основана на синтезе принципиально различающихся математических подходов к описанию и решению задачи теории расписаний в условиях трудной формализуемости и слабой структурированности объекта исследования. Разработанный подход включает онтологические, логико-динамические и нечётко-возможностные модели, методы и алгоритмы. Онтологии представляют модели знаний о взаимосвязанных процессах в рассматриваемой предметной области. В логико-динамических моделях оперативно-календарного планирования описываются ограничения и факторы, существующие в процессе уборки трав, а также определяется наиболее предпочтительный вариант технологии. Нечётко-возможностные модели стратегического планирования включают описание качественных и количественных факторов и процессов в рассматриваемой предметной области, позволяющих предварительно определить объём необходимых ресурсов для решения задачи. Совокупность применяемых моделей позволяет формально представить исследуемую предметную область, возможные сценарии учёта возмущающих воздействий и сформулировать задачу планирования уборки трав как задачу оптимального управления. Разработан прототип системы поддержки принятия решений, предназначенной для помощи при планировании и реализации процесса уборки трав.

Ключевые слова: *кормопроизводство, онтология, нечётко-возможностная модель, логико-динамическое моделирование, планирование, технология уборки трав.*

Цитирование: *Семёнов А.И. Соколов Б.В., Спесивцев А.В.* Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.198-210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-19-00823: «Разработка научных основ и интеллектуальной технологии создания и применения интегрированной автоматизированной системы проактивного мониторинга сложных агробиотехнических объектов».

Благодарности: авторы выражают благодарность Потрясаеву С.А. за разработку программного обеспечения.

Вклад авторов: Семёнов А.И. – решение задачи оперативно-календарного планирования; первоначальный текст статьи. Соколов Б.В. – концепция полимодельного описания; логико-динамическая модель оперативно-календарного планирования; онтологическая модель; финальное редактирование текста статьи. Спесивцев А.В. – нечётко-возможностная ресурсная модель; редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и согласились с основным текстом рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Процесс кормопроизводства (КмП) связывает растениеводство и животноводство, оказывая значительное влияние на развитие сельскохозяйственного предприятия (СХП) [1, 2].

В настоящее время управленческие решения при планировании технологических процессов в КмП принимаются в неавтоматизированном режиме специалистами на основе их практических навыков и теоретической подготовки. Большое число факторов, влияющих на качество планирования, не может быть своевременно проанализировано специалистами по КмП, что приводит к формированию недостаточно обоснованных планов и к снижению качества продукции, выпускаемой СХП. Перспективным направлением совершенствования процессов КмП является автоматизация и интеллектуализация планирования и управления КмП [3, 4].

Планирование КмП относится к классу задач теории расписаний, которые получили широкое распространение в различных предметных областях (ПрО) [5]. В данной статье рассматривается завершающий этап КмП – уборка трав (УТ). Под планированием УТ понимается процесс распределения сельскохозяйственных кормоуборочных ресурсов (СКР) для достижения поставленных целей по УТ при условии выполнения пространственно-временных, технологических, технических, ресурсных и организационных ограничений [7].

Известны виды планирования (стратегическое, календарное, тактическое и оперативное), где главное внимание уделяется процессам взаимодействия сложного объекта (в данном случае СКР) [7]. Стратегическое (объёмное) планирование заключается в прогнозировании объёмов и качества заготавливаемых кормов; оперативно-календарное планирование – в составлении для конкретного интервала времени расписания работ СКР, входящих в состав соответствующих технологических операций, а также в выборе наиболее предпочтительной последовательности операций, обеспечивающих эффективность процессов УТ.

При решении задач планирования в СХП широко используются мультиагентные технологии [5, 9], позволяющие осуществлять адаптацию плана к возмущающим воздействиям в процессе функционирования СХП. За счёт адаптивности и самоорганизации процессов синтеза плана и его коррекции эта технология зарекомендовала себя успешной при практической реализации. Открытыми остаются вопросы оптимальности и устойчивости планов, полученных с помощью этой технологии.

При планировании КмП с использованием имитационных моделей на основе эвристических правил удаётся преодолевать проблемы большой размерности, нестационарности, нелинейности и учёта НЕ-факторов в ходе поиска вариантов распределения ресурсов СХП. Однако, как и в случае использования мультиагентных технологий [10], вопросы поиска оптимальных планов и оценивания их устойчивости и робастности остаются открытыми [11].

Анализ существующих подходов к постановке и решению задач планирования КмП показал, что целесообразно использовать комплексное описание, поскольку каждая из используемых моделей (логико-динамические модели (ЛДМ) программного управления, нечётко-возможностные (НВМ) и онтологические модели (ОМ)) обладает своими достоинствами и ограничениями, что позволяет при реализации технологии системного моделирования взаимно усилить достоинства частных моделей и уменьшить их издержки из-за соответствующих ограничений [12, 13].

1 Технология уборки трав

Процесс КмП включает следующие этапы [14, 15]: основная обработка почвы; внесение органических удобрений; внесение минеральных удобрений; подготовка семян к посеву; предпосевная подготовка почвы; посев семян трав; уход за растениями; УТ на силос. Каждый этап выполняется последовательно в агробиологический срок соответствующими ресурсами, которыми располагает СХП.

Технологическая карта УТ представлена на рисунке 1 [15-17]. Эта карта содержит последовательность многовариантной технологической цепочки достижения конечного результата

– готовый силос. В ней отмечены условия перехода между вариантами технологии. Выбор варианта технологии УТ определяется группой факторов, которые можно отнести к трудно-предсказуемым, трудноформализуемым и трудноинтерпретируемым. Так, погодные условия могут вызвать задержку заданного срока выполнения какой-либо операции, приводя травостой к перерастанию, и, следовательно, к снижению качества УТ. Влияние болезней, вредителей, ошибок людей, занятых в КмП, также трудно формализуется.

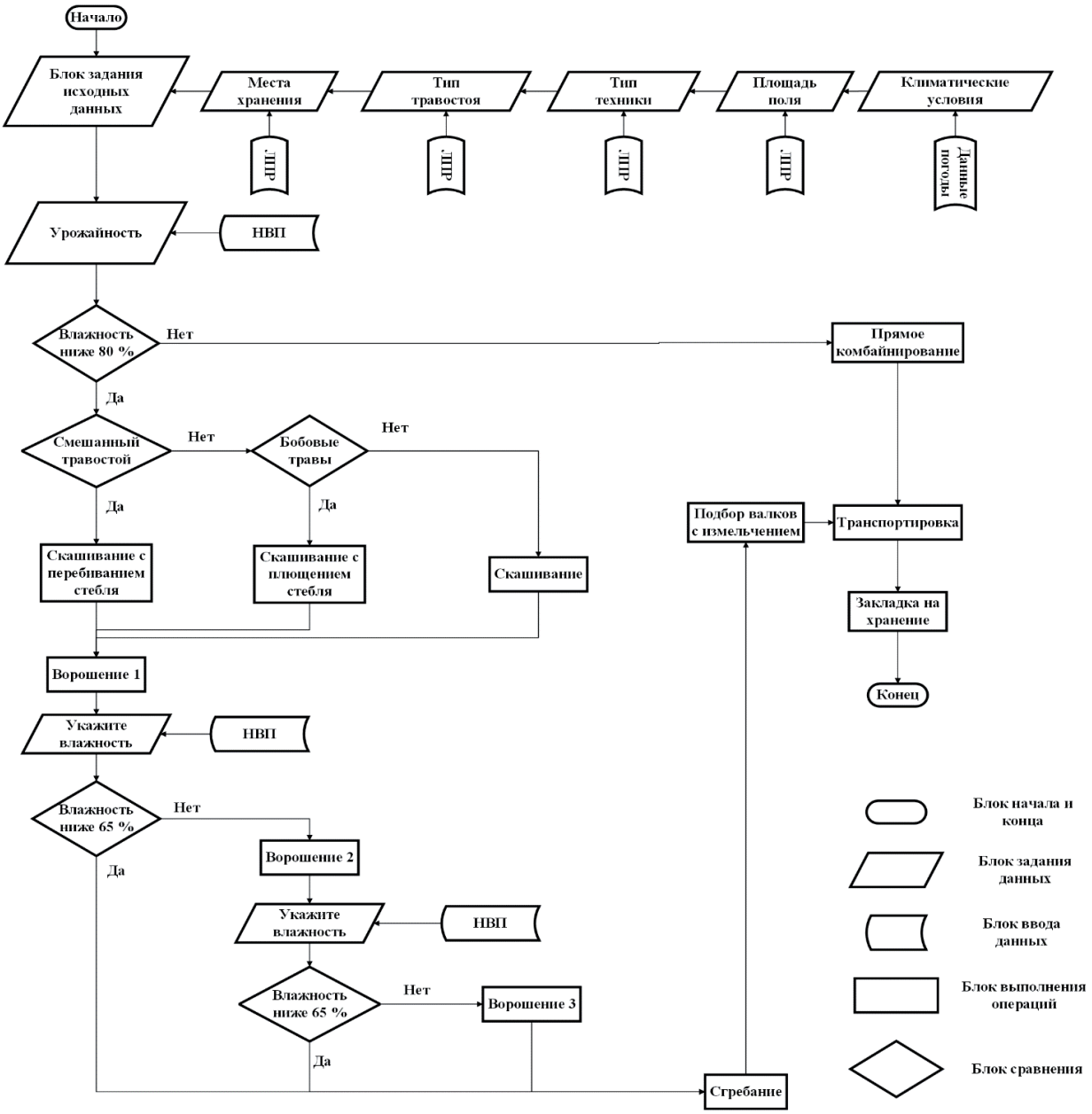


Рисунок 1 – Технологическая карта уборки трав на силос
(НВП - нечётко-возможностный подход, ЛПР - лицо, принимающее решения)

На практике принятие управленческих решений, связанных с выбором технологии в конкретном месте в конкретный момент времени, а также составление оперативного плана работ СКР лежит на лицах, принимающих решения (ЛПР) и обладающих знаниями в этой ПрО. ЛПР встречаются с трудностями, связанными с различными ограничениями, в т.ч. с неопределённостью информации об объекте и его функционировании.

Чтобы решить задачу объёмно-календарного планирования функционирования сложного объекта (КмП и УТ) предлагается использовать несколько подходов: построение ОМ представления знаний об объекте; построение многофакторных моделей объёмного планирования КмП на основе НВМ для формализации знаний о качественных и количественных факторах, включая возмущающие воздействия среды; разработка оптимизационной модели и алгоритма решения задачи оперативно-календарного планирования УТ с учётом возможных возмущающих факторов, влияющих на устойчивость и робастность синтезированных планов.

2 Модели уборки трав

2.1 Онтологическая модель

Создаваемые системы поддержки принятия решений (СППР) должны основываться на базах данных и базах знаний (БЗ) высококвалифицированных специалистов. При построении БЗ используются продукционные модели, семантические сети, фреймовые модели, онтологии и др. [18]. Например, производственные объекты можно представлять в виде абстрактных функциональных понятий [19].

Первым шагом к структуризации ПрО является разработка ОМ представления знаний об имеющихся в ней взаимосвязанных процессах. При создании ОМ описываются главные факторы и показатели эффективности, определяющие основное назначение моделируемого объекта, упорядочиваются цели и задачи деятельности. В системе управления сложным объектом ОМ позволяет установить отношения и представить их графически вместе с описанием базовых понятий ПрО, которые в дальнейшем получают формальное описание в конкретных моделях планирования [20].

На рисунках 2 и 3 (использован *Protégé*), показана ОМ, её основные концепты и их отношения применительно к технологии КмП из трав (рисунок 2) и к процессу УТ на силос (рисунок 3). В основу ОМ положены базовые понятия, которые используются при построении НВМ с целью внести дополнительные экспертные знания в общую концепцию планирования процесса УТ. Основные факторы, содержащиеся в НВМ, отображены в онтологии на рисунке 3. К ним относятся: вид скашивания, вид хранения, технологический ресурс. В онтологию внесены показатели качества, используемые в ЛДМ, например, своевременность исполнения работ.

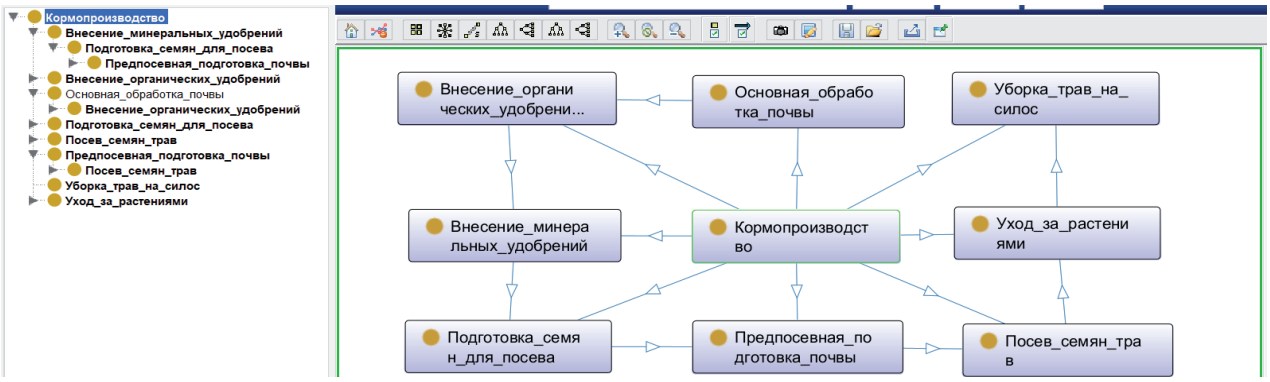


Рисунок 2 – Онтологическое представление технологии производства кормов из трав

Представленные результаты ОМ объединяют в технологическом представлении (графе) данные, информацию и знания о КмП, описание их структуры, а также логику их обработки и использования. Это позволило при разработке прототипа СППР обеспечить интеграцию

разработанных математических моделей объёмного и оперативно-календарного планирования КмП на алгоритмическом уровне, а на концептуальном уровне выполнить условия согласованности соответствующих отношений (ограничений) [21, 22].

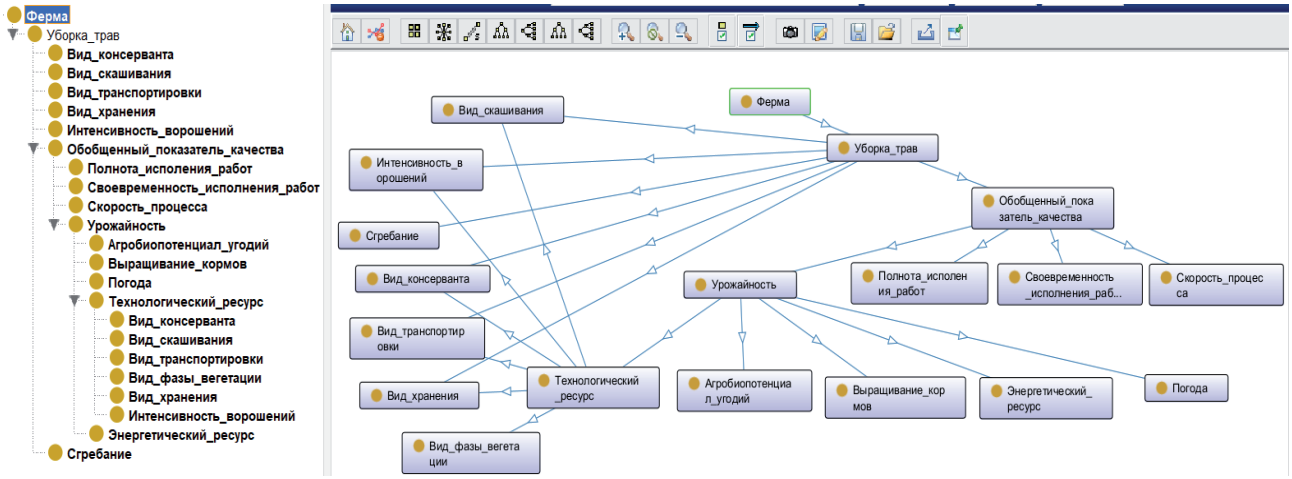


Рисунок 3 – Онтологическое представление процесса уборки трав на силос

2.2 Нечётко-возможностная ресурсная модель

Процесс УТ зависит от внешних факторов, имеющих качественное (вербальное, органолептическое) описание и сложное формальное представление. Результаты стратегического планирования УТ влияют на прогнозные значения урожайности выпускаемой продукции и её качество. При построении ресурсной модели КмП предлагается использовать НВМ, основанные на элементах нечёткой логики, экспертных знаниях и теории планирования экспериментов [23]. Представленные продукционными правилами экспертные знания могут быть связаны между собой с помощью математического аппарата теории планирования экспериментов. Строкам матрицы опроса экспертов будут соответствовать нечёткие продукционные правила, отражающие главные характеристики сложного объекта и его поведение в многомерном пространстве лингвистических переменных. Основные шаги процедуры построения обобщённой ресурсной модели КмП включают [23]:

- выявление и определение факторного пространства исследуемого объекта или явления;
- выявление интервала значений по каждому фактору. На рисунке 4 для одного из факторов, учитываемых при построении модели, принят интервал [-1;+1]. Здесь «-1» соответствует состоянию трав, не готовых к уборке «низкое (Н)»; «+1» - состояние трав, созревших для уборки «высокое (В)»;

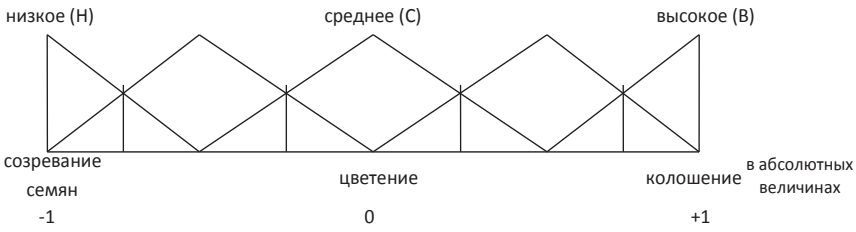


Рисунок 4 – Нечёткая шкала для лингвистической переменной «Фаза вегетации»

- поиск целевой функции (обобщённого показателя качества) Y, компоненты которой описывают взаимосвязи факторов (переменных) между собой и с функцией;
- разработка опросной экспертной матрицы, в строки которой входят факторы, оказывающие наибольшее влияние на исследуемый объект;
- выполнение экспертного опроса на основе построенной опросной матрицы, в которой представлены все значения лингвистических переменных, определяющих факторное пространство;
- преобразование вербальных оценок экспертов в числовую форму с последующей обработкой числовой информации методами теории планирования экспериментов;

- оценка значимости полученных числовых коэффициентов в аналитической модели Y;
- проверка адекватности расчётов полученной модели на соответствие реальному состоянию объекта.

По итогам опросов экспертов применительно к типовым технологическим картам КмП выделены наиболее существенные факторы, определяющие качество заготовленного силоса. В результате выполненных преобразований построена иерархия НВМ, где на верхнем уроне располагается метамодель «Прогнозируемая урожайность». На втором уровне – детальное описание переменных, входящих в метамодель.

Применительно к решаемой задаче объёмного планирования построена модель «Технологический ресурс» [12], с помощью которой можно рассчитать значения показателя технологического ресурса x_3 (МДж/кг) для последующей оценки его влияния на энергетическую питательность заготавливаемых кормов. Данная модель включает следующие переменные: x_{31} – вид фазы вегетации; $\sum_{k=1}^{s} F_k$ – виды скашивания; $\sum_{w=5}^{V} F_w$ – варианты технологий (интенсивностей) ворошений; x_{34} – варианты внесения консерванта; x_{35} – варианты досушивания; x_{36} – варианты хранения. $x_{ik}(t_f), x_{iw}(t_f)$ – переменные, характеризующие состояние выполнения операций, связанных с выполнением выбранной технологии УТ. Расчётная модель показателя имеет вид:

$$\begin{aligned} x_3 = {} & 8{,}859 + 0{,}703x_{31} + 0{,}109 \cdot \frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{k=1}^{S}\left(a_{ik} - x_{ik}(t_f)\right)^2}{\sum_{k=1}^{s} a_{ik}^2}\right] + 0{,}172 \cdot \frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{w=5}^{v}\left(a_{iw} - x_{iw}(t_f)\right)^2}{\sum_{w=5}^{V} a_{iw}^2}\right] + 0{,}359x_{34} \\ & + 0{,}140x_{35} + 0{,}359x_{36} - 0{,}109x_{34}x_{35} - 0{,}131x_{31}x_{34}x_{36} - 0{,}109 \\ & \cdot \frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{k=1}^{S}\left(a_{ik} - x_{ik}(t_f)\right)^2}{\sum_{k=1}^{s} a_{ik}^2}\right] \cdot \frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{w=5}^{v}\left(a_{iw} - x_{iw}(t_f)\right)^2}{\sum_{w=5}^{V} a_{iw}^2}\right] x_{35}. \end{aligned} \quad (1)$$

В этом случае используемая при объёмном планировании процесса КмП метамодель «Прогнозируемая урожайность» Y (т/га), состоящая из пяти базовых нечётких лингвистических переменных, в т.ч. «Технологический ресурс», имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathrm{Y} = {} & 10{,}56 + 2{,}35x_1 + 4{,}39x_2 + 3{,}18x_3 + 1{,}28x_4 + 1{,}35x_5 - 0{,}43x_1x_3 + 0{,}79x_2x_3 - 0{,}41x_2x_5 + 0{,}92x_3x_5 \\ & - 0{,}37x_1x_3x_4 + 0{,}93x_1x_3x_5, \end{aligned} \quad (2)$$

где параметры x характеризуют: x_1 – агробиопотенциал угодий; x_2 – выращивание кормов; x_3 – технологический ресурс; x_4 – материально-техническую базу; x_5 – климатическое влияние.

В моделях (1) и (2) представлены в безразмерном виде только значимые коэффициенты, отражающие экспертные знания и позволяющие связать выделяемые основные ресурсы и факторы с конечным результатом – обобщённым показателем прогнозируемой (либо требуемой) урожайности. НВМ позволяет рассмотреть различные сценарии воздействия возмущающих факторов на конечный результат реализации процесса КмП и обоснованно выделить соответствующие резервы ресурсов для каждого из этапов КмП [23, 24].

2.3 Логико-динамическая модель

Для решения задачи оперативно-календарного планирования процесса УТ разработана ЛДМ [12]. Пусть: $I=\{i_1,i_2,...,i_m\}$ – множество типов полей, подлежащих уборке; $K_k^i=\{k_1,k_2,...,k_l\}$ – множество операций по УТ на заданном поле; $R=\{r_1,r_2,...,r_n\}$ – множество СКР, имеющихся в СХП и предназначенных для УТ. В этом случае ЛДМ имеет вид:

$$\begin{gathered} M^{(0)} = \{u(t) | \dot{x}_{ik} = \sum_{r=1}^{n} e_{ikr}(t) \cdot u_{ikr}; \dot{x}_r = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{l} u_{ikr};\ x_{ik}(t_0) = 0; x_{ik}(t_f) = a_{ik}; \\ \sum_{r=1}^{n} u_{ikr} \le \xi_k P_k, \forall i, \forall k; \sum_{k=1}^{l} u_{ikr} \le \xi_r P_r, \forall i, \forall r; u_{ikr}(t) \in \{0,1\}; \xi_k \in \left[\frac{1}{P_k}; 1\right]; \xi_r \in \left[\frac{1}{P_r}; 1\right]; \\ \sum_{r=1}^{n} u_{ikr}\left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}}\left(a_{i\tilde{\alpha}} - x_{i\tilde{\alpha}}(t)\right) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}}\left(a_{i\tilde{\beta}} - x_{i\tilde{\beta}}(t)\right)\right] = 0, i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, l; r = 1, \dots, n\}, \\ \sum_{k=1}^{s} F_k = \frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{k=1}^{S}\left(a_{ik} - x_{ik}(t_f)\right)^2}{\sum_{k=1}^{s} a_{ik}^2}\right]; \sum_{w=5}^{V} F_w = \frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{w=5}^{v}\left(a_{iw} - x_{iw}(t_f)\right)^2}{\sum_{w=5}^{V} a_{iw}^2}\right], \end{gathered} \quad (3)$$

где $M^{(0)}$ – ЛДМ, которая включает: частные модели планирования технологических операций и СКР; краевые условия; технические и технологические ограничения; ограничения на управляющее воздействие; логические

ограничения «И» и «ИЛИ»; x_{ik} – переменная, характеризующая состояние выполнения операции K_k^i в ходе реализации процесса УТ; к операциям K_k^i относятся операции: скашивания, ворошения, сгребания, внесения консервирующих добавок, подбор трав, выбор средств транспортировки и выбор места хранения; e_{ikr} (t) – известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с возможностью назначить ресурс R на выполнение операции K_k^i в рамках существующих и прогнозируемых пространственно-временных ограничений (данная функция принимает значение 1, если соответствующие ограничения выполняются и 0 – в противоположном случае); u_{ikr}=1, если операции K_k^i выполняются с помощью одного из СКР, входящих в множество R, и 0 – в противоположном случае; x_r – переменная, характеризующая время задействования СКР R; $a_{i\tilde{\alpha}}$, $a_{i\tilde{\beta}}$ – заданные объёмы операций, которые входят в варианты технологий УТ; Γ_{ik1}, Γ_{ik2} – множества номеров операций, проводимых в рамках операции K_k^i, а также непосредственно предшествующих и технологически связанных с ней с помощью логических операций «И», «ИЛИ»; P_k, P_r – заданные константы, характеризующие технико-технологические ограничения, связанные с возможностью использования материальных и энергетических ресурсов при выполнении различных операций, связанных с УТ; ξ_k, ξ_r – матричные временные функции, которые позволяют задавать в интервальном виде возмущающие воздействия на компоненты процесса УТ со стороны внешней среды, например, возможные варианты воздействия погодных условий (таким же образом могут задаваться воздействия, вызывающие отказы и поломки в СКР, готовность технических сельскохозяйственных агрегатов к функционированию); F_k, F_w – возможные варианты технологий УТ в части вида скашивания, а также вида интенсивности ворошения. С помощью данных функций устанавливаются причинно-следственные связи между построенной НВМ (1) и ЛДМ (3).

Качество выполнения программ планирования УТ как сложного объекта можно оценить с помощью следующих показателей:

$$J_1 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{l}\sum_{r=1}^{n}\int_{t_0}^{t_f} q_{ikr}(\tau)u_{ikr}(\tau)d\tau\,; \tag{4}$$

$$J_2 = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{l}\left[a_{ik} - x_{ik}(t_f)\right]^2; \tag{5}$$

где (4) – функционал, с помощью которого оценивается своевременность выполнения операций при различных условиях, а q_{ikr} – штрафная функция, которая активируется при нарушении сроков какой-либо операции; (5) – показатель качества планирования, характеризующий полноту выполнения технологических операций, входящих в перечень работ, выполняемых при УТ.

Для того, чтобы связать модели объёмного и оперативно-календарного планирования вводится обобщённый показатель качества планирования КмП (в т.ч и для УТ):

$$J_{об} = \lambda_1 J_1 + \lambda_2 J_2 + \lambda_3 x_3. \tag{6}$$

С использованием разработанной ЛДМ (3) - (5) задача планирования УТ сформулирована как задача оптимального программного управления динамической системой (3), которую надо перевести из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с учётом всех пространственно-временных, технических и технологических ограничений. При наличии нескольких фазовых траекторий должна быть выбрана наилучшая, стремящаяся удовлетворить критерии показателей качества вида (4) - (5).

3 Алгоритм решения задач оперативно-календарного планирования

Для задачи оптимального программного планирования УТ одним из эффективных алгоритмов поиска наилучшей из возможных альтернатив является метод последовательных приближений Крылова-Черноусько [25]. Предлагаемая модификация алгоритма включает следующие шаги:

Шаг 1. Преобразование интегральной целевой функции (4) к терминальному виду;

Шаг 2. В качестве начального приближения $u^{(0)}(t)$ задаётся некоторое допустимое программное управление (типовой эвристический план УТ);

Шаг 3. Решается задача Коши для динамической системы вида (3) от начального до конечного моментов времени (определяются для заданного интервала оперативно-календарного планирования) с последующим определением фазовой траектории $x=x^{(k)}(t)$, где k – номер итерации, и определяются значения показателей качества планирования вида (4) и (5) в конечный момент времени;

Шаг 4. Сопряжённая система уравнений интегрируется от конечного к начальному моменту времени (в обратном времени) с начальными условиями, которые определяются из условий трансверсальности

$$\psi_{ik}(t_f) = -\frac{\partial J_{\text{об}}}{\partial x_{ik}}, \tag{7}$$

где ψ_{ik} – вспомогательная сопряжённая переменная, рассчитываемая в момент времени t_f, который является моментом завершения интервала планирования УТ.

За счёт (7) данные, информация и знания о процессах КмП, полученные от экспертов и представленные в нечётко-возможностной форме (1) и прошедшие дефаззификацию, включаются в ЛДМ оперативно-календарного планирования УТ.

В результате обратного интегрирования сопряжённой системы уравнений в начальный момент времени t_0 (начало интервала планирования УТ) рассчитывается первое приближение начальных условий для сопряжённой системы уравнений вида $\Psi_i^{(opt)}(t_0)$. На этом шаге «нулевая» итерация завершается и осуществляется переход к основному итерационному циклу поиска оптимального плана УТ;

Шаг 5. Поиск нового управления $u^{(k+1)}(t)$ (плана УТ) осуществляется от начального до конечного моментов времени (в каждый момент времени максимизируется функция Гамильтона и ищется наилучший вариант распределения ограниченных СКР, где вместе с максимизацией функции Гамильтона происходит интегрирование основной и сопряжённой систем уравнений);

Шаг 6. Проводится проверка завершения итерационного цикла поиска оптимального плана УТ с заданной точностью (ε_1) согласно следующему условию

$$\left|J_0^{(k)}(t_f) - J_0^{(k-1)}(t_f)\right| < \varepsilon_1. \tag{8}$$

При соблюдении условия (8) программное управление (оперативно-календарный план УТ) считается найденным, и формируется выходной массив результатов планирования $u^*(t)$, $\Psi^*(t)$, $J^{(opt)}$; при невыполнении условия (8) – осуществляется переход на шаг 3 до выполнения условий (8);

Шаг 7. В случае выполнения условия (8) работа алгоритма поиска плана УТ завершается.

4 Результаты оперативно-календарного планирования уборки трав

На основе разработанных моделей и алгоритмов объёмного и оперативно-календарного планирования разработан прототип СППР, с помощью которого решены практические задачи. На рисунках 5 и 6 приведены примеры планов работы СКР. На оси абсцисс показано время, необходимое для выполнения операций, входящих в состав технологического цикла УТ. На оси ординат – технологические операции УТ.

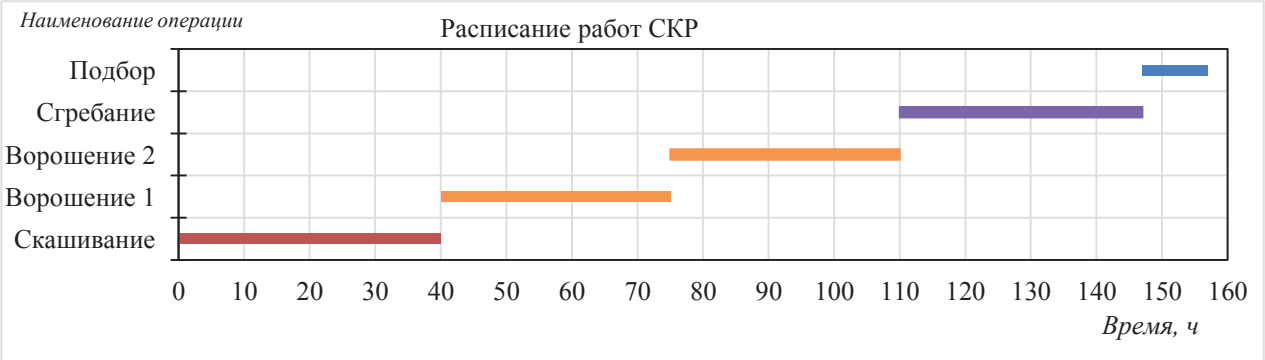


Рисунок 5 – Диаграмма планирования работ СКР
при низкой интенсивности исполнения технологических операций

За счёт оптимизации распределения СКР на одном и том же интервале планирования УТ удаётся выполнить на одну операцию ворошения больше (см. рисунок 6), чем при другом (не оптимальном) варианте плана распределения СКР (см. рисунок 5). Особенностью реализации

технологии УТ, представленной на рисунке 6, является более высокие прогнозируемые значения показателя урожайности и технологического ресурса. Результаты расчёта показателей (1) и (2) представлены в таблице 1, где «Н» - низкая, а «В» - высокая интенсивность УТ. Обозначения и переменные, представленные в таблице, соответствуют моделям (1) и (2).

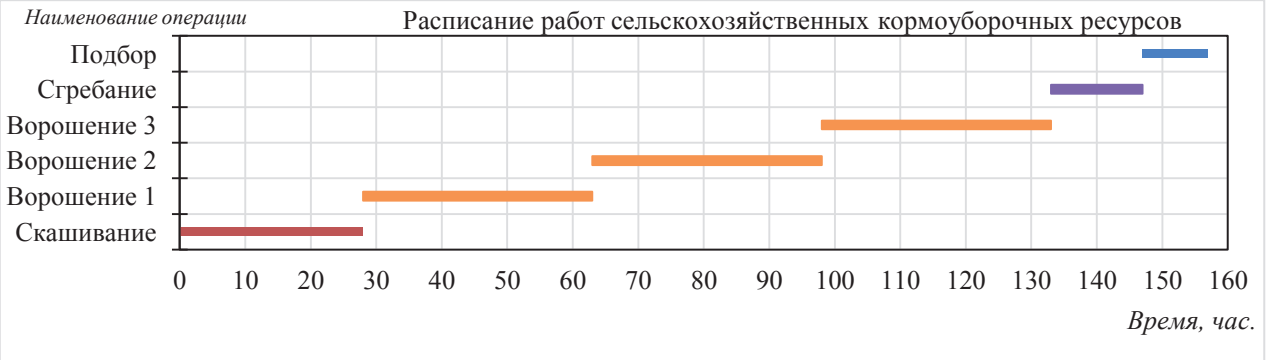


Рисунок 6 – Диаграмма планирования работ сельскохозяйственных кормоуборочных ресурсов при высокой интенсивности исполнения технологических операций

Таблица 1 – Пример расчёта результатов УТ для сценариев с низкой и высокой интенсивностью по (1) и (2)

Интенсивность технологии УТ	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	Технологический ресурс, МДж/кг
Н	0	0	0,5	0	0	0	8,945
В	0	0	1	0	0	0	9,031
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		Урожайность, т/га
Н	0	0	0	0	0		10,56
В	0	0	1	0	1		16,01

Заключение

Представлен комплексный подход к решению слабо структурированных и трудноформализуемых задач объёмного и оперативно-календарного планирования КмП. Новизна полученных результатов состоит в полимодельном описании данных задач.

В разработанной НВМ КмП в агрегированном количественно-качественном виде учитывается экспертная информация об агробиопотенциале угодий, технологии выращивания кормов, ограничениях, связанных с имеющимися технологическими ресурсами и материально-технической базой, а также параметрах, характеризующих климатическое влияние.

В результате дефаззификации в данных моделях для конкретных сценариев изменения внешних условий можно спрогнозировать урожайность кормов и оценить объём необходимых ресурсов. Предложена ЛДМ планирования УТ, позволяющая рассматривать задачу оперативно-календарного планирования как задачу оптимального программного управления. С использованием данной модели за счёт динамической декомпозиции решена исходная задача большой размерности. В ЛДМ предусмотрена возможность учёта возмущающих факторов, влияющих на результаты планирования. Согласование полученных статических и динамических моделей планирования с использованием ОМ обеспечивает на концептуальном уровне связанность основных концептов и ограничений, используемых в каждой из моделей.

Список источников

[1] ***Ибрагимов А.Г.*** Значение кормопроизводства в экономике сельского хозяйства России. *Экономика и предпринимательство*. 2019. № 10(111). С.39-41.

[2] ***Kumar S., Singh P., Devi U., Yathish K.R., Saujanya P.L., Kumar R., Mahanta S.K.*** An overview of the current fodder scenario and the potential for improving fodder productivity through genetic interventions in India. *Animal Nutrition and Feed Technology*. 2023; 23: 631-644. DOI: 10.5958/0974-181X.2023.00054.9.

[3] ***Balafoutis A.T., Van Evert F.K., Fountas S.*** Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness. May 2020. *Agronomy* 10 (5): 743. DOI: 10.3390/agronomy10050743.

[4] ***Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А.*** Использование цифровых технологий в инженерной структуре АПК. Материалы XIV Международной научно-практической интернет-конференции «Информ-Агро-2022». Москва, 2022. С.381-387.

[5] ***Скобелев П., Майоров И., Симонова Е., Ларюхин В., Яловенко О.*** Вертикальные и горизонтальные переговоры мультиагентных сервисов планирования в мультисервисной платформе управления растениеводством // Труды XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 03-06 сентября 2019 г. Самара: ОФОРТ, 2019. Т. II. С.46-51.

[6] ***Kalinin V.N., Sokolov B.V.*** Multi-model Approach to the Description of the Air-space Facilities Control Process. *Control Theory and process*, 1995, № 1, P.149-156. EDN: KTAVFT.

[7] ***Соколов Б.В.*** Динамические модели и алгоритмы комплексного планирования работы наземных технических средств с навигационными космическими аппаратами. *Труды СПИИРАН*. 2010. 2(13), С.7-44.

[8] ***Кононов А.В.*** Комбинаторная сложность составления расписаний для работ с простым линейным ростом длительностей. *Дискретный анализ и исследование операций*. 1996. Т.3, №2. С.15–32.

[9] ***Ларюхин В.Б.*** Методы и средства сопряжённого взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределённого управления ресурсами предприятия. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №2(48). С.254-273. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273.

[10] ***Скобелев П.О., Симонова Е.В., Будаев Д.В., Вощук Г.Ю., Ларюхин В.Б.*** Облачная интеллектуальная система SMART FARMING для управления точным земледелием // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018)», Санкт Петербург, 2–4 октября 2018 г. Санкт-Петербург: Издательство: «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С.261-270.

[11] ***Волхонская Е.Е***. Задача оптимального назначения автономных транспортных средств в производственно-логистической системе. *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки*. 2023. Т.31. № 2. С.20-28. DOI: 10.14498/tech.2023.2.2.

[12] ***Семёнов А.И., Кулаков А.Ю.*** Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2022. Т.65, №11. С.818-825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.

[13] ***Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В.*** Технология системного моделирования. Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. 520 с.

[14] ***Валге А.М., Ерёмин М.А., Сухопаров А.И.*** Методика моделирования технологического процесса заготовки кормов из трав. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 4(97). С.115-126.

[15] ***Победнов Ю.А., Косолапов В.М., Бондарев В.А.*** Силосование и сенажирование кормов. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2012. 22 с.

[16] ***Малков Н.Г., Чухина О.В., Демидова А.И., Чечулина В.Д.*** Влияние технологических приёмов производства зелёной массы на качество заготовки силоса. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2020. №1(102). С.91-99.

[17] ***Балабанов В.И., Манохина А.А., Шитикова А.В.*** Механизация заготовки кормов. Саратов: Амирит, 2022. 84 с.

[18] ***Боргест Н.М., Будаев Д.В., Травин В.В***. Онтология проектирования точного земледелия: состояние вопроса, пути решения. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №4(26). С.423-442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.

[19] ***Антонов В.В., Конев К.А.*** Интеллектуальный метод поддержки принятия решений в типовой ситуации. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №1(39). С.126-136. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136.

[20] ***Ермолаев К.А.*** Использование онтологии для управления знаниями предприятия. *Исследования по информатике*. 2007. №12. С.65-78.

[21] ***Месарович М., Мако Д, Такахара И.*** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир. 1973. 344 с.

[22] ***Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И.*** Теория систем и оптимального управления. Часть 2. Понятия, модели, методы и алгоритмы оптимального выбора. М.: Министерство Обороны СССР. 1987. 589 с.

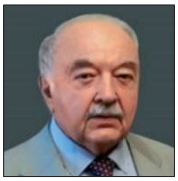
[23] ***Спесивцев А.В.*** Нечётко-возможностный подход к формализации и использованию экспертных знаний для оценивания состояний сложных объектов. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т.63, №11. С.985-994. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994.

[24] ***Popov V., Spesivtsev A., Sukhoparov A, Spesivtsev V.*** Fuzzy-multiple models of formalization of soil resources in formation of system for controlling processes of feed production from grasses // 19th International Scientific Conference Engineering For Rural Development Proceedings, Volume 19/ May 20-22, 2020/ Jelgava, P.773-777. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF176.

[25] ***Крылов И.А., Черноусько Ф.Л.*** О методе последовательных приближений для решения задач оптимального управления. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ*., 1962, Т.2, №6. С.1132–1139.

Сведения об авторах

Семёнов Александр Игоревич, 1996 г. рождения. Окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (2020). Аспирант Лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Санкт-Петербургского Института информатики и автоматизации РАН (СПИИ РАН) СПб ФИЦ РАН. ORCID 0000-0001-7980-042X. *alekssemyenov1996@gmail.com*. ✉



Борис Владимирович Соколов, 1951 г. рождения. Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, руководитель Лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИ РАН СПб ФИЦ РАН. ORCID 0000-0002-2295-7570. *sokolov_boris@inbox.ru.*

Александр Васильевич Спесивцев, 1939 г. рождения. Доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник СПИИ РАН СПб ФИЦ РАН. ORCID 0000-0002-2344-0768. *sav2050@gmail.com*.

Поступила в редакцию 20.06.2023. после рецензирования 11.03.2025. Принята к публикации 20.03.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210

An integrated approach to solving planning problems in forage production

© 2025, A.I. Semyonov ✉, B.V. Sokolov, A.V. Spesivtsev

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPb FRC RAS), St. Petersburg, Russia

Abstract

The article considers an integrated approach to solving the problem of planning the grass harvesting process, which represents the final stage of the forage production process. Automating the solution to grass harvesting planning involves scheduling the operation of agricultural forage harvesting equipment for performing technological operations. This is achieved through the synthesis of fundamentally different mathematical approaches to describing and solving scheduling theory problems under conditions of complex formalization and weak structuring of the research object. The developed approach includes ontological, logical-dynamic and fuzzy-possibility models, along with corresponding methods and algorithms. Ontologies serve as knowledge models representing interconnected processes within the subject area. Logical-dynamic models of operational-scheduling planning describe the constraints and factors present in the grass harvesting process and help determine the most optimal technological approach. Fuzzy-possibility models for strategic planning describe both qualitative and quantitative factors and processes in the considered subject area, allowing for a preliminary estimation of the resources required to solve the problem. The combination of these models provides a formal representation of the subject area, accounts for possible disturbances, and formulates grass harvesting planning as an optimal control task. A prototype decision support system has been developed to assist in planning and executing the grass harvesting process.

Keywords: *forage production, ontology, fuzzy-possibility model, logical-dynamic modeling, planning, grass harvesting technology..*

For citation: *Semyonov AI, Sokolov BV, Spesivtsev AV*. An integrated approach to solving planning problems in forage production [In Russian]. *Ontology of designing.* 2025; 15(2): 198-210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.

Financing: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-19-00823, https://rscf.ru/project/24-19-00823/. "Development of scientific foundations and intellectual technology for the creation and application of an integrated automated system for proactive monitoring of complex agrobiotechnical objects."

Acknowledgment: The authors express their gratitude to Potryasaev S.A. for developing the software.

Authors' contributions: Semenov A.I. – developed the solution for the operational-scheduling planning problem and authored the original text of the article. Sokolov B.V. – formulated the concept of polymodel description, contributed to the logical-dynamic model of operational-scheduling planning and the ontological model, and performed the final editing of the article. Spesivtsev A.V. – developed the fuzzy-possibility resource model and contributed to the editing of the article. All authors have reviewed and approved the final manuscript.

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

List of figures and table

Figure 1 - Technological map of grass harvesting operations for silage
Figure 2 - Ontological representation of grass feed production technology
Figure 3 - Ontological representation of grass silage harvesting process
Figure 4 - Fuzzy scale for the linguistic variable “Vegetation phase”
Figure 5 - Scheduling diagram of the work of the agricultural forage harvesting resources at low intensity of execution of technological operations
Figure 6 - Scheduling diagram of the work of the agricultural forage harvesting resources at high intensity of execution of technological operations
Table 1 – Examples of numerical results for low-intensity and high-intensity scenarios using models (1) and (2)

References

[1] ***Ibragimov AG.*** The importance of feed production in the agricultural economy of Russia [In Russian]. *Economics and Entrepreneurship*. 2019. 10(111): 39-41.

[2] ***Kumar S, Singh P, Devi U, Yathish KR, Saujanya PL, Kumar R, Mahanta SK.*** An overview of the current fodder scenario and the potential for improving fodder productivity through genetic interventions in India. *Animal Nutrition and Feed Technology* (2023) 23. P. 631-644. DOI: 10.5958/0974-181X.2023.00054.9.

[3] ***Athanasious T. Balafoutis, Frits K. Van Evert, Spyros Fountas.*** Smart Farming Technology Trends:Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness. May 2020. Agronomy 10 (5). P. 743.

[4] ***Kataev YuV, Gerasimov VS, Tishaninov IA.*** The use of digital technologies in the engineering structure of the agro-industrial complex [In Russian]. Materials of the XIV International Scientific and Practical Internet Conference "Inform-Agro-2022". Moscow, 2022. P.381-387.

[5] ***Skobelev P, Mayorov I, Simonova E, Laryukhin V, Yalovenko O.*** Vertical and horizontal negotiations of multi-agent planning services in a multi-service platform for crop management [In Russian]. Proceedings of the XXI International Conference “Problems of Control and Modeling in Complex Systems”, Samara, September 03-06, 2019. Samara: OFFORT, 2019. V.2: 46-51.

[6] ***Kalinin VN, Sokolov BV.*** Multi-model Approach to the Description of the Air-space Facilities Control Process. *Control Theory and process*, 1995; 1: 149-156.

[7] ***Sokolov BV.*** Dynamic models and algorithms for integrated planning of ground-based technical equipment operation with navigation spacecraft [In Russian]. Trudy SPIIRAN. 2010; 2(13): 7-44.

[8] ***Kononov AV.*** Combinatorial complexity of scheduling jobs with simple linear growth of durations [In Russian]. *Discrete Analysis and Operations Research*. 1996; 3(2): 15–32.

[9] ***Laryukhin V.B.*** Methods and means of coupled interaction of autonomous intelligent systems for distributed enterprise resource management [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2023; 13(2): 254-273. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273.

[10] ***Skobelev PO, Simonova EV, Budaev DV, Voschuk GYu, Laryukhin VB.*** Cloud-based intelligent Smart Farming system for precision farming management [In Russian]. Materials of the conference "Information Technologies in Management (Itu-2018)", St. Petersburg, October 2-4, 2018. - St. Petersburg: Publisher: Concern Central Research Institute Electropribor, 2018. P.261-270.

[11] ***Volhonskaya EE.*** The task of optimal assignment of autonomous vehicles in the production and logistics system [In Russian]. *Vestn. Samar. Stat. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki*. 2023; 31(2): 20-28.
[12] ***Semyonov AI, Kulakov AYu.*** Model and algorithmic support for forecasting and planning the forage harvesting process [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering*. 2022; 65(11): 818-825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.
[13] ***Avramchuk EF, Vavilov AA, Yemelyanov SV.*** Technology of system modeling [In Russian]. Under the general editorship of S.V. Yemelyanov et al. Moscow: Mashinostroenie; Berlin: Technika, 1988. 520 p.
[14] ***Valge AM, Eremin MA, Sukhoparov AI.*** Methodology for modeling the technological process of procuring feed from grasses [In Russian]. *Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products*. 2018; 4(97): 115-126.
[15] ***Pobednov YuA, Kosolapov VM, Bondarev VA.*** Silage and haylage of forages. Moscow: Publishing House of the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy, 2012. 22 p.
[16] ***Malkov NG, Chukhina OV, Demidova AI, Chechulina VD.*** The influence of technological methods for the production of green mass on the quality of silage [In Russian]. Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2020; 1(102): 91-99.
[17] ***Balabanov VI, Manokhina AA, Shitikova AV.*** Mechanization of food preparation: [In Russian]. Saratov: Amirite, 2022. 84 p.
[18] ***Borgest NM, Budaev DV, Travin VV.*** Ontology of precision agriculture design: state of the issue, solution approaches [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2017; 7(4): 423-442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
[19] ***Antonov VV, Konev KA.*** Intelligent decision support method in a typical situation [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(1): 126-136. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136.
[20] ***Ermolaev KA.*** Using ontology for enterprise knowledge management [In Russian]. Research. according to information Kazan: Fatherland. 2007; 12: 65-78.
[21] ***Mesarovich M, Mako D, Takahara I.*** Theory of hierarchical multilevel systems [In Russian]. Moscow: Mir, 1973, 344 p.
[22] ***Kalinin VN, Reznikov BA, Varakin EI.*** Theory of systems and optimal control. Part 2. Concepts, models, methods and algorithms for optimal selection [In Russian]. Moscow: Ministry of Defense of the USSR. 1987. 589 p.
[23] ***Spesivtsev AV.*** A fuzzy-possibility approach to formalizing and using expert knowledge to assess the states of complex objects [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering*. 2020; 63(11): 985-994. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994.
[24] ***Popov V, Spesivtsev A, Sukhoparov A, Spesivtsev V.*** Fuzzy-multiple models of formalization of soil resources in formation of system for controlling processes of feed production from grasses // 19th International Scientific Conference Engineering For Rural Development Proceedings, Volume 19/ May 20-22, 2020/ Jelgava. P. 773-777. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF176.
[25] ***Krylov IA, Chernousko FL.*** On the method of successive approximations for solving optimal control problems [In Russian]. *J. Comput. Mathematics and Mathematical Phys.* 1962; 2(6): 1132–1139.

About the authors

Alexander Igorevich Semenov (b. 1996) graduated from the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation in 2020. Postgraduate student of the Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling of St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. ORCID 0000-0001-7980-042X. *alekssemyenov1996@gmail.com.* ✉

Boris Vladimirovich Sokolov (born in 1951) - Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling of the SPII RAS St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0002-2295-7570. *sokolov_boris@inbox.ru.*

Alexander Vasilyevich Spesivtsev (born in 1939) - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading researcher at the SPII RAS, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0002-2344-0768. *sav2050@gmail.com.*

Received June 20, 2023. Revised March 11, 2025. Accepted March 20, 2025.

УДК 631.171 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227

Прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений

© 2025, П.О. Скобелев[1]✉, В.А. Галузин[1], А.В. Галицкая[1], А.А. Галузин[2]

[1] *Самарский государственный технический университет (СамГТУ), Самара, Россия*

[2] *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия*

Аннотация

Предложен метод расчёта выходных параметров сельскохозяйственной культуры в цифровом двойнике посевов растений в зависимости от погодных условий и ресурсных ограничений среды. В основе метода лежит модель «трубок» входных и выходных параметров стадий роста и развития растений – диапазонов идеальных, нормальных и критически важных для выживания растений значений основных факторов внешней среды для каждого сорта растения. Предлагаемый метод расчётов позволяет связать входные и выходные параметры текущей стадии и передать полученные результаты для расчёта следующей стадии, чтобы выстроить итоговый кусочно-линейный план роста и развития растения и дать прогноз урожайности и других параметров растения. Для реализации предложенного метода разработана система и показано её использование для расчётов и экспериментов по моделированию. Результаты расчётов сопоставлены с данными полевых экспериментов по росту и развитию посевов озимой пшеницы. Дана оценка выявленным расхождениям, обсуждаются полученные результаты, формулируются выводы и представляются направления дальнейших исследований и разработок.

Ключевые слова: *точное земледелие, цифровой двойник, развитие растений, озимая пшеница, мультиагентные технологии, виртуальная модель, моделирование.*

Цитирование: *Скобелев П.О., Галузин В.А., Галицкая А.В., Галузин А.А.* Прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.211-227. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227.

Благодарности: авторы выражают благодарность академику С.Н. Шевченко, директору СамНЦ РАН, за поддержку исследований и разработок по цифровым двойникам растений, и А.С. Табачинскому, руководителю молодёжной лаборатории цифровых двойников растений СамНЦ РАН, за исходные данные для построения базы знаний, модели и метода расчёта показателей роста и развития растений и данные для сравнения модели с реальными посевами.

Вклад авторов: Скобелев П.О. – постановка задачи и оценка результатов. Галузин В.А. – концепция и методология решения задачи. Галицкая А.В. – анализ предметной области и существующих подходов. Галузин А.А. – разработка и реализация модели растения и метода расчёта роста и развития посевов; эксперименты и испытания.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Эффективное управление растениеводством важно для повышения урожайности, снижения затрат и минимизации вреда для окружающей среды. Разработка методов адаптивного планирования и моделирования стадий роста и развития растений, прогнозирования урожайности актуальны и значимы для продуктивности и эффективности растениеводства.

Одной из ключевых культур для Российской Федерации является пшеница [1]. Масса собранной озимой пшеницы в Самарской области за период с 2013 по 2023 годы составляла от 606 тыс. тонн до 1374,4 тыс. тонн, в т.ч.: в 2017 году – 1321,4 тыс. тонн, в 2018 году – 880,5

тыс. тонн, в 2019 году – 709,1 тыс. тонн, в 2020 году – 1633,6 тыс. тонн[1]. Приведённые сведения показывают значительные изменения массы собранного зерна в зависимости в т.ч. от погодных условий.

Прогнозировать урожайность средствами, применяемыми агрономами и фермерами, трудно в силу отсутствия адекватных математических моделей физиологии растений и среды. Многие сорта сельскохозяйственных (с/х) растений являются искусственно созданными и постоянно обновляются. Это не позволяет собрать большие объёмы данных и провести статистически значимую обработку данных в различных условиях, чтобы построить точные и достоверные модели. Большой вклад в процессы роста и развития растений вносят технологии агрономической обработки семян, растений и почвы полей, отчасти компенсирующие неблагоприятные факторы внешней среды.

Кроме неопределённости и колебаний погодных условий, трудности прогнозирования роста и развития с/х культур являются следствием недостаточности агрометеорологических наблюдений сети гидрометеостанций на производственных посевах [2]. Обычно на практике применяют анализ данных дистанционного зондирования Земли [3]. Анализ этих данных в ряде случаев является достаточным для мониторинга (и отчасти прогнозирования) роста и развития посевов на больших территориях, но для управления хозяйствами необходимы более точные модели роста и развития растений, позволяющие вести достоверное прогнозирование и рассчитывать влияние факторов внешней среды на выходные параметры растений.

Значительный прогресс достигается применением технологий Интернета вещей для мониторинга погоды и фактического состояния растений и почвы [4]. Однако задачу моделирования и прогнозирования роста и развития посевов эти средства не решают.

Для поддержки принятия решений агрономами и фермерами традиционные математические модели и статистические методы обработки данных, а также существующие информационные технологии оказываются применимы лишь частично. Становится актуальной задача разработки новых подходов, которые можно на практике легко и быстро адаптировать к климату региона, сортам выращиваемых растений, особенностям полей каждого хозяйства и т.д. Методы и средства моделирования и прогнозирования развития с/х культур должны способствовать повышению эффективности использования доступных ресурсов (вода, удобрения и средства защиты растений), поддерживать подходы точного земледелия, иметь низкую стоимость, быть удобными и простыми на практике.

1 Постановка задачи

Предлагаемый подход заключается в разработке цифровых двойников (ЦД) посевов растений (ЦДПР), которые должны позволять: отражать состояние растения на поле по определённому агрономами ряду важнейших параметров, характеризующих растение на каждой стадии; планировать рост и развитие растений на основе правил принятия решений, формируемых агрономами; моделировать поведение растений при различных событиях и условиях внешней среды; адаптивно перестраивать планы ухода за растениями при наступлении факта или других непредвиденных событий [5].

В настоящей работе развиваются научные исследования, выполняемых в Молодежной лаборатории ЦД растений СамНЦ РАН и в СамГТУ по проектам интеллектуальных киберфизических систем управления точным земледелием и ЦД брокколи [6]. В работах [7, 8] представлены базовая концепция ЦД растения, методы, модели и средства её построения, реализовано несколько версий ЦДПР, которые проходят испытания на экспериментальных

[1] Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Самарской области. https://63.rosstat.gov.ru/agriculture.

полях по выращиванию пшеницы и других растений в СамНЦ РАН. Предлагаемые модель и метод расчёта являются основой построения новой версии ЦДПР, базирующейся на основе экспертных знаний агрономов для принятия решений по расчётам зависимостей входных и выходных параметров посевов растений на каждой стадии их роста и развития и более сложной модели растения с внутренним гомеостазом.

Требуется разработать метод расчёта длительности стадий роста и развития посевов растений, а для каждой стадии – метод расчёта значений выходных параметров в зависимости от значений входных параметров, учитывающих состояние окружающей среды и растения. Для разных с/х культур состав входных и выходных параметров на разных стадиях различен, поэтому разрабатываемый метод должен предполагать возможность изменения состава, типов и числа входных и выходных параметров.

По условиям задачи для каждого сорта с/х культуры в онтологии растениеводства задан процесс роста и развития посевов растения на стадиях, состоящий из списка стадий $Process = \{stage_i\}, i = \overline{1, L}$, где L – количество стадий или фаз[2]. Для каждой фазы задан пополняемый список входных и выходных параметров, а также параметр длительности фазы.

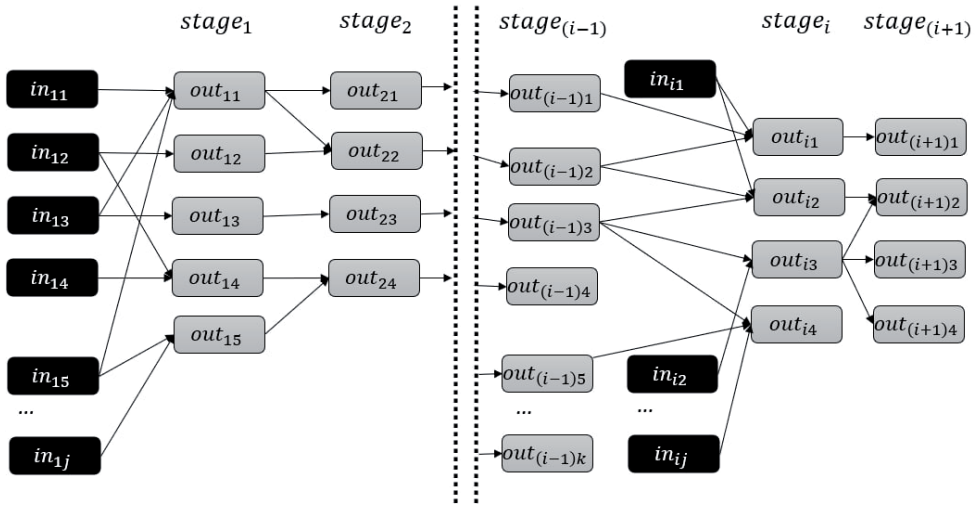
Для каждой стадии вводятся: $In_i = \{in_{ij}\}, j = \overline{1, K}$, где K – количество влияющих факторов для i-ой стадии развития с/х культуры. $Out_i = \{out_{ik}\}, k = \overline{1, M}$, где M – количество выходных параметров для i-ой стадии развития с\х культуры.

Выходные значения одной стадии могут являться входными для следующей:

$$In_{i+1} \subset Out_i. \quad (1)$$

Для каждого сорта растений на основе онтологии растениеводства создаётся онтологическая модель сорта, которая включает семантическую сеть входных и выходных параметров стадий растений. Онтологическая модель сорта растения считается заданной для разрабатываемой системы, куда она загружается в виде *json* файла.

На рисунке 1 изображена примерная схема связей между параметрами стадий, задающая входные условия для решения задачи.



in_{ij} – входные параметры, out_{ik} – выходные параметры на фазах

Рисунок 1 – Примерная схема условий задачи

На фазе $stage_i$ поступают на вход некоторые входные параметры in_i, такие как температура окружающей среды, или некоторые выходные параметры стадии $stage_{(i-1)}$. На выходе

[2] Термины «фаза» и «стадия» развития в рамках настоящей статьи являются синонимами.

стадии $stage_i$ рассчитываются выходные параметры растения out_i. Некоторые из этих выходных параметров стадии $stage_i$ являются входными параметрами для стадии $stage_{(i+1)}$.

Необходимо разработать метод расчёта параметров посева, который бы не зависел от числа фаз роста растения, а также состава, числа и типа их входных и выходных параметров; требуется обеспечить адаптивность пересчёта параметров фаз при появлении незапланированных событий, связанных с изменениями параметров, например, факта изменения погоды или факта внесения удобрений в почву.

В данной работе в качестве примера рассмотрены стадии роста и развития озимой пшеницы, которые представлены в [9]. Целью разработки является создание модели растения и метода расчётов, которые могли бы применяться для любых злаковых растений.

2 Анализ актуальных методов

Для решения задачи прогнозирования роста и развития растения могут быть использованы разработки в области машинного обучения (МО), в частности, глубокого обучения (ГО), которые показали свои преимущества в решении различного рода задач [10].

В статье [11] использованы методы МО и ГО для прогнозирования урожайности и вариации роста растений. Значения урожайности, роста и диаметра стебля, условия микроклимата используются архитектурой рекуррентной нейронной сети для моделирования целевых параметров роста. Такие модели с МО разрабатываются для использования на разных сортах растений (см., например, [12]). МО предоставляет удобные инструменты для анализа сложных с/х наборов данных при их наличии. Модели с МО на основе изображений могут выявлять болезни растений и заражение вредителями на ранних стадиях, анализировать погодные условия и состояние почвы для прогнозирования урожайности.

Методы МО имеют определённые ограничения [13], особенно при недостатке массивов данных для обучения, а также применении методов МО в условиях неопределённости, когда исходная ситуация, при которой были собраны наборы данных для обучения, изменяется трудно предсказуемым образом. В современных хозяйствах получение точных и полных данных затруднено из-за отсутствия соответствующих инструментов измерений, изменчивости условий окружающей среды и ошибок сбора данных. Низкое качество или недостаточное количество данных могут привести в МО к неточным прогнозам и ненадёжным результатам. Для многих моделей МО, таких как машины опорных векторов и случайные веса, требуются значительные вычислительные ресурсы для обучения и оптимизации, а также специальные знания для настройки и интерпретации результатов. Если обучающие данные, используемые для МО, содержат смещения, то модели могут усилить эти смещения, что приведёт к искажению прогнозов.

В [14] представлен ЦД в с/х производстве. Путём создания начальной цифровой среды для киберфизической системы фермеры могут лучше представлять состояние своих ферм в отношении использования ресурсов и оборудования. ЦД может представлять собой инструмент для оптимизации производительности, как соотношения между производством и потреблением ресурсов [15]. ЦД можно рассматривать как новую фазу интеллектуального развития и управления данными в садоводстве и в сельском хозяйстве в целом [16, 17].

3 Метод расчёта параметров посева

Предлагаемая онтологическая модель роста и развития посевов растений состоит из взаимосвязанных стадий роста и развития растений, где число стадий может быть переменным для разных культур, а также число входных и выходных параметров на каждой стадии может

варьироваться, например, высота растения, число зёрен в колосе, площадь листьев, объём урожая и т.д.

На каждой фазе развития на растения влияют факторы окружающей среды, такие как температура воздуха или почвы и запас питательной влаги в почве. Значения факторов на определённых фазах развития растения являются входными параметрами модели. Правила принятия решений для планирования переходов между состояниями стадий также индивидуальны для каждого сорта культуры.

На основе экспертных знаний агрономов выделены составы и значения входных и выходных параметров на разных фазах развития растения x_{ijk} и составлены трубки входных параметров. Трубкой параметров называются диапазоны изменения значений каждого фактора, влияющего на развитие растения. Наилучшие возможные значения параметров роста и развития растения на каждой фазе считаются оптимальным значениями.

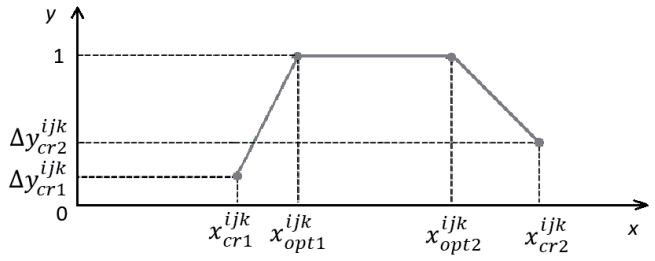


Рисунок 2 – Пример трубки входного параметра *x* и выходного параметра *y*

На рисунке 2 показан пример трубки входного параметра *x* и выходного параметра *y*, состоящей из четырёх точек: критического минимума x_{cr1}^{ijk}, рекомендованного минимума x_{opt1}^{ijk}, рекомендованного максимума x_{opt2}^{ijk}, критического максимума x_{cr2}^{ijk} входного параметра для каждой фазы и соответствующим им значений прироста выходных параметров Δy_{cr1}^{ijk}, Δy_{opt1}^{ijk}, Δy_{opt2}^{ijk}, Δy_{cr2}^{ijk}.

Для нормального развития растения необходимо, чтобы значения входных параметров x_{ijk} находились между рекомендованными минимумом и максимумом. Если значения входных параметров выходят за критические границы, то растение погибает.

Модель состоит из набора фаз развития растения, которые включают набор трубок входных параметров.

На основе описанной модели разработан метод расчёта выходных параметров растения. Перед расчётом значений выходных параметров необходимо провести расчёт длительности фаз растения. Базовая длительность рассчитывается по правилу суммы активных температур:

$$duration_{base\,i} = \sum_{j=1}^{\text{duration}_{max}} 1\text{, если } t_{min} < t_j < t_{max} \text{ и } t_{act(j-1)} + t_j < t_{act}, \quad (2)$$

где t_{act} – сумма активных температур, $t_{act(j-1)}$ – сумма активных температур за *j*-1 дней.

На базовую длительность фазы растения влияет предыдущее растение, росшее на месте растения модели, и входные параметры на фазе. Приращение (дельта) длительности *i*-ой фазы для *k*-ого входного параметра:

$$\Delta duration_{ik} = \begin{cases} 0\text{, если } x_{ijk} < x_{cr1}^{ijk} \text{ или } x_{ijk} > x_{cr2}^{ijk}; \\ \dfrac{(x_{ijk} - x_{cr1}^{ijk})(\Delta y_{opt1}^{ijk} - \Delta y_{cr1}^{ijk})}{x_{opt1}^{ijk} - x_{cr1}^{ijk}} + \Delta y_{cr1}^{ijk}\text{, если } x_{cr1}^{ijk} \le x_{ijk} < x_{opt1}^{ijk}; \\ \dfrac{(x_{ijk} - x_{opt1}^{ijk})(\Delta y_{opt2}^{ijk} - \Delta y_{opt1}^{ijk})}{x_{opt2}^{ijk} - x_{opt1}^{ijk}} + \Delta y_{opt1}^{ijk}\text{, если } x_{opt1}^{ijk} \le x_{ijk} \le x_{opt2}^{ijk}; \\ \dfrac{(x_{ijk} - x_{opt2}^{ijk})(\Delta y_{cr2}^{ijk} - \Delta y_{opt2}^{ijk})}{x_{cr2}^{ijk} - x_{opt2}^{ijk}} + \Delta y_{opt2}^{ijk}\text{, если } x_{opt2}^{ijk} < x_{ijk} \le x_{cr2}^{ijk}. \end{cases} \quad (3)$$

Итоговая длительность i-ой фазы развития растения рассчитывается как сумма базовой длительности фазы $duration_{base\,i}$, дельты длительности влияния предыдущего растения $\Delta duration_{pp\,i}$ и среднеарифметической суммы дельт длительности i-й фазы для k-ого входного параметра.

Формула расчёта итоговой дельты i-ой фазы развития растения:

$$duration_i = duration_{base\,i} + \Delta duration_{pp\,i} + \frac{1}{k}\sum_{y=1}^{k} \Delta duration_{ik}. \quad (4)$$

Итоговая длительность должна быть между минимальной и максимальной длительностями:

$$duration_i = \begin{cases} duration_{min}, \text{ е с л и } duration_i < duration_{min}; \\ duration_i; \\ duration_{max}, \text{ е с л и } duration_i > duration_{max}. \end{cases} \quad (5)$$

После расчёта длительности фаз развития производится вычисление выходных параметров растения. Для этого берутся значения входных параметров с полей за весь период развития растения, разделённые и сгруппированные по предполагаемым периодам фаз. Далее рассчитываются выходные параметры за первую фазу.

Каждую длительность фазы можно разбить на интервалы нахождения растения в определённом состоянии.

Формула трубки параметров k-ого выходного параметра на i-ой стадии для l-ого входного параметра на q-том интервале состояния растения:

$$tube_{ik}^{l} = \{tubeItem_{ik}^{lq}\}, l = \overline{1, L}, q = \overline{1, Q}, \quad (6)$$

где L – количество входных параметров, влияющих на k-ый выходной параметр на i-ой стадии, Q – количество интервалов в трубке.

$$tubeItem_{ik}^{lq} = \left\{tubeBorder_{ik}^{lq}, tubeBorder_{ik}^{l(q+1)}, deltaOutValue_{ik}^{lq}\right\}. \quad (7)$$

$$deltaOutValue_{ik}^{lq} = \{deltaOutValue_{ik}^{lqp}\}, p = \overline{1, P}, \quad (8)$$

где P – количество интервалов длительности влияния.

Итоговое значение дельты выходного параметра на фазе равняется сумме изменений этого выходного параметра на интервалах непрерывного вхождения в интервал трубки. Прирост выходного параметрах в рамках одного интервала трубки равен:

$$\Delta out_{is} = \frac{deltaOutValue_{ik}^{lq}}{stageDuration_i} intervalDuration_{is}. \quad (9)$$

$$\Delta out_i = \sum \Delta out_{is}. \quad (10)$$

Дельта выходного параметра складывается с итоговым значением на предыдущей фазе, и результатом вычисления является итоговое значение выходного параметра на фазе. Далее происходит расчёт выходного параметра для следующей фазы.

Предложенный метод расчёта выходного параметра представлен в виде псевдокода алгоритма.

```
Input: phases – список фаз, input_value_list – список входных значений по фазам

Output: output_parameters_set – список, содержащий списки выходных параметров по фазам
previous_phase_value = 0
output_parameters_set = []
plant_alive = true
for phase in phases do
        output_parameters = phase.output_parameters
        output_parameters_list = []
        for output_parameter in output_parameters do
                input_parameters = output_parameter.input_parameters
                phase_deltas = []
                for input_parameter in input_parameters do
```

```
11:                                 critical_range = get_critical_range(input_parameter,
12:                                 input_value_list[phase])
13:                                 if input_parameter < critical_range.min OR
14:                                 input_parameter > critical_range.max then
15:                                         plant_alive = false
16:                                         break
17:                                 end if
18:                                 delta = calculate_delta(input_parameter, input_value_list[phase])
19:                                 phase_deltas add delta
20:                         end for
21:                         if not plant_alive then
22:                                 print "Растение погибло"
23:                                 break
24:                         end if
25:                         average_delta = calculate_average(phase_deltas)
26:                         output_value = average_delta + previous_phase_value
27:                         output_parameters_list add output_value
28:                         previous_phase_value = output_value
29:                 end for
30:                 output_parameters_set add output_parameters_list
31:     end for
32:     return output_parameters_set
```

Работа алгоритма начинается с ввода значений входных параметров для всех фаз согласно длительности фаз, которая рассчитывается по формулам 2-5. В алгоритме на каждой фазе (4) для каждого выходного параметра (7) сравниваются введённое значение с соответствующей трубкой этого входного параметра (13-14): если значение выходит за критические значения трубки, то растение погибает (15); если нет, то происходит расчёт дельты выходного параметра (18) по формулам 6-9. Далее происходит расчёт среднего значения дельты выходного параметра по всем входным параметрам (25) по формуле 10. Итоговое значение выходного параметра рассчитывается как сумма среднего значения выходного параметра и значения на предыдущей фазе (26). В результате полученные значения выходных параметров растения для каждой фазы добавляются в список (30).

4 Пример применения метода

Рассмотрен пример расчёта выходного параметра высоты растения на двух первых фазах развития при четырёх входных параметрах для с/х культуры «Озимая пшеница». Первые две фазы развития – это прорастание и развитие листьев; входные параметры: температура воздуха, содержание нитратов в почве, содержание фосфора и калия в почве.

На вход поступает набор входных параметров, это список пар значение - дата (период с 1 сентября 2023 по 31 августа 2024 года). Датой посева является 5 сентября 2023 года. По формулам 2-5, согласно сумме активных температур, первая фаз длится с 5 по 11 сентября, период второй фазы – с 12 по 26 сентября. На фазе прорастание для расчёта выходного параметра высоты растения берутся значения входных параметров за период с 5 по 11 сентября, после чего по формулам 6-9 происходит расчёт выходного параметра для каждого входного параметра, т.е. для входного параметра температуры воздуха значение выходного параметра высоты растения равно 2.9 см, а для параметра содержание нитратов в почве равно 5 см, для параметров содержание фосфора в почве и содержание калия в почве значения выходного параметра равны также 5 см. Из получившихся значений, а именно 2.9 см, 5 см, 5 см, 5 см, рассчитывается среднее значение прироста выходного параметра высоты растения за фазу, которое составляет 4.5 см. Для получения значения выходного параметра «Высота растения» необходимо сложить значение прироста параметра и значение выходного параметра предыдущей фазы, т.е. $4.5 + 0 = 4.5$ см. После чего происходит расчёт выходных параметров сле-

дующей фазы. Для фазы «Развитие листьев» берутся значения входных параметров за период с 12 по 26 сентября. Аналогично по формулам 6-9 происходит расчёт выходного параметра для каждого входного параметра: для температуры воздуха это 6.4 см, для параметров содержание нитратов в почве, содержание фосфора в почве, содержание калия в почве это 5.7 см. Среднее значение прироста выходного параметра высоты растения за фазу равно 5.9 см. Высота растения за фазу развития листьев равна сумме высоты растения за фазу прорастания и среднего значения прироста и составляет $4.5 + 5.9 = 10.4$ см.

5 Программное обеспечение цифровых двойников посевов растений

Описанный метод реализован в программном обеспечении, содержащем веб-интерфейс (см. рисунок 3), позволяющий задать входные данные (температура воздуха, запас питательной влаги, относительная влажность воздуха и др.) и представить результаты вычислений (масса растения, урожайность, количество листьев и др.). Для стадий развития представлена диаграмма их длительностей, где отмечено их сокращение или увеличение относительно базовых значений и другие особенности для лучшего понимания пользователем результатов.

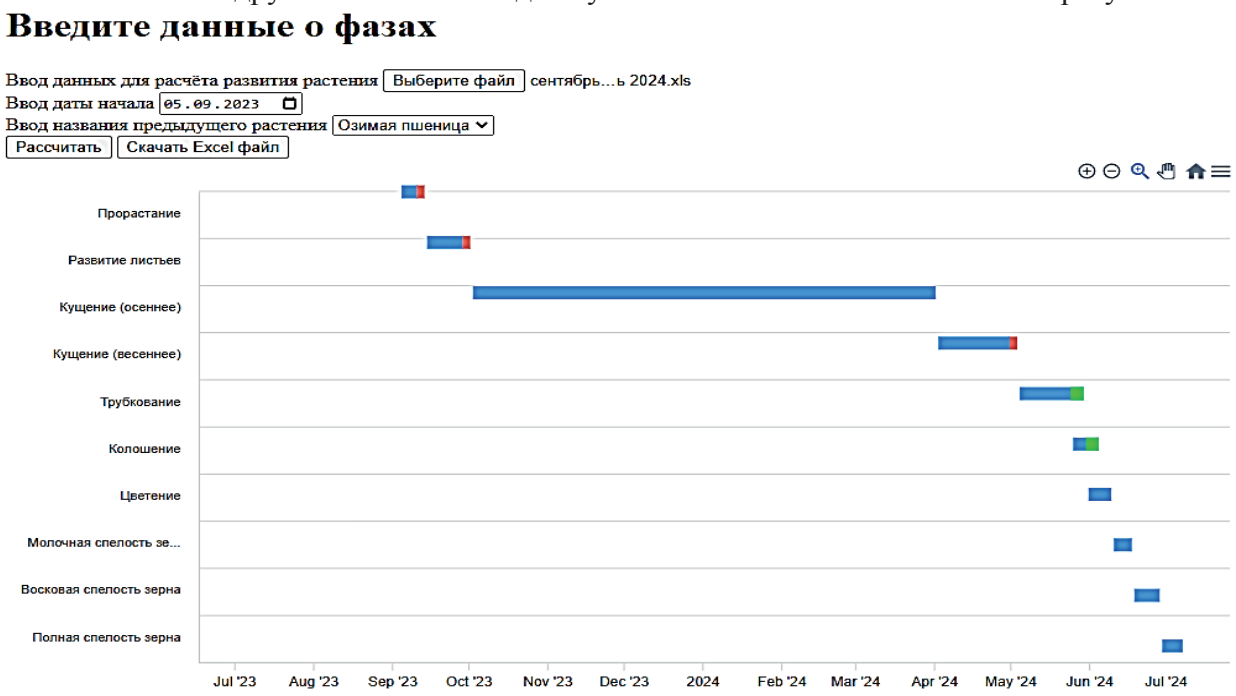


Рисунок 3 – Веб-интерфейс программы с диаграммой длительностей фаз

Для каждого входного параметра представляется график, где отображаются рекомендованные значения трубки, оптимальные и критические значения (см. пример на рисунке 4).

На рисунке 5 показана диаграмма основных классов системы. Класс «Модель» включает список фаз растения, каждая фаза состоит из номера, названия, списка выходных параметров и длительности фазы. Для каждого выходного параметра задаётся список входных параметров. На рисунке 5 классы, изображенные снизу, соответствуют структуре онтологии, которая загружается в систему в виде *json* файла. В одном *json* файле хранится модель растения одного сорта. Такая модель состоит из списка фаз роста и развития растения. Количество и названия фаз индивидуальны для каждого растения. Фазы состоят из выходных параметров. На каждый выходной параметр влияет входной параметр. Это влияние описано в трубках. Так как сорта растений отличаются друг от друга, то входные и выходные параметры задаются индивидуально.

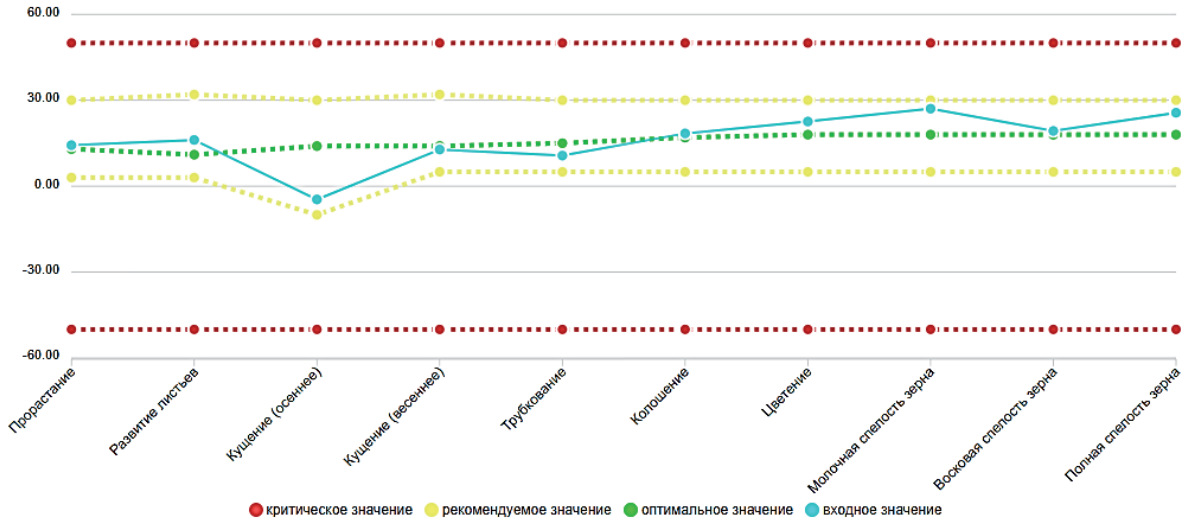


Рисунок 4 – Трубка входного параметра температуры воздуха по фазам роста

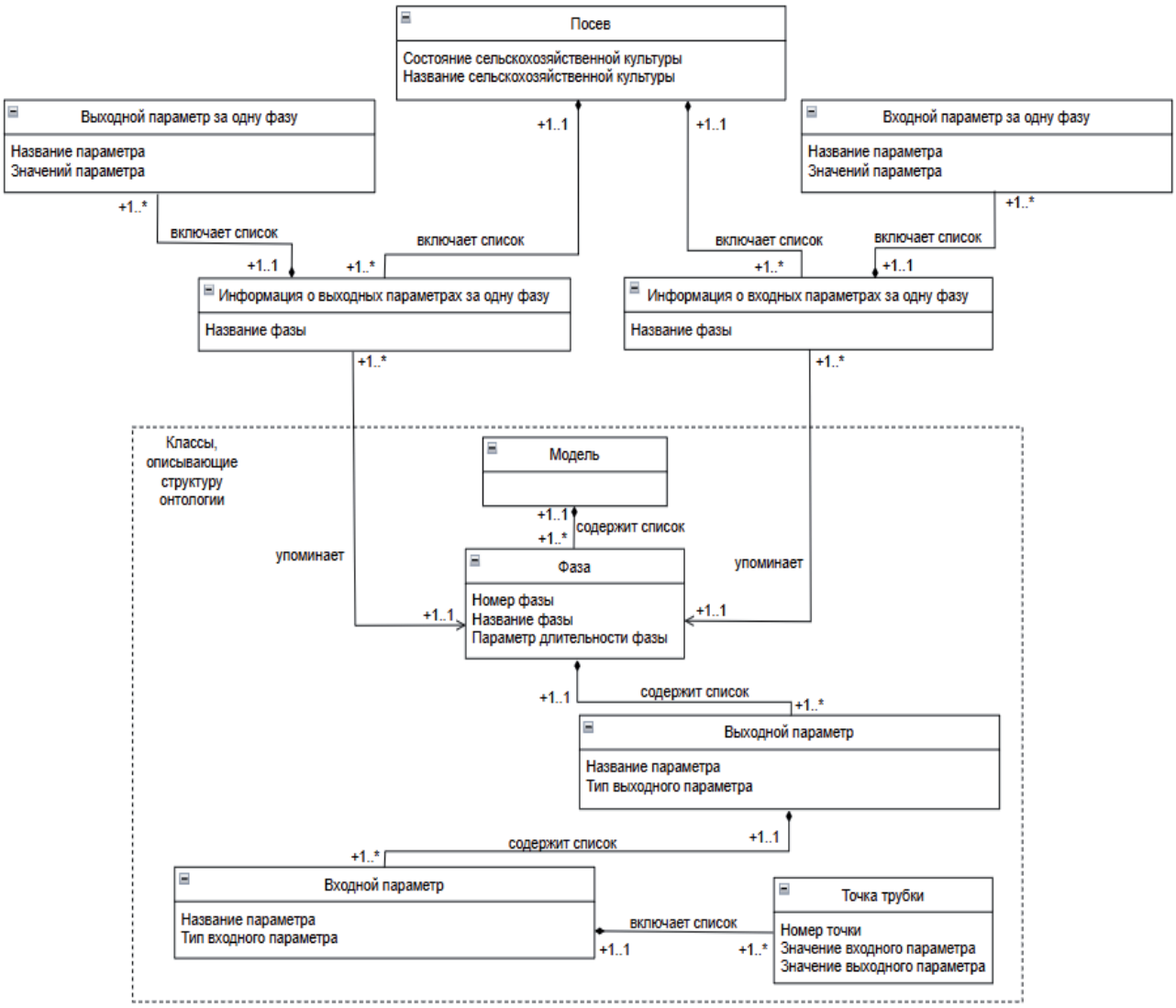


Рисунок 5 – Диаграмма основных классов системы

На рисунке 6 представлена структурная схема системы.

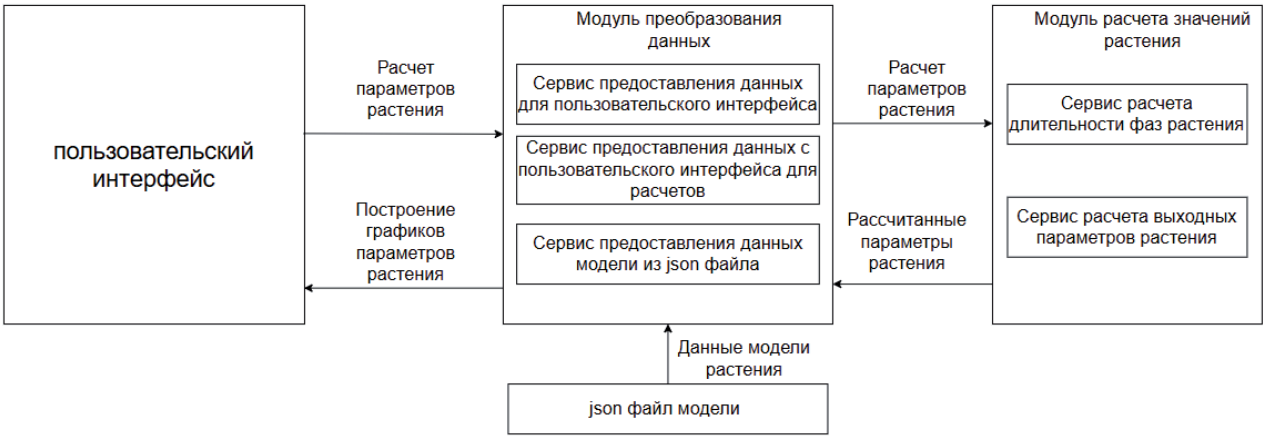


Рисунок 6 – Структурная схема системы

Разрабатываемая система состоит из следующих частей:

- пользовательский интерфейс;
- модуль преобразования данных, в состав которого входят сервисы предоставления данных: для пользовательского интерфейса; с пользовательского интерфейса для расчётов; модели из *json* файла;
- модуль расчёта в виде сервисов: длительности фаз растения; выходных параметров растения.

Данные о фактическом и прогнозируемом состояниях погоды на тестовых полях на сезон были взяты из открытых источников (https://rp5.ru/). В экспериментах можно изменять прогноз погоды на сезон, микроэлементы в почве, влажность почвы и состав минералов. Устанавливая дату посева, пользователь запускает процесс вегетации в заданных условиях.

6 Результаты моделирования

Для оценки качества и эффективности ЦДПР разработана методика, включающая два этапа:

1) Качественная проверка: проверка на здравый смысл, когда изменяются входные параметры среды и погоды по событиям – измеряется результат, т.е. план роста и развития посевов растений и прогноз урожайности, который должен в целом соответствовать требованиям, заложенным селекционерами в сорт.
2) Количественная проверка: сопоставление стадий роста и развития виртуальных и реальных посевов растений, начиная со дня высева.

Для моделирования использовались трубки входных параметров для культуры «Озимая пшеница», полученные из лаборатории Цифровые двойники растений СамНЦ РАН.

В качестве выходного параметра рассмотрена высота растения.

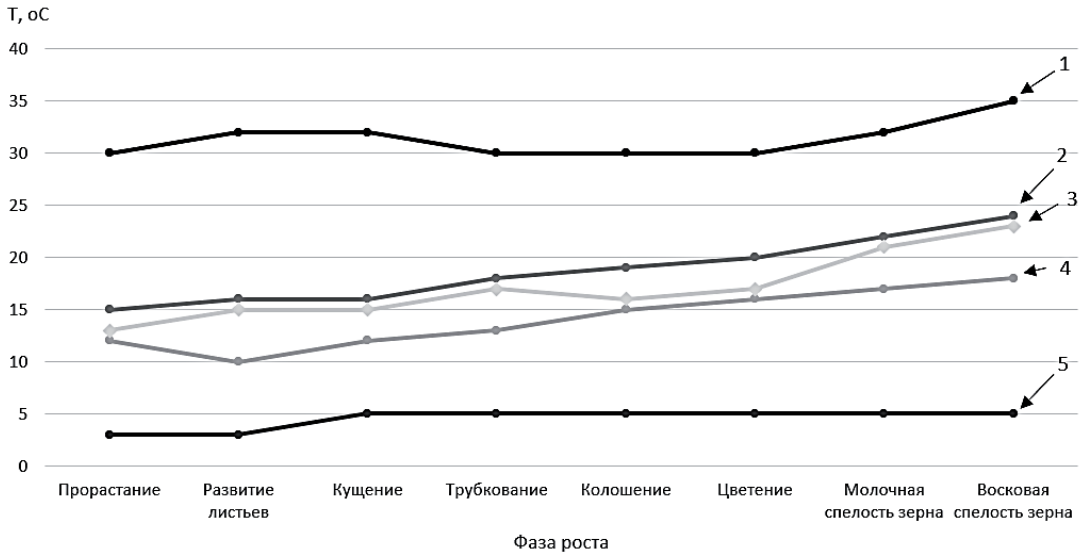
6.1 Результаты моделирования погодных событий и внесения удобрений

На основе созданного прототипа ЦДПР проведены эксперименты по моделированию событий жара-холод, засуха-дожди, внесение удобрений. В таблице 1 представлены трубки влияющих факторов для фазы «Прорастание».

Пример графиков для граничных значений трубки фактора «Температура воздуха» и входного значения фактора на каждой фазе при благоприятных условиях приведены на рисунке 7.

Таблица 1 – Трубки входных параметров для фазы «Прорастание»

Название входного параметра	Название точек трубки	Значение входного параметра	Значение дельты выходного параметра высоты растения
Т воздуха, °С	Критический минимум	30	5
	Оптимальное значение	13	6
	Критический максимум	3	3
Запасы нитратов в слое, 0 –30 см, мг/кг	Критический минимум	200	5
	Оптимальное значение	20	6
	Критический максимум	3	4
Запасы оксида фосфора в слое, 0 – 30 см, мг/кг	Критический минимум	800	5
	Оптимальное значение	200	6
	Критический максимум	20	4
Запасы оксида калия в слое, 0 – 30 см, мг/кг	Критический минимум	800	5
	Оптимальное значение	180	6
	Критический максимум	20	4



1 – критический максимум, 2 – рекомендуемый максимум, 3 – входное значение фактора, 4 – рекомендуемый минимум, 5 – критический минимум

Рисунок 7 – Пример графиков температуры воздуха на каждой фазе при благоприятных условиях

На рисунке 8 приведены результаты экспериментов с различными сценариями:

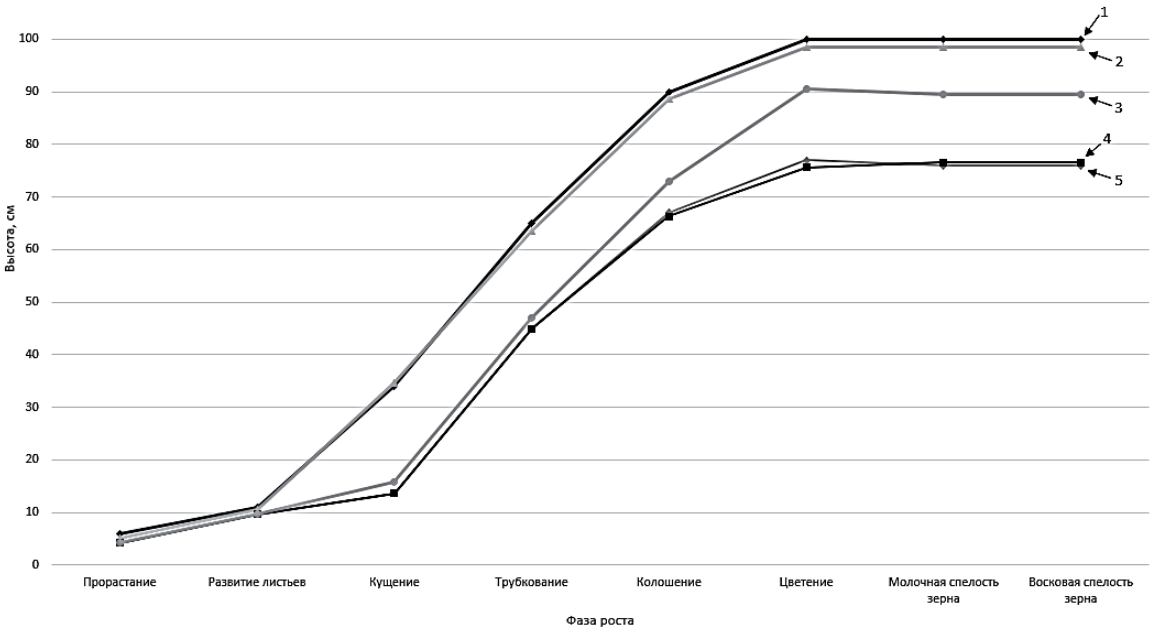
- благоприятные условия произрастания – входные данные для каждой фазы развития взяты с полей с/х культуры «Озимая пшеница» Безенчукского района Самарской области;
- перенасыщение питательными веществами – смоделирована избыточность влаги в почве на ранних фазах развития растения;
- условия засухи – смоделирована низкая влажность на ранних фазах развития растения;
- недостаток питательных веществ – смоделирован недостаток азота в почве на ранних фазах развития растения.

На последней стадии норма параметра высоты растения составляет 100 см.

Как видно из рисунка 7, при сценарии благоприятных условий фактор «Температура воздуха» на всех стадиях колебался в границах рекомендуемых минимума и максимума, остальные влияющие факторы так же оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста, из-за чего прогнозируемое значение высоты растения (рисунок 8, график 2) близко к норме, разница в росте составила 1.57 см.

Для сценария перенасыщения питательными веществами на стадии кущения оптимальное и итоговое значения высоты растения (рисунок 8, график 3) значительно разошлись из-за

избытка питательных веществ. В результате в конце развития растения разница в росте составила 10.43 см.



1 – норма высоты растения, 2 – результат эксперимента сценария благоприятных условий, 3 – результат эксперимента сценария перенасыщения питательными веществами, 4 – результат эксперимента сценария засухи, 5 – результат эксперимента сценария недостатка питательных веществ

Рисунок 8 – Пример графика параметра высоты растения с различными сценариями

Расхождение на стадии кущения также наблюдается и для сценария засухи из-за низкой влажности (рисунок 8, график 4). В результате в конце развития растения разница в росте составила 24.04 см.

Для сценария недостатка питательных веществ разница между оптимальным и итоговым значением высоты в конце развития растения составила 23.46 см (рисунок 8, график 5).

6.2 Результаты сравнения фактических и рассчитанных значений

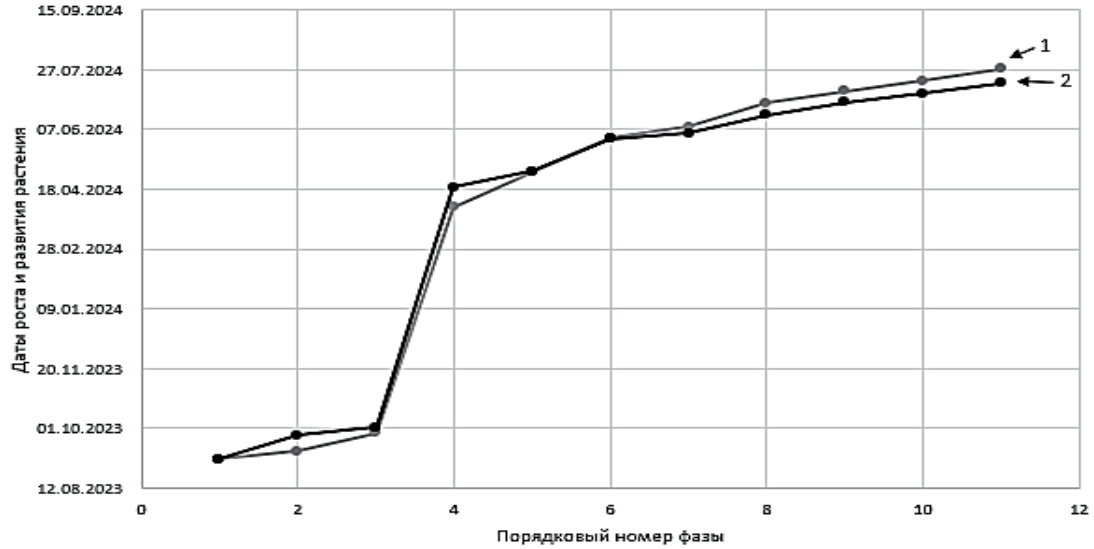
Проведено сравнение фактических дат начала и конца фаз с/х культуры с рассчитанными значениями (рисунок 9). Из рисунка видно, что разница между значениями фактических и рассчитанных дат не превышает 14 дней. Дата фактического сбора урожая была 16.07.2024, а дата рассчитанного сбора – 28.07.2024.

На рисунке 10 представлено сравнение значений по количествам дней в фазе.

Проведено сравнение фактической высоты растения и рассчитанных значений (рисунок 11). Для оценки правильности расчётов взята модель ЦД растения из [9].

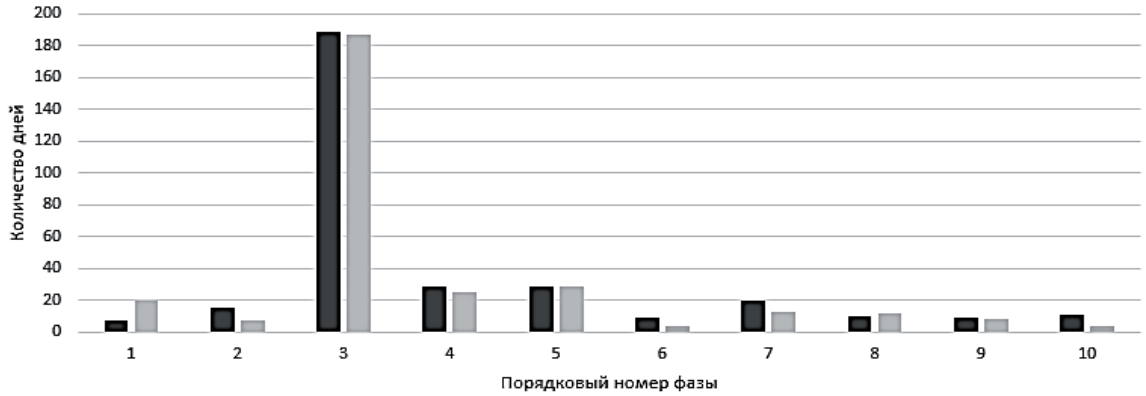
Фактическая высота растения на момент сбора урожая составила 110 см, значение, полученное с помощью модели ЦД растения, – 99.88 см, значение, полученное с помощью предложенного метода, – 96.38 см. Полученное отклонение от фактического значения связано с тем, что в используемой модели ожидаемая высота растения ограничивалась 100 см. В действительности растение выросло до 110 см, что подтверждает сложность моделирования процесса развития растения, зависящего от многих факторов.

Проведённые исследования показали, что разработанная модель адекватно реагирует на важные события и соответствует натурным данным, что позволяет считать её пригодной для практического применения агрономами и дальнейшего развития.



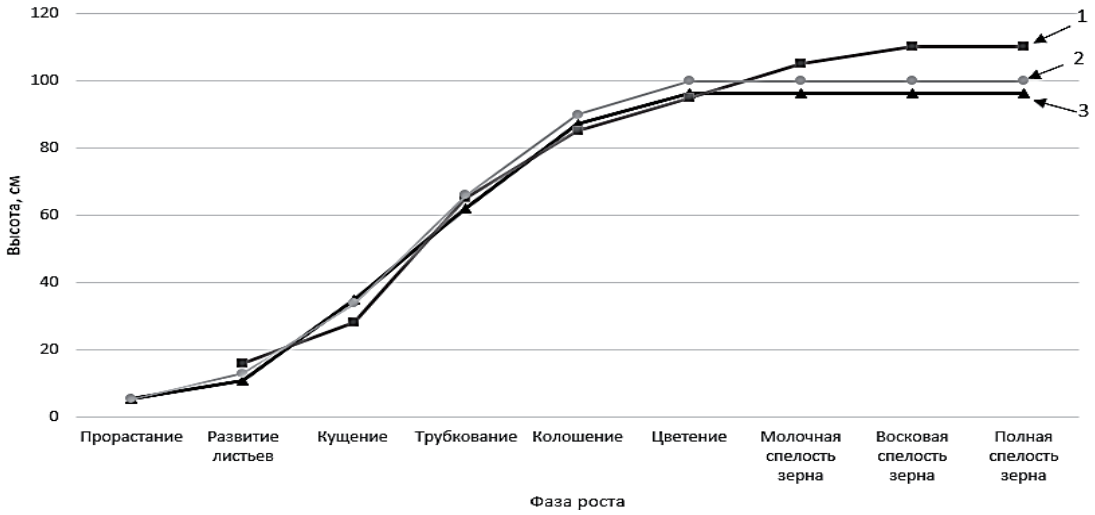
1 – рассчитанные значения, 2 – фактические значения

Рисунок 9 – Сравнение фактических и рассчитанных значений дат начала и конца фаз



слева – рассчитанные значения, справа – фактические значения

Рисунок 10 – Сравнение количества фактических и рассчитанных дней длительности фаз



1 – фактические значения, 2 – значения, рассчитанные моделью ЦД растений,
3 – значения, рассчитанные предложенным методом

Рисунок 11 – Сравнение фактических и рассчитанных значений высоты растения

Заключение

В работе предложен метод расчёта параметров состояний растений, который может дополнять методы, основанные на нейронных сетях, и другие подходы.

В разработанном методе использует понятие трубки – диапазонов оптимальных и критических для выживания растений значений основных факторов, которые характеризуют фазы роста и развития растения и влияние входных параметров каждого интервала на выходные параметры растения. Результаты моделирования на примере культуры «Озимая пшеница» и сравнение процессов роста и развития виртуальных и реальных посевов показывают применимость такого подхода для моделирования процесса развития растений.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие и совершенствование метода расчёта стадий и прогнозирование урожая, включая построение более глубоких онтологий для интеграции знаний о предметной области и мультиагентных технологий для адаптивного планирования развития посевов растений с учётом любых событий.

В результате может быть создана практичная интеллектуальная система моделирования и прогнозирования стадий роста и развития разных сортов с/х культур и их урожайности.

Список источников

[1] ***Фомин О.С., Зюкин Д.А., Беляев С.А., Репринцева Е.В.*** Экономическая и географическая специфика осуществления экспорта российской пшеницы. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. №2. С.138-142. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_2_138.

[2] ***Страшная А.И., Тарасова Л.Л., Богомолова Н.А., Максименкова Т.А., Береза О.В.*** Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. *Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2015. №353. С.128-153.

[3] ***Раменская Е.В., Ермаков В.В., Кузнецов М.П.*** Методы классификации гиперспектральных изображений при экологическом мониторинге. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т.18. №4-5. С.990-992.

[4] ***Андрюшечкина Н.А., Мусихина Л.В.*** Интернет вещей в сельском хозяйстве. *Научно-технический вестник: технические системы в АПК*. 2020. №. 1 (6). С.42-47.

[5] ***Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Larukhin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A.*** Autonomous digital twin of enterprise: Method and toolset for knowledge-based multi-agent adaptive management of tasks and resources in real time. *Mathematics*. 2022. Т.10. №10. С.1662. DOI: 10.3390/math10101662.

[6] ***Скобелев П.О., Табачинский А.С., Симонова Е.В., Стрижаков А.Н., Кудряков Е.В., Ермаков В.В., Журавель Ю.Н.*** Разработка мультиагентной модели цифрового двойника капусты брокколи. XVI *Всероссийская мультиконференция по проблемам управления* (МКПУ-2023). 2023. С.263-265.

[7] ***Скобелев П.О., Табачинский А.С., Симонова Е.В., Журавель Ю.Н., Мятов Г.Н.*** О некоторых методах расчёта состояния посевов в сервисе цифрового двойника растений. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2022. Т.24. №3(107). С.100-111. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-100-111.

[8] ***Скобелев П.О., Майоров И.В., Симонова Е.В., Горянин О.И., Жиляев А.А., Табачинский А.С., Яловенко В.В.*** Реализация цифрового двойника растений для адаптивного расчета длительности стадий развития и прогнозирования урожайности культур в кибер-физической системе управления точным земледелием. *Математические методы в технике и технологиях-ММТТ*. 2020. Т.12. С.133-136.

[9] ***Шевченко С.Н., Корчагин В.А., Горянин О.И.*** Современные технологии возделывания озимой пшеницы в Средневолжском регионе. *Земледелие*. 2009. №5. С.40-41.

[10] ***Митяков С.Н., Митяков Е.С.*** Машинное обучение в задачах исследования инновационных процессов. *Журнал прикладных исследований*. 2020. Т.1. №4. С.6-13. DOI: 0.475776/2712-7516 2020 4 1 6.

[11] ***Alhnaity B., Pearson S., Leontidis G., Kollias S.***Using deep learning to predict plant growth and yield in greenhouse environments. *International Symposium on Advanced Technologies and Management for Innovative Greenhouses: GreenSys2019* 1296. 2019. P.425-432. DOI: 10.48550/arXiv.1907.00624.

[12] ***Yasrab R., Zhang J., Smyth P., Pound M.P.*** Predicting plant growth from time-series data using deep learning. *Remote Sensing*. 2021. V.13. N.3. P.331. DOI: 10.3390/rs13030331.

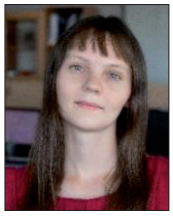
[13] ***Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А.*** О причинах неудач проектов машинного обучения. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. Т.11. №1. С.60-69.

[14] ***Alves R.G., Souza G., Maia R.F., Tran A.L.H., Kamienski C., Soininen J.P., Aquino P.T., Lima F.*** A Digital Twin for Smart Farming. 2019 *IEEE Global Humanitarian Technology Conference* (GHTC). 2019. C.1-4. DOI: 10.1109/GHTC46095.2019.9033075.
[15] ***Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G.*** A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture. *Applied Sciences*. 2021. V.11. N.19. P.8875. DOI: 10.3390/app11198875.
[16] ***Ariesen-Verschuur N., Verdouw C., Tekinerdogan B.*** Digital Twins in greenhouse horticulture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. V.199. P.107183. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183.
[17] ***Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. N.*** Introducing digital twins to agriculture. Computers and Electronics in Agriculture. 2021. V.184. P.105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.

Сведения об авторах

Скобелев Пётр Олегович, 1960 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт (1983), д.т.н. (2003). Главный научный сотрудник СамНЦ РАН, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника» СамГТУ. Автор более 350 научных работ и учебных пособий. ORCID 0000-0003-2199-9557. *petr.skobelev@gmail.com*. ✉

Галузин Владимир Андреевич, 1995 г. рождения. Окончил Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (2019), к.т.н. (2023). Доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника» в СамГТУ. ORCID 0000-0002-1460-613X. *v.galuzin@kg.ru*.



Галицкая Анастасия Вячеславовна, 1995 г. рождения. Окончила Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (2019). Аспирант кафедры "Информатика и вычислительная техника" в СамГТУ. ORCID 0000-0002-7752-4262. *a.galitckaya@kg.ru*.

Галузин Алексей Андреевич, 2002 г. рождения. Магистрант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. ORCID 0009-0005-2697-035X. *alekseygaluzin@mail.ru*.

Поступила в редакцию 3.03.2025. после рецензирования 25.03.2025. Принята к публикации 1.04.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227

Forecasting the development of agricultural crops in a digital twin of plant cultivation

© 2025, P.O. Skobelev[1]✉, V.A. Galuzin[1], A.V. Galitskaya[1], A.A. Galuzin[2]

[1] *Samara State Technical University, Samara, Russia*

[2] *Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia*

Abstract

A method is proposed for calculating the output parameters of an agricultural crop in a digital twin of plant cultivation, considering weather conditions and environmental resource constraints. The method is based on a model of "tubes" of input and output parameters at different stages of plant growth and development - representing ideal, normal and critical value ranges for plant survival of the main environmental factors for each plant variety. The proposed calculation method links the input and output parameters of the current stage and carries the obtained results forward to the next stage, enabling the construction of a final piecewise linear plan for plant growth and development, as well as predicting yield and other plant characteristics. A system was developed to implement this method, and its application for calculations

and modeling experiments is demonstrated. The obtained results are compared with field experiment data on winter wheat growth and development. An assessment of the identified discrepancies is given, the obtained results are discussed, conclusions are formulated and directions for further research and development are presented.

Keywords: *precision farming, digital twin, plant development, winter wheat, multi-agent technologies, virtual model, simulation.*

For citation: *Skobelev P.0., Galuzin V.A, Galitskaya A.V., Galuzin A.A*. Forecasting the development of agricultural crops in a digital twin of plant cultivation [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 211-227. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227.

Acknowledgment: the authors express their gratitude to Academician S.N. Shevchenko, Director of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, for supporting research and development on digital twins of plants. They also thank A.S. Tabachinsky, Head of the Youth Laboratory of Digital Twins of Plants at the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, for providing the initial data used in constructing the knowledge base, developing the model and the method for calculating plant growth and development indicators, and supplying data for comparing the model with real crops.

Authors' contribution: Skobelev P.O. – problem statement and results evaluation, Galuzin V.A. – development of the concept and probem-solving methodology, Galitskaya A.V. – analysis of the subject area and review of existing approaches, Galuzin A.A. – development and implementation of the plant model and the method for calculating crop growth and development; conducting experiments and tests.

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

List of figures and table

Figure 1 – Schematic view of the problem statement.
Figure 2 – Tube with input parameter X and output parameter Y.
Figure 3 – Web interface of the program with a diagram of phase durations
Figure 4 – Tube of the input parameter of air temperature by the growth phases
Figure 5 – Main system class diagram
Figure 6 – Structural diagram of the system
Figure 7 – Example of air temperature graphs for each phase under favorable conditions
Figure 8 – Example of a plant height parameter graph with different scenarios
Figure 9 – Comparison of actual and calculated values of the phase start and end dates
Figure 10 – Comparison of the number of actual and calculated days of phase duration
Figure 11 – Comparison of actual plant height and calculated values.
Table 1 – Tubes of input parameters for the "Germination" phase.

References

[1] ***Fomin OS, Zyukin DA, Belyaev SA, Reprintseva EV.*** Economic and geographical specifics of the implementation of Russian wheat exports [In Russian]. *International Agricultural Journal*. 2023; 2: 138-142. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_2_138.

[2] ***Strashnaya AI, Tarasova LL, Bogomolova NA, Maksimenkova TA, Bereza OV***. Forecasting the yield of grain and leguminous crops in the central black earth regions based on the integration of ground and satellite data [In Russian]. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*.2015; 353: 128-153.

[3] ***Ramenskaya EV, Ermakov VV, Kuznetsov MP.*** Methods of classification of hyperspectral images in environmental monitoring [In Russian]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 18(4-5): 990-992.

[4] ***Andryushechkina NA, Musikhina LV.*** Internet of things in agriculture [In Russian]. *Scientific and technical bulletin: technical systems in the agro-industrial complex*. 2020; 1(6): 42-47.

[5] ***Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Larukhin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A.*** Autonomous digital twin of enterprise: Method and toolset for knowledge-based multi-agent adaptive management of tasks and resources in real time. *Mathematics*. 2022; 10(10): 1662. DOI: 10.3390/math10101662.

[6] ***Skobelev PO, Tabachinsky AS, Simonova EV, Strizhakov AN, Kudryakov EV, Ermakov VV, Zhuravel YN.*** Development of a multi-agent model of a digital twin of broccoli cabbage [In Russian]. *XVI All-Russian multi-conference on control problems*. 2023. P.263-265.

[7] ***Skobelev PO, Tabachinsky AS, Simonova EV, Zhuravel YN, Myatov GN.*** On some methods for calculating the state of crops in the digital twin service of plants [In Russian]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 24(3): 100-111. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-100-111.

[8] ***Skobelev PO, Mayorov IV, Simonova EV, Goryanin OI, Zhilyaev AA, Tabachinsky AS, Yalovenko VV.*** Implementation of a digital twin of plants for adaptive calculation of the duration of development stages and forecasting crop yields in a cyber-physical precision farming control system [In Russian]. *Mathematical Methods in Engineering and Technology*. 2020; 12: 133-136.

[9] ***Shevchenko SN, Korchagin VA, Goryanin OI.*** Modern technologies for cultivation of winter wheat in the Middle Volga region [In Russian]. *Agriculture*. 2009; 5: 40-41.

[10] ***Mityakov SN, Mityakov ES.*** Machine learning in the problems of research of innovation processes [In Russian]. *Journal of Applied Research*. 2020; 1(4): 6-13. DOI: 0.475776/2712-7516 2020 4 1 6.

[11] ***Alhnaity B., Pearson S., Leontidis G., Kollias S.*** Using deep learning to predict plant growth and yield in greenhouse environments. *International Symposium on Advanced Technologies and Management for Innovative Greenhouses: GreenSys2019* 1296. 2019. P.425-432. DOI: 10.48550/arXiv.1907.00624.

[12] ***Yasrab R., Zhang J., Smyth P., Pound M. P.*** Predicting plant growth from time-series data using deep learning. *Remote Sensing*. 2021; 13(3): 331. DOI: 10.3390/rs13030331.

[13] ***Namiot DE, Ilyushin EA.*** On the causes of failures of machine learning projects [In Russian]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023; 11(1): 60-69.

[14] ***Alves RG, Souza G, Maia RF, Tran ALH, Kamienski C, Soininen JP, Aquino PT, Lima F.*** A Digital Twin for Smart Farming. 2019 *IEEE Global Humanitarian Technology Conference* (GHTC). 2019. P.1-4. DOI: 10.1109/GHTC46095.2019.9033075.

[15] ***Chaux JD, Sanchez-Londono D, Barbieri G.*** A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture. *Applied Sciences*. 2021; 11(19): 8875. DOI: 10.3390/app11198875.

[16] ***Ariesen-Verschuur N, Verdouw C, Tekinerdogan B.*** Digital Twins in greenhouse horticulture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022; 199: 107183. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183.

[17] ***Pylianidis C, Osinga S, Athanasiadis IN.*** Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021; 184: 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.

About the authors

Petr Olegovich Skobelev (b. 1960) graduated from the Kuibyshev Aviation Institute in 1983, PhD (2003). Chief researcher at the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, professor at the Department of Computer Science and Computer Engineering of the Samara State Technical University. He is the author of more than 350 scientific papers and textbooks. *petr.skobelev@gmail.com*. ✉

Vladimir Andreevich Galuzin (b. 1995) graduated from the Samara National Research University named after academician S.P. Korolev in 2019, Candidate of Technical Sciences (2023). Associate Professor at the Department of Computer Science and Computer Engineering at the Samara State Technical University. ORCID 0000-0002-1460-613X. *v.galuzin@kg.ru.*

Anastasia Vyacheslavovna Galitskaya (b. 1995) graduated from the Samara University named after Academician S.P. Korolev in 2019. She is a postgraduate student at the Department of Computer Science and Engineering at the Samara State Technical University. ORCID 0000-0002-7752-4262. *a.galitckaya@kg.ru*.

Aleksey Andreevich Galuzin (b. 2002) is a master's student at the Department of Software Systems at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. ORCID 0009-0005-2697-035X. *alekseygaluzin@mail.ru.*

Received March 03, 2025. Revised March 25, 2025. Accepted April 01, 2025.

УДК 004.891.3 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-228-238

Онтология компьютерного тестирования в обучении

© 2025, А.В. Соловов✉, А.А. Меньшикова

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

Аннотация

Рассматриваются научно-методические основы компьютерного тестирования в обучении. Определена и обоснована структура тестов в тренировочных и контрольных упражнениях на основе дидактических требований к ним. Описаны типовые сценарии и экранные формы применения тренировочных и контрольных упражнений с примерами из электронного учебника и электронной библиотечной системы издательства. Показано, что тесты целесообразно структурировать и компоновать в наборы тестов по уровням усвоения учебного материала. Даны рекомендации по подготовке и использованию тестов на каждом уровне усвоения, приведены примеры тестов с выборочными ответами. Предложены алгоритмы компьютерного тестирования с фиксированным и переменным числом тестов в наборе, предъявляемом обучающемуся. Показана целесообразность использования для итогового контроля «билетов» – наборов тестов, сформированных в определённом составе. Проведена предварительная оценка возможностей современных нейросетей в генерации компьютерных тестов и даны рекомендации по их применению. Обсуждена проблема мошенничества в компьютерном тестировании, базирующегося на использовании нейросетевых «шпаргалок». Предложено использование электронных репетиторов, где компьютерному тестированию отводится роль диагностического оценивания в процессе обучения и предоставления индивидуальной помощи каждому обучающемуся.

Ключевые слова: *обучение, контроль качества, компьютерные тесты, цифровые обучающие ресурсы, обратная связь, искусственный интеллект*.

Цитирование: *Соловов А.В., Меньшикова А.А.* Онтология компьютерного тестирования в обучении. *Онтология проектирования.* 2025. Т.15, №2(56). С.228-238. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-228-238.

Вклад авторов: Соловов А.В. – общие требования и структурирование тестов, исследование искусственного интеллекта в компьютерном тестировании; Меньшикова А.А. – типовые сценарии и экранные формы, алгоритмы контроля.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Информационные технологии, адаптивное обучение и инструментальные средства активно используются для повышения эффективности, доступности и индивидуализации образовательного опыта [1, 2]. Компьютерное тестирование (КТ) продолжает находиться в центре внимания цифровых технологий в обучении [3-9]. Разработаны технологические инструменты для КТ при создании и применении электронных учебников [6, 10], Интернет-платформы для массовых открытых онлайн-курсов (МООК)[1]. Некоторые издательства учебной литературы тиражируют учебные пособия и предоставляют доступ к электронным версиям пособий с КТ по отдельным разделам и пособию в целом (см., например, [11]).

Цель данной статьи – исследование научно-методических основ КТ. В работе используются методы системного и онтологического анализов [12, 13], педагогической психологии и дидактики, а также опыт авторов в области теории и технологий электронного обучения.

[1] *Yurchenko A.* 9 best massive online course (MOOC) Platforms. ITSM4U.RU. 2023. https://itsm4u.ru/9moocplatform.

1 Общие требования к тестам

При разработке цифровых обучающих ресурсов (ЦОР) значительная часть работы приходится на создание тестов для тренирующих и контрольных упражнений. *Тренирующее* упражнение – это тест, сопровождаемый внутренней обратной связью (ОС) [6], *контрольное* упражнение – тест, не сопровождаемый внутренней ОС. Подготовка тестов требует высокого педагогического мастерства от преподавателя-разработчика. Для каждого ключевого понятия учебного материала в ЦОР необходимо придумать задания для его усвоения и контроля, расположить и ранжировать их, выбрать форму упражнений (с выборочными и/или конструируемыми ответами), подготовить эталоны ответов и предусмотреть типовые ошибки.

Структуру теста можно представить в следующем виде: *Тест = Задание + Эталон.* Если в тесте отсутствует эталон, то невозможно провести диагностику и измерение при контроле, сформировать внутреннюю ОС для тренировочных упражнений.

Выделяют пять общих требований к тестам [14]: валидность; определённость (общепонятность); простота; однозначность; надёжность.

Различают содержательную и функциональную *валидность*: первая – это соответствие теста содержанию учебного материала, вторая – соответствие теста оцениваемому уровню усвоения учебного материала.

Выполнение требования *определённости* теста необходимо для понимания каждым обучающимся того, что он должен выполнить, и для исключения правильных ответов, отличающихся от эталона.

Требование *простоты* теста означает, что тест должен иметь одно задание одного уровня усвоения, т.е. не должен состоять из нескольких заданий разного уровня усвоения.

Однозначность определяется как одинаковость оценки качества выполнения теста разными экспертами. Для этого используется следующая характеристика: $K = P1/P$, где $P1$ — количество правильно выполненных операций в тесте (наборе тестов); P — общее количество операций в тесте (наборе тестов). При $K \geq 0{,}7$ можно считать, что цель обучения на данном уровне достигнута, и можно переходить, если необходимо, к тестам следующего уровня [15].

Понятие *надёжности* тестирования определяют как вероятность правильного измерения величины K. Количественный показатель надёжности $r \in [0,1]$. Требование надёжности заключается в обеспечении устойчивости результатов многократного тестирования одного и того же испытуемого. Надёжность теста (набора тестов) растёт с увеличением количества операций P [16].

2 Типовые сценарии и экранные формы компьютерного тестирования

Дидактическая ниша ЦОР, в которых используется КТ, – теоретическая подготовка обучающихся (первоначальное знакомство, восприятие, осмысление и закрепление учебного материала) [6]. КТ в этих ЦОР применяют в учебной деятельности для тренировки по теории (рисунок 1) и для контроля по теории (рисунок 2).

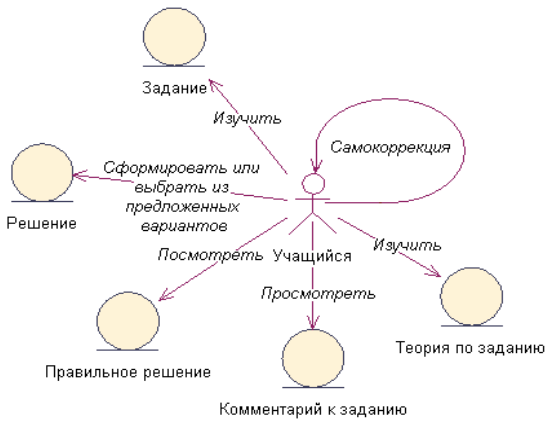


Рисунок 1 – Схема взаимодействия обучающихся и объектов компьютерного тестирования в тренировке по теории

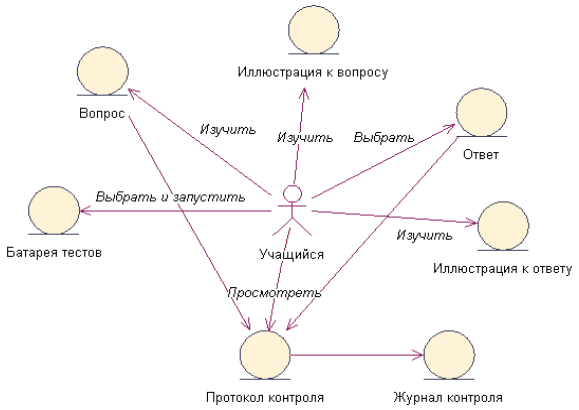


Рисунок 2 – Схема взаимодействия обучающихся и объектов компьютерного тестирования в контроле по теории

*Тренировка по теории***.** Только в ходе собственной активной деятельности обучающегося может быть достигнута главная дидактическая цель применения ЦОР – осмысление учебного материала, его интериоризация и запоминание. Эта цель достигается в ходе интерактивного взаимодействия обучающегося с объектами КТ (см. рисунок 1). В этой схеме после ответа на вопрос и получения сообщения о его правильности обучающийся может посмотреть правильный ответ, комментарий к ответу (например, ход решения задачи), теорию к вопросу из соответствующего раздела учебного материала (рисунок 3).

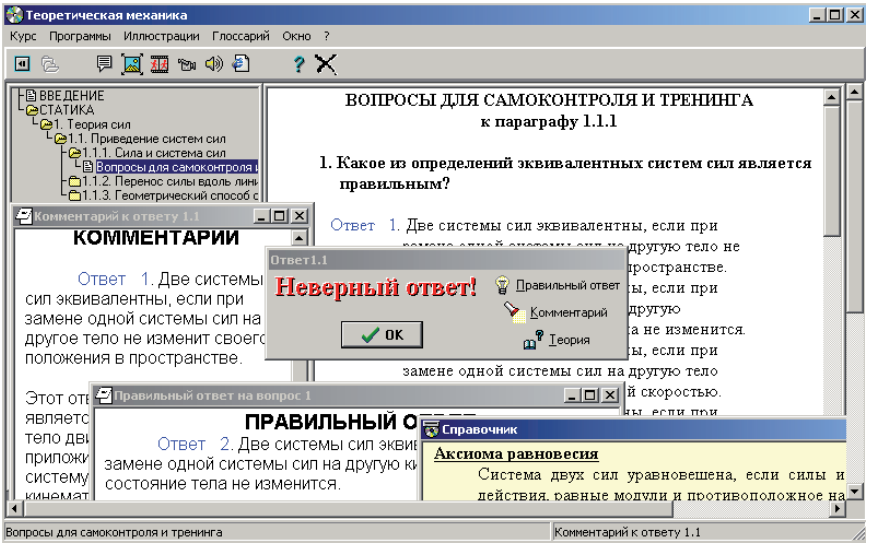
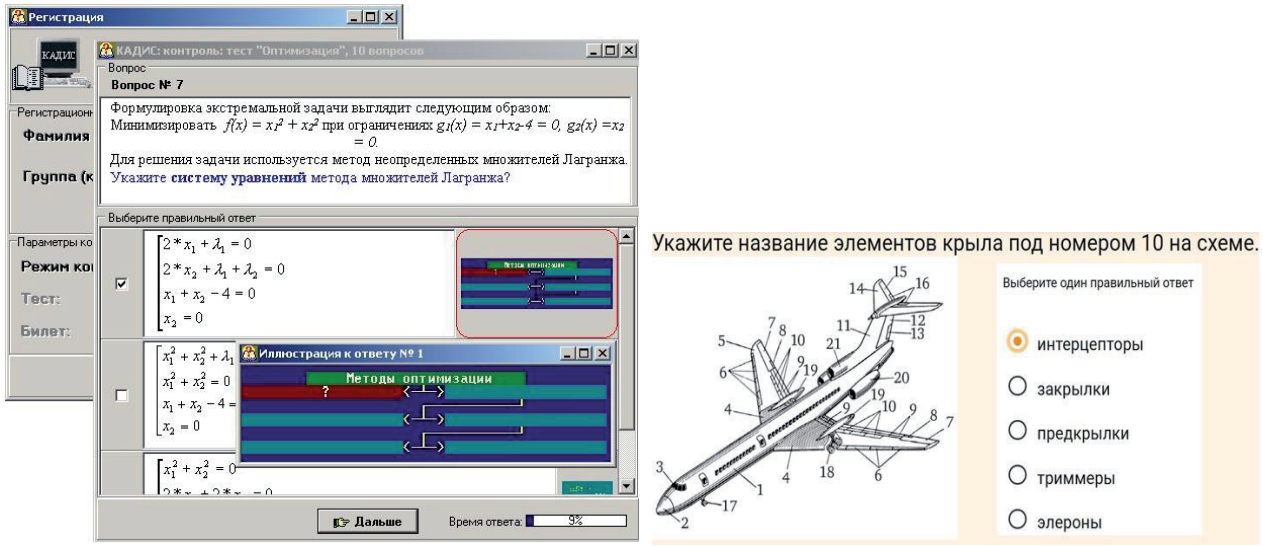


Рисунок 3 – Пример экранной формы тренировки по теории в электронном учебнике по механике [6]

*Контроль по теории***.** КТ используют для промежуточного или итогового контроля уровня усвоения теории в ЦОР соответственно по отдельным разделам или по всему учебному материалу. Сценарий контроля включает составление предоставление обучающимся необходимого набора тестов. Процесс тестирования заключается в предъявлении обучающемуся тестовых заданий в определённой последовательности (см. рисунок 4).

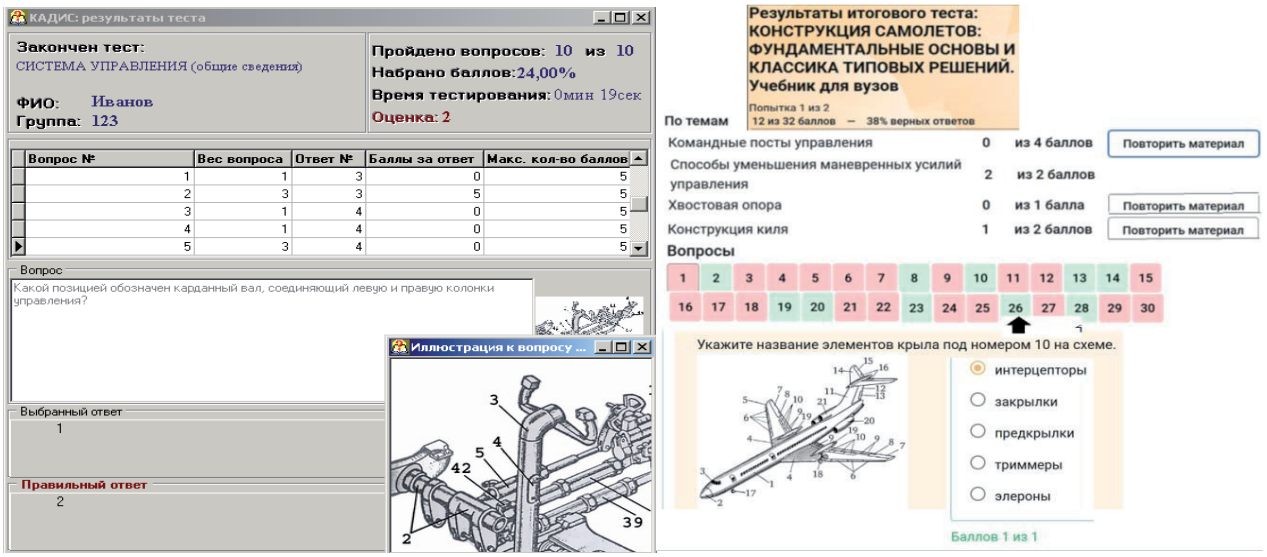


а б

Рисунок 4 – Примеры экранных форм компьютерного тестирования в контроле по теории:

а – в системе КАДИС [6]; б – в электронной библиотечной системе издательства «Юрайт» [11]

По окончании КТ обучающемуся предоставляется протокол тестирования, где он может увидеть количество набранных баллов, полученную оценку, список пройденных вопросов. Для каждого теста предусматривается возможность сравнить ответ, данный в ходе тестирования, с правильным ответом. В случае неудовлетворительной оценки целесообразно предъявлять протокол контроля (рисунок 5а). Предусматривается разделение результатов по темам с возможностью вернуться к повторному изучению материала (рисунок 5б).



а б

Рисунок 5 – Примеры экранных форм протокола контроля
а – в системе КАДИС [6]; б – в электронной библиотечной системе издательства «Юрайт» [11]

Информация о результатах тренировки и контроля по теории записывается в журнал успеваемости. Программы управления журналом обеспечивают сортировку «цифровых следов» обучающихся по различным признакам, проведение статистического анализа для выявления «трудного» и «лёгкого» учебного материала (рисунок 6).

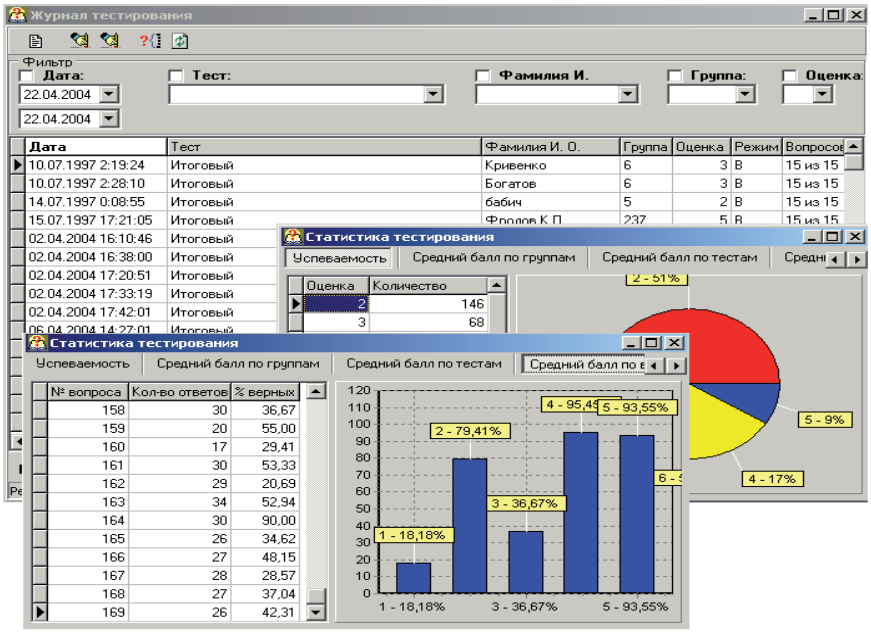


Рисунок 6 – Примеры экранных форм журнала успеваемости [6]

3 Структурирование тестов по уровням усвоения

При подготовке тестов целесообразно структурировать их в отдельные наборы по уровням усвоения с использованием таксономий дидактических целей [15-18]. В данной работе структуризация тестов проводится по трём уровням усвоения в классификации [15].

Тесты первого уровня (*знакомство*) – это репродуктивная деятельность с помощью (с внешней опорой). В приведённых примерах (рисунок 7) внешней опорой являются представленные явно объекты, по которым задаются вопросы (приведены в основном примеры тестов по программированию).

N п/п	Тестовые задания	Эталоны	**Р**
	Опознание		
1	Является ли оператор GOTO оператором безусловного перехода	ДА	1
	Различение		
2	Какой из представленных операторов является оператором безусловного перехода? 1. GO TO 2. DO... WHILE... 3. IF... THEN... ELSE...	GO TO	3
	Классификация		
3	Укажите операторы условного и безусловного перехода: 1. GO TO 2. DO... WHILE... 3. IF... THEN... ELSE...	Безусловного GO TO, условного - остальные	6

Рисунок 7 – Примеры тестов первого уровня

N п/п	Тестовые задания	Эталоны	**Р**
	Тесты подстановки		
1	Оператор ... является оператором безусловного перехода?	GO TO	1
	Конструктивные тесты		
2	Какой оператор обеспечивает безусловную передачу управления в программе?	GO TO	1
3	Дайте определение ...	Ключевые слова, символы, порядок их расположения.	По числу ключевых слов.
4	Напишите формулу ...		
5	Перечислите признаки (свойства) ...		
	Типовые задачи		
6	Запишите оператор безусловного перехода из любого места программы к оператору, помеченному меткой А.	GO TO A	1
7	Определите величину тока в сети с напряжением U = 150 В и сопр. R = 50 Ом.	1. **I=U/R** 2. I=150/50=3A.	1

Рисунок 8 – Примеры тестов второго уровня

Тесты второго уровня (*воспроизведение*) – это воспроизведение ранее усвоенной информации по памяти, от точной копии до применения в типовых ситуациях (рисунок 8).

Тесты третьего уровня (*применение*): обучающийся способен самостоятельно воспроизводить и преобразовывать усвоенную информацию для обсуждения известных фактов и продуцирования о них субъективно новой (для него) информации, а также для применения её в нетиповых (реальных) ситуациях.

Нетиповые задачи в процессе обучения могут переходить в разряд типовых задач (второй уровень усвоения). Другие учебные задачи могут всегда оставаться нетиповыми, например, формулировка проектной задачи в терминах математического программирования. Проектирование сложного объекта разделяется на ряд проектных подзадач. Декомпозиция общей задачи на частные всегда является нетиповой ситуацией (третий уровень усвоения).

Различают тип и форму теста. *Тип теста* связан с уровнем усвоения (см. рисунки 7, 8): опознание, различение, классификация – типы тестов первого уровня; тесты подстановки, конструктивные тесты, типовые задачи – типы тестов второго уровня; нетиповые задачи – тесты третьего уровня. Тип теста определяется характером мыслительной деятельности, которую должен выполнить обучающийся при решении теста.

Форма теста определяется его представлением. Современные инструментальные средства для создания ЦОР позволяют строить тесты с выборочными и/или конструируемыми

ответами. Часто применяются тесты с выборочными ответами. Они просты в подготовке (не нужно создавать множество эталонов правильных ответов, обеспечить полноту которого крайне затруднительно) и в использовании.

Тесты с выборочными ответами нередко связывают только с первым уровнем усвоения. Это распространённое дидактическое заблуждение является результатом поверхностного суждения. Если обучающийся сначала конструирует ответ, вспоминая ранее усвоенную информацию, либо применяя её для решения типовой или нетиповой задачи, и после этого выбирает ответ из представленных вариантов, то это тест соответственно второго или третьего уровня усвоения. Поэтому при подготовке теста с выборочными ответами необходимо чётко представлять (реконструировать) вид мыслительной деятельности, которую будет выполнять обучающийся при его решении.

*Последовательность уровней усвоения в тренировке по теории***.** Порядок применения тестов для диагностики и последующей корректировки знаний предполагает продвижение от низших уровней усвоения к высшим [15-17]. С развитием в педагогике методики «перевёрнутого класса» [18], последовательность применения тестов в тренировке по теории может быть иной – сначала тесты верхнего уровня, затем – тесты более низкого уровня.

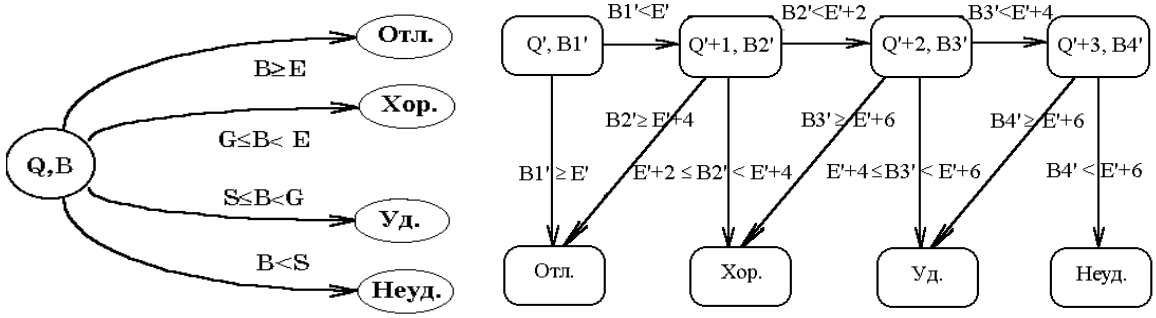
Наблюдения авторов за работой студентов с электронными учебниками показывают, что часть студентов начинает тренировку по теории с тестовых заданий верхних уровней усвоения, переходя, если необходимо, к заданиям более низкого уровня, возвращаясь назад к верхним уровням и т.д. Исследования эффективности процессов электронного обучения показывают, что свободное сканирование по учебному материалу даёт более высокий рост результатов на уровне применения знаний при решении нетиповых задач [6].

4 Алгоритмы контроля

Для промежуточного контроля по отдельным разделам изучаемого учебного материала возможны полная и/или частичная (обычно с использованием элементов случайности) выборка тестовых заданий из набора тестов контролируемого раздела. Рассматриваются два алгоритма контроля при частичной выборке: с фиксированным числом тестов в наборе (ФЧТ) и с переменным (адаптивным) числом тестов (ПЧТ).

При контроле по схеме с ФЧТ каждому учащемуся предъявляется определённое количество контрольных упражнений в наборе тестов, созданном случайным образом из всей совокупности упражнений тестов. Исходными данными для контроля с ФЧТ являются: Q – количество тестовых заданий в наборе, E – минимальное количество баллов для оценки «отлично», G – для оценки «хорошо», S – для оценки «удовлетворительно».

Алгоритм контроля с ФЧТ можно представить в виде ориентированного графа, состоящего из пяти вершин (рисунок 9а).



а б

Рисунок 9 – Графы алгоритмов контроля: а – с фиксированным числом тестов; б – с переменным числом тестов

Величины B, E, G, S вычисляются по формулам: $B=\sum B_i V_i$; $E=K_E B_{max} \sum V_i$; $G=K_G B_{max} \sum V_i$; $S=K_S B_{max} \sum V_i$, где i изменяется от 1 до Q; V_i – вес теста, $V_i \in [0,1]$; B_{max} – предельное число

баллов за тест, принятое в шкале контроля (например: 1, 5, 10 и т.п.); B_i - оценка в баллах за тест, $B_i \in [0, B_{max}]$; K_E, K_G, K_S – коэффициенты, определяющие нижние границы оценок (отлично, хорошо, удовлетворительно) соответственно (обычно K_E=0,9; K_G=0,8; K_S=0,7).

При адаптивном контроле с ПЧТ заранее известно лишь начальное, минимальное количество контрольных упражнений в наборах тестов, предъявляемых обучающимся. Если ответы обучающихся неверны, то добавляются дополнительные задания. Их количество зависит от степени правильности ответов – чем хуже отвечает обучающийся, тем больше он получает заданий.

Алгоритм адаптивного контроля с ПЧТ, используемый авторами для экспресс-контроля готовности обучающихся к лабораторным работам, показан на рисунке 9б. В этом алгоритме предельное число баллов за тест, принятое в шкале контроля, *Bmax*=5, веса всех тестов *Vi* одинаковы и равны единице, K_E = 0.9, т.е E'=4,5Q'.

В тренировке по теории также можно использовать ПЧТ. Исходными данными для управления здесь являются: минимально необходимое количество упражнений *Qmin* и две пороговые величины уровня усвоения (см. рисунок 9б).

Для итогового контроля целесообразно использовать «*билеты*» – наборы сформированных тестовых заданий. Такой подход позволяет представить все разделы учебного материала, составить примерно равноценные по содержанию и трудности наборы тестовых заданий.

5 Искусственный интеллект в компьютерном тестировании

Эксперименты по подготовке компьютерных тестов с помощью искусственного интеллекта (ИИ) проводились с использованием нейросети (НС) *ChatGPT*-4o-mini[2].

- НС способна создавать несколько (5-8) тестов для заданного небольшого фрагмента текста. Если учебный материал структурирован на отдельные небольшие разделы (в пределах экрана компьютера), то такое разбиение текста вполне вписывается в ограничения НС. Но возможно (менее удобно) произвольное разбиение больших текстов на доступные для НС фрагменты. При этом производительность вполне приемлема – отклик на запрос практически мгновенный.
- Для тестов с выборочными ответами НС генерирует тесты с четырьмя вариантами ответов (рисунок 10). Опыт авторов показывает, что предпочтительней было бы минимум пять ответов.

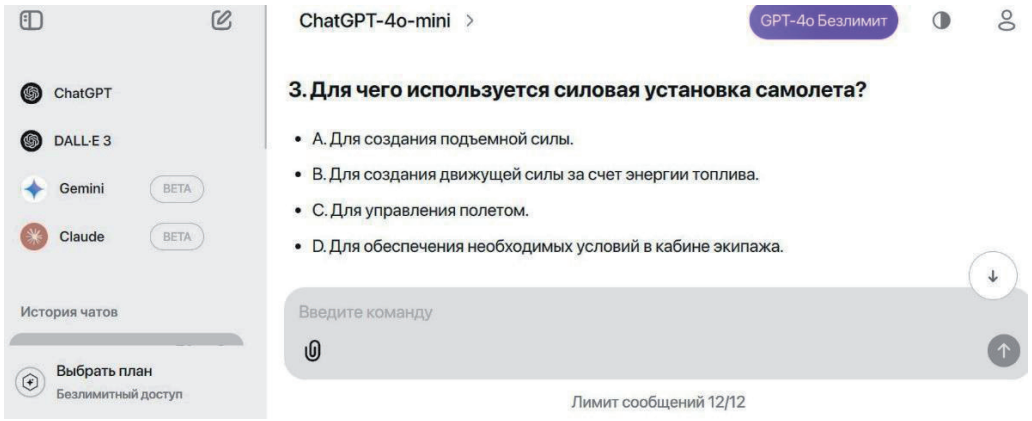


Рисунок 10 – Пример теста, сгенерированного в *ChatGpt* по фрагменту текста из [11]

- Оценка вариантов ответов бинарна (верно/неверно), что не всегда удобно. Нередко целесообразно иметь более дифференцированные оценки за ответы.
- *ChatGPT* – это языковая НС. Она генерирует тесты для текстового учебного материала и не может генерировать или обрабатывать изображения.

[2] *ChatGPT* (от англ. *Generative Pre-trained Transformer*). Свободно распространяемая в России версия *ChatGPT*-4o-*mini*. https://mashagpt.ru/chat.

- *ChatGPT* обучена на англоязычных источниках по дидактике. Поэтому она знает лишь о таксономии [17] и может генерировать тесты по уровням этой таксономии. Однако можно «заказывать» генерацию тестов по уровням таксономии [15] (*воспроизведение* и *применение*), совпадающим с уровнями таксономии [17] (соответственно *запоминание* и *применение*).

Таким образом, современные НС могут помочь в создании тестов, учитывая, что процесс подготовки тестов является самым трудоёмким этапом в разработке ЦОР. Ограничения относятся к тестам с изображениями. Развитие НС, распознающих визуальные образы, позволяет надеяться на прогресс в подготовке тестов с графическими иллюстрациями.

ИИ пользуется популярностью у студентов. Существует много онлайн-источников по оказанию услуг с помощью НС, в т.ч. и для решения тестов. Преподавательское сообщество тревожит применение НС в качестве своего рода «шпаргалок». Предлагаются, в частности, этические правила применения ИИ [19, 20]. Генеративный ИИ «может создать зону комфортного уровня доверия между студентами и технологией (особенно по мере того, как она становится более надёжной и интегрируется в повседневные продукты), где баланс риска и вознаграждения может склонить многих студентов к лёгким, а затем и к более серьёзным нарушениям академической честности» [21].

Заключение

В разработке ЦОР наиболее трудоёмкая часть работы, требующая высокой педагогической квалификации, приходится на создание компьютерных тестов. При подготовке тестов целесообразно структурировать их в отдельные наборы тестов по трём уровням усвоения: знакомство, воспроизведение, применение. В ходе тренировки по теории допустимо свободное сканирование учащихся по уровням усвоения, подобно методике «перевёрнутого класса».

Информацию о результатах тренировочных и контрольных процедур КТ необходимо записывать как внешнюю обратную связь в журнал успеваемости, при этом программы управления журналом должны обеспечивать сортировку «цифровых следов» учащихся по различным признакам, проведение статистического анализа для выявления «трудного» и «лёгкого» учебного материала.

Для промежуточного контроля по теории могут быть использованы алгоритмы КТ с ФЧТ и ПЧТ в наборе, предъявляемом обучающемуся. Для итогового контроля целесообразно применять «билеты» – наборы тестов, сформированных в определённом количестве и в определённой последовательности.

Компьютерный тест должен включать задание и эталон его выполнения, удовлетворять общим требованиям к тестам. Современные НС позволяют автоматизировать процесс подготовки тестов для текстового учебного материала.

Список источников

[1] ***Днепровская Н.В., Янковская Е.А., Шевцова И.В.*** Понятийные основы концепции смарт-образования. *Открытое образование.* 2015. № 6(113). С.43-51.

[2] ***Соловов А.В., Меньшикова А.А.*** Трансформация онтологии образования: от классно-урочной системы к смарт-инновациям. *Онтология проектирования.* 2022. Т.12, № 4(46). С.470-480. DOI 10.18287/2223-9537-2022-12-4-470-480.

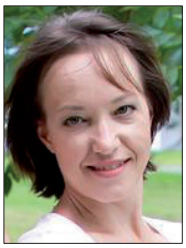
[3] Обучающие машины и комплексы: Справочник / Под общей ред. А.Я. Савельева. Киев: Вища шк. Головное изд-во. 1980. 303 с.

[4] Подготовка кадров в области САПР: Автоматизированные обучающие системы, учебно-исследовательские САПР и другие средства обучения: Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1984-1988 гг. М.: Центральная политехническая библиотека. 1989. 71 с.

[5] ***Соловов А.В., Меньшикова А.А.*** Дискретные математические модели в исследовании процессов автоматизированного обучения. *Информационные технологии.* 2001. №12. С.43–48.
[6] ***Соловов А.В.*** Электронное обучение: проблематика, дидактика, технология. Самара: Новая техника. 2006. 464 с.
[7] ***Коннова Л.П., Липагина Л.В., Постовалова Г.А. и др.*** Проектирование цифровых образовательных ресурсов // Финансовый университет при Правительстве РФ, Департамент математики. Москва: Издательство Прометей. 2022. 268 с.
[8] ***Гвоздев А.С., Мелентьев В.С., Лейковский И.Ф.*** Сравнительная оценка подходов к подготовке бакалавров по авиационным двигателям. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.82-95. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-82-95.
[9] ***Айзикович А.А., Рычина Н.А.*** Реализация некоторых подходов к тестированию учащихся. *Образовательные технологии и общество (Educational Technology & Society)*. 2017. Т.20. №1. С.417-423.
[10] ***Соловов А.В.*** Технологические средства электронного обучения. Москва: Информационно-телекоммуникационные технологии в образовании. 2008. 40 с.
[11] ***Соловов А.В., Меньшикова А.А.*** Конструкция самолетов: фундаментальные основы и классика типовых решений. Москва: Издательство ЮРАЙТ. 2021. 385 с.
[12] ***Кречетников К.Г.*** Методология проектирования, оценки качества и применения средств информационных технологий обучения. М.: Изд-во Гос. коорд. центра инф. техн. 2001. 244 с.
[13] ***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.
[14] ***Анастази А.*** Психологическое тестирование. М.: Педагогика. 1982. Т.1. 320 с.
[15] ***Беспалько В.П.*** Основы теории педагогических систем. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та. 1977. 303 с.
[16] ***Белкин Е.Л.*** Дидактические основы управления познавательной деятельностью в условиях применения технических средств обучения. Ярославль: Верх.-Волж. кн. изд-во. 1982. 107 с.
[17] ***Bloom B.S., Engelhart M.D., Furst E.J.*** Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. David McKay Company. 1956. Vol. Handbook I: Cognitive domain.
[18] ***Anderson L.W. et al.*** A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing. A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives. Pearson Education. 2001.
[19] ***Безуглый Т.А., Ершова М.Е.*** Использование текстовых нейросетей и искусственного интеллекта в учебных работах студентов. *Проблемы современного образования*. 2023. №5. С.206-216. DOI: 10.31862/2218-8711-2023-5-206-216.
[20] ***Nikolic S., Sandison C., Haque R., Daniel S., Grundy S., Belkina M., … Neal P***. ChatGPT, Copilot, Gemini, SciSpace and Wolfram versus higher education assessments: an updated multi-institutional study of the academic integrity impacts of Generative Artificial Intelligence (GenAI) on assessment, teaching and learning in engineering. *Australasian Journal of Engineering Education*. 2024 1–28. DOI: 10.1080/22054952.2024.2372154.
[21] ***Popenici S.*** The critique of AI as a foundation for judicious use in higher education. *Journal of Applied Learning & Teaching.* 2023. 6(2). DOI: 10.37074/jalt.2023.6.2.4.

Сведения об авторах

Соловов Александр Васильевич, 1948 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва в 1972 г., к.т.н. (1977). Профессор по кафедре технической кибернетики (2006). Действительный член Российской академии информатизации образования (1996). В списке научных трудов более 300 работ в области САПР, теории и технологий электронного обучения. ORSID: 0000-0001-6288-820X; Author ID (РИНЦ): 560817; Author ID Scopus): 57222040521. *a_solovov@mail.ru.* ✉.



Меньшикова Анастасия Александровна, 1972 г. рождения. Окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева в 1996 г., к.т.н. (2004). Доцент кафедры суперкомпьютеров и общей информатики Самарского университета. В списке научных трудов более 40 работ. ORSID: 0000-0001-8201-7065; Author ID (РИНЦ): 382400; Author ID (Scopus): 57222036809; Researcher ID (WoS): H-6847-2017. *nastya.menshikova@gmail.com.*

Поступила в редакцию 26.02.2025, после рецензирования 14.03.2025. Принята к публикации 25.03.2025.

CC BY

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-228-238

Ontology of computer-based testing in learning

© 2025, A.V. Solovov✉, A.A. Menshikova

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

Abstract

The article considers the scientific and methodological foundations of computer-based testing in learning. The structure of tests in training and assessment exercises is defined and substantiated based on didactic requirements. Typical scenarios and screen forms of using training and assessment exercises are described, with examples from an electronic textbook and the publisher's electronic library system. It is shown that tests should be structured and grouped into sets according to the levels of assimilation of educational material. Recommendations are given for the preparation and use of tests at each level of assimilation, along with examples of tests with selective answers. Algorithms for computer-based testing with both fixed and variable numbers of tests in a set presented to students are proposed. The expediency of using "tickets" – predefined test sets - for final assessments is shown. A preliminary evaluation of modern neural networks' capabilities in generating computer-based tests is conducted, and recommendations for their application are provided. The problem of fraud in computer-based testing, particularly through the use of neural network "cheat sheets" is discussed. The use of electronic tutors is proposed, where computer-based testing serves as a diagnostic assessment tool in the learning process, offering individualized support to each student.

Keywords: *training, quality control, computer tests, digital learning resources, feedback, artificial intelligence*.

For citation: *Solovov AV, Menshikova AA.* Ontology of computer-based testing in learning [In Russian]. *Ontology of designing.* 2025; 15(2): 228-238. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-228-238.

Authors' Contributions: Solovov A.V. – defined general requirements and structuring of tests, researched artificial intelligence in computer-based testing; Menshikova A.A. – developed typical scenarios and screen forms, along with assessment algorithms.

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

List of figures

Figure 1 – Scheme of interaction between students and computer-based training (CT) objects in theory training
Figure 2 – Scheme of interaction between students and CT objects in theoretical assessment
Figure 3 – An example of a screen form of theoretical training in an electronic textbook on mechanics [6]
Figure 4 – Examples of screen forms of CT in theoretical assessment: a – in the KADIS system [6]; b – in the electronic library system of the Yurayt publishing house [11]
Figure 5 – Examples of screen forms of the assessment protocol: a – in the KADIS system [6]; b – in the electronic library system of the Yurayt publishing house [11]
Figure 6 – Examples of screen forms of the progress journal [6]
Figure 7 – Examples of Level 1 Tests
Figure 8 – Examples of Level 2 Tests
Figure 9 – Graphs of the assessment algorithms: a – with FNT; b – with PNT
Figure 10 – An example of a test generated in ChatGpt based on a text fragment from [11]

References

[1] ***Dneprovskaya NV, Yankovskaya EA, Shevtsova IV.*** Conceptual foundations of the concept of smart education. [In Russian]. *Open education.* 2015; 6(113): 43-51.

[2] ***Solovov AV, Menshikova AA.*** Transformation of the Ontology of Education: From the Classroom Lesson System to Smart Innovations. [In Russian]. *Ontology of designing.* 2022; 12, 4(46): 470-480. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-470-480.

[3] Teaching machines and complexes: Handbook / Under the general editorship of A.Y. Savelyev. [In Russian]. Kiev: Vyshcha shk. Main Publishing House. 1980. 303 p.

[4] Training of personnel in the field of CAD: Automated training systems, educational and research CAD and other teaching tools: Bibliographic index of domestic and foreign literature for 1984-1988. [In Russian]. Moscow: Central Polytechnic Library. 1989. 71.
[5] ***Solovov AV, Menshikova AA.*** Discrete mathematical models in the study of automated learning processes. [In Russian]. *Information technologies.* 2001; 12: 43–48.
[6] ***Solovov AV.*** E-Learning: Problems, Didactics, Technology. [In Russian]. Samara: New Book. 2006. 464.
[7] ***Konnova LP, Lipagina LV, Postovalova GA.*** Designing digital educational resources. [In Russian]. Financial University under the Government of the Russian Federation, Department of Mathematics. Moscow: Limited Liability Company "Prometheus Publishing House". 2022. 268.
[8] ***Gvozdev AS, Melentyev VS, Leykovsky IF***. Comparative assessment of approaches to training of bachelor's students in aircraft engine designs [In Russian]. *Ontology of designing.* 2025; 15, 1(55): 82-95. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-82-95.
[9] ***Aizikovich AA, Rychina NA.*** Implementation of Some Approaches to Testing Students. [In Russian]. *Educational Technology & Society / International Electronic Journal.* 2017; 20, 1: 417-423.
[10] ***Solovov AV.*** Technological means of e-learning. [In Russian]. Moscow: Information and Telecommunication Technologies in Education. 2008. 40.
[11] ***Solovov AV, Menshikova AA.*** Aircraft Design: Fundamentals and classics of typical solutions. [In Russian]. Moscow: Limited Liability Company "URAIT Publishing House". 2021. 385.
[12] ***Krechetnikov KG.*** Methodology of Designing, Quality Assessment and Application of Information Learning Technologies. [In Russian]. Moscow: Izd-vo Gos. Id. center inf. Tech. 2001. 244.
[13] ***Borgest NM.*** System and Ontological Analysis: Similarities and Differences between the Concepts. [In Russian]. *Ontology of designing.* 2024; 14, 1(51): 9-28. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1- 9-28.
[14] ***Anastasi A.*** Psychological testing. [In Russian]. Moscow: Pedagogy Publ., 1982, 1. 320.
[15] ***Bespalko VP.*** Fundamentals of the theory of pedagogical systems. [In Russian]. Voronezh: Voronezh Publishing House University. 1977. 303.
[16] ***Belkin EL.*** Didactic Foundations of Management of Cognitive Activity in the Conditions of Application of Technical Means of Learning. [In Russian]. Yaroslavl: Verkh.-Volzh. Kn. Izd-vo. 1982. 107.
[17] ***Bloom BS, Engelhart MD, Furst EJ.*** Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. David McKay Company, 1956. Handbook I: Cognitive domain.
[18] ***Anderson LW. et al.*** A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing. A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives. Pearson Education. 2001.
[19] ***Bezugly TA, Ershova ME.*** The Use of Text Neural Networks and Artificial Intelligence in the Educational Works of Students. [In Russian]. *Problems of Modern Education.* 2023. 5: 206-216. DOI: 10.31862/2218-8711-2023-5-206-216.
[20] ***Nikolic S, Sandison C, Haque R, Daniel S, Grundy S, Belkina M, … Neal P***. ChatGPT, Copilot, Gemini, SciSpace and Wolfram versus higher education assessments: an updated multi-institutional study of the academic integrity impacts of Generative Artificial Intelligence (GenAI) on assessment, teaching and learning in engineering. *Australasian Journal of Engineering Education*, 2024: 1–28. DOI: 10.1080/22054952.2024.2372154.
[21] ***Popenici S.*** The critique of AI as a foundation for judicious use in higher education. *Journal of Applied Learning & Teaching, 2023. 6*(2). DOI: 10.37074/jalt.2023.6.2.4.

About the authors

Alexander Vasilevich Solovov (b. 1948) graduated from the Korolyov Aviation Institute (Kuibyshev, USSR) in 1972, PhD (1977). Professor at the Department of Technical Cybernetics (2006). Full member of the Russian Academy of Informatization of Education (1996). The list of scientific works includes more than 300 works in the field of CAD, theory and technologies of e-learning. ORSID: 0000-0001-6288-820X; Author ID (RSCI) : 560817; Author ID (Scopus): 57222040521. *a_solovov@mail.ru*. ✉.

Anastasia Alexandrovna Menshikova (b. 1972) graduated from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev in 1996, Ph.D. (2004). Associate Professor at the Department of Supercomputers and General Informatics at Samara University. The list of scientific works includes more than 40 works. ORSID: 0000-0001-8201-7065; Author ID (RSCI): 382400; Author ID (Scopus): 57222036809; Researcher ID (WoS): H-6847-2017. *nastya.menshikova@gmail.com*.

Received February 26.02.2025. Revised March 14.03.2025. Accepted 25.03. 2025.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.682 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-239-248

Использование онтологий для контекстуализации запросов к большим языковым моделям

© 2025, П.А. Ломов

Кольский научный центр Российской академии наук,
Институт информатики и математического моделирования им. В.А. Путилова, Апатиты, Россия

Аннотация

Применение больших языковых моделей стало распространённым явлением в вопросно-ответных и диалоговых системах. Для этого модель должна быть предварительно обучена на подготовленных текстовых данных, что позволяет ей с высокой вероятностью генерировать корректные реплики в диалоге с пользователем. Однако качество ответов снижается, если вопросы начинают касаться предметов, процессов и явлений, которые в меньшей степени описаны в текстах, использованных для обучения модели. Для этого данные, являющиеся новыми для модели, передаются ей вместе с пользовательским запросом в виде контекста, который обычно формируется с использование векторной базы данных текстовых фрагментов. В статье предлагается использование в качестве источника контекстных данных вместо векторной базы данных онтологии предметной области. Онтологии снабжаются лексическим представлением формализованной в них терминологической системы для идентификации релевантного пользовательскому запросу онтологического фрагмента и трансформации его в естественно-языковой текст формируемого контекста. Это позволяет уменьшить объём текста ответа и повысить степень его семантического соответствия пользовательскому запросу. В статье рассматриваются минимальные требования к структуре лексического представления онтологии: наличие естественно-языковых наименований, их форм для понятий и отношений, а также их лексических значений. Применение предложенного подхода показано на примере получения ответа на вопрос по научным статьям с использованием большой языковой модели. Обсуждаются преимущества и недостатки предложенного подхода.

Ключевые слова: *онтология, большая языковая модель, запрос, контекст, генерация ответа.*

Цитирование: *Ломов П.А.* Использование онтологий для контекстуализации запросов к большим языковым моделям. *Онтология проектирования*. 2025. Том 15, №2(56). С.239-248. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-239-248.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Одним из перспективных направлений искусственного интеллекта является создание и применение больших языковых моделей (БЯМ) [1, 2]. С их помощью удаётся решать задачи, связанные с обработкой естественно-языковых (ЕЯ) текстов, включая их генерацию, классификацию, определение тем, автоматический перевод и др. Существенные результаты получены при использовании БЯМ для создания вопросно-ответных и диалоговых систем [3,4]. Для этого модель должна быть предварительно обучена на огромном объёме подготовленных текстовых данных, что позволяет ей генерировать корректные реплики в диалоге с пользователем [5]. Однако в таком сценарии использования качество ответов модели, как правило, падает, если вопросы пользователя начинают касаться предметов, процессов и явлений, которые в сравнительно меньшей степени описаны в текстах, использованных для её обуче-

ния. Для решения этой проблемы можно провести дообучение модели на текстах, отражающих необходимую специфику предметных областей (ПрО) и/или прикладных задач, но это может потребовать существенных аппаратных и временных ресурсов.

Широкое распространение получил подход к обеспечению учёта моделью новой информации на основе генерации ответа с использованием результатов поиска (*Retrieval-Augmented Generation, RAG*) [6]. Его суть заключается в автоматическом получении дополнительных текстовых данных, с которыми предобученая модель не знакома, и их добавлении в запрос пользователя. Упомянутые данные должны быть релевантны запросу, включающему указание модели на необходимость их учёта при генерации ответа. Таким образом, *RAG* предполагает использование расширенного запроса к БЯМ (промпта, *prompt*), включающего, помимо текста формулировки пользовательского вопроса или задания, некоторый контекст – данные, на основе которых модель должна сгенерировать текст ответа.

RAG можно рассматривать как разновидность контекстного обучения [7], где контекст формируется автоматически путём извлечения текстовых фрагментов из базы данных (БД). В качестве хранилища для *RAG* часто используются векторные БД, которые позволяют получать подходящие для добавления в контекст запроса тексты по близости их векторных представлений к векторному представлению текста запроса. При использовании векторной БД необходимо представить в ограниченном по размеру контексте информацию о всех понятиях из пользовательского запроса. В противном случае ответ модели может быть неполным или абстрактным. Для уменьшения размера контекста можно разделить тексты на фрагменты при добавлении в БД и/или использовать для поиска не весь текст запроса, а только именные группы, которые обозначают значимые понятия и отношения между ними. Таким способом можно дополнительно структурировать информацию, которую модель будет использовать. В общем случае чёткие правила структурирования сложно сформулировать без семантического анализа текстов и обнаружения в них понятий и отношений ПрО.

В данной работе предлагается использование существующей онтологии ПрО вместо векторной БД для контекстуализации запросов к БЯМ в рамках *RAG*.

1 Обзор основных подходов

RAG представляет собой перспективный подход к преодолению присущих БЯМ ограничений, связанных с их приоритетной ориентацией на знания, представленные в виде ЕЯ текстов, и с затруднительной актуализацией этих знаний. Это и определяет большое количество исследований [8], посвящённых реализациям *RAG*, направленным на ускорение получения контекстных данных, повышение их релевантности пользовательскому запросу, обеспечение использования знаний, представленных в разных модальностях, и упрощение процесса развёртывания и использования *RAG*.

В работе [6] впервые был представлен подход к использованию БЯМ, включающий комбинирование процессов извлечения информации из внешних баз знаний с генерацией текста. *RAG* включает две компоненты: поисковый модуль, отвечающий за извлечение релевантных фрагментов текста из БД; генератор, формирующий ответ с учётом извлечённой информации. Данная работа определила основную архитектуру систем, реализующих *RAG*, и послужила отправной точкой для последующих исследований в этой области.

В работе [9] поисковый модуль был использован не на этапе обработки пользовательского запроса, а на этапе предварительного обучения модели кодировщика *BERT* (*Bidirectional Encoder Representations from Transformers*) для подбора документов, представляющих знания о ПрО. Модель кодировщика обычно предобучается на корпусе общеязыковых текстов, из которого ей последовательно передаются автоматически размеченные предложения. Соглас-

но [9] поисковый модуль для каждого «обычного» предложения пытается найти семантически близкое предложение из корпуса текстов по ПрО. В результате кодировщик получает обучающий пример, состоящий из двух предложений. Это позволяет осуществить обучение на комбинации примеров из общеязыкового и специализированного наборов и обеспечить возможность генерации текстов с учётом знаний ПрО.

В работе [10] описано применение *RAG* в задаче ведения голосового диалога пользователя с системой. В этом случае используются ранее сохранённые фрагменты диалогов, с которыми сопрягаются характеризующие их семантические и стилевые векторы, для генерации системой ответных речевых реплик с учётом общего смысла диалога и его языкового стиля.

Близкими к подходу, который рассматривается в данной работе, можно отнести подходы с использованием графов (*Graph RAG*) [11], в которых языковая модель при генерации текста может обращаться к структурированным знаниям, представленным в виде графа. Это позволяет ей использовать информацию о взаимосвязях между различными сущностями ПрО, повышая релевантность и точность генерируемых ею ответов.

Для представления данных ПрО в виде графа, как правило, используются модели: *LPG* (*Label Property Graph*) или *RDF* (*Resource Description Framework*). Для этого требуется приведение знаний ПрО в графовый вид в графовой БД, а также определение в ней индексов различных типов для ускорения выполнения запросов. Наличие графового представления знаний ПрО обеспечивает гибкость поискового модуля, в котором могут использоваться простые эвристики и традиционные алгоритмы поиска по графу [12, 13], БЯМ для трансляции ЕЯ вопросов в запросы к графовой БД на специализированном языке [14], а также графовая нейронная сеть для кодирования структуры графа и выбора подходящих элементов (узлы, пути, подграфы) на основании их сходства с пользовательским запросом [15].

2 Применение онтологии в *RAG*-технологии

Онтология ПрО представляет её понятийную систему, описанную на некотором формальном языке, что делает возможным её использование для обработки данных в информационных системах. При разработке онтологии важно обеспечить интерсубъективность [16] явленных в ней знаний о ПрО. Именно соблюдение этого требования делает онтологию разделяемой формальной спецификацией концептуализации [17], т.е. концептуализации, являющейся результатом консенсуса некоторого профессионального сообщества.

Данное свойство онтологии позволяет рассматривать её как истинную в некотором отношении основу для структурирования предметных ЕЯ текстов и соотнесения их фрагментов с онтологическими понятиями. Представленные в онтологии ПрО межпонятийные отношения и атрибуты понятий могут быть транслированы в ЕЯ предложения, смысл которых может быть близок к смыслу предложений из текстов ПрО, содержащих эти понятия.

Использование онтологии в *RAG* состоит в формировании ЕЯ контекста пользовательского запроса из фрагментов текстов, сопряжённых с онтологическими понятиями, релевантными этому запросу, а также из ЕЯ представлений (лексикализаций) их связей с другими элементами онтологии (понятиями, атрибутами, значениями). Полнота и корректность формируемого контекста в этом случае зависят от полноты и детализации лексического представления понятийной системы онтологии [18]. В данном случае такое представление должно включать для каждого понятия его наименование и текстовый фрагмент с лексическим значением. Для отношений и атрибутов необходимо представить наименования, дополнив их возможными формами для обеспечения возможности построения грамматически корректных ЕЯ предложений, представляющих различные варианты их употребления.

Для иллюстрации можно рассмотреть лексическое представление в онтологии понятия «Составной онтологический паттерн (ОП) содержания» (*CompositeOntologyDesignPattern*) (см. рисунок 1) и отношения «содержит» (*has_part*) (см. рисунок 2), которое используется в связанной с ним *OWL* аксиоме:

CompositeOntologyDesignPattern *EquivalentTo:* ***ContentOntologyDesignPattern*** *and (has_part some* ***ContentOntologyDesignPattern****).*

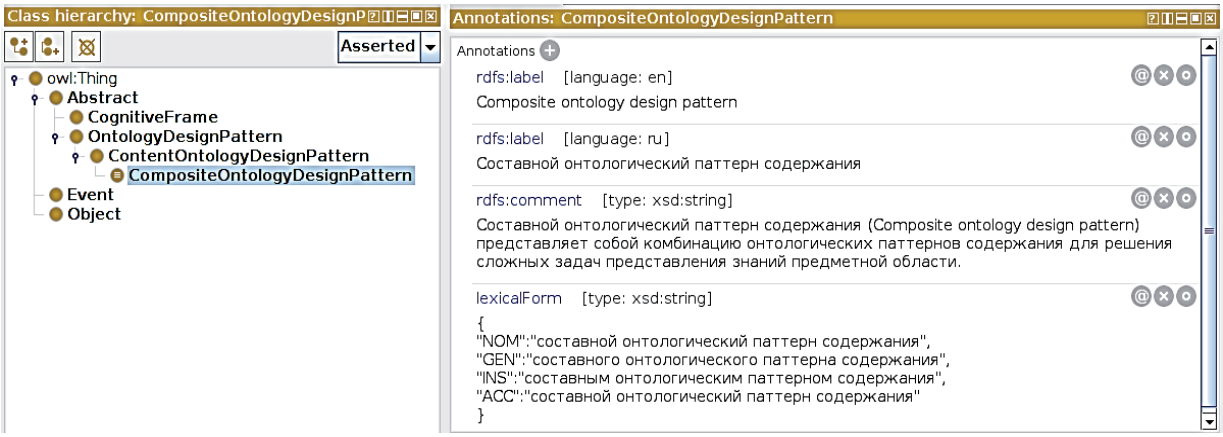


Рисунок 1 – Фрагмент онтологии с лексическим представлением понятия онтологии «Составной онтологический паттерн содержания» (*Composite ontology design pattern*)

Понятие имеет несколько аннотаций, включающих ЕЯ наименования (*rdfs*:*label*) и определения (*rdfs*:*comment*) из [19], и несколько форм употребления (*lexicalForm*) в различных падежах. Отношение имеет несколько аннотаций: наименование и возможные формы наименований понятий (*domainLexicalForm*, *rangeLexicalForm*), которые оно может связывать.

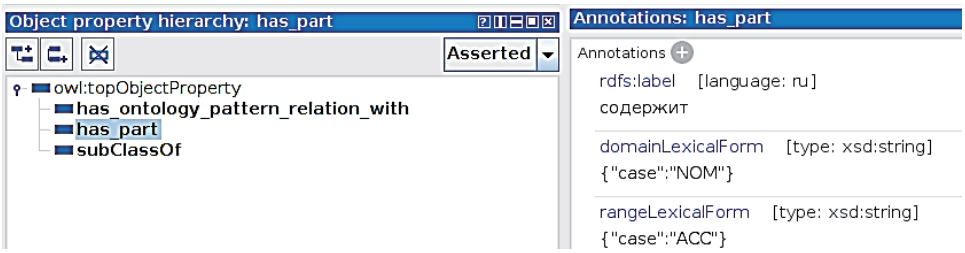


Рисунок 2 - Фрагмент онтологии с лексическим представлением отношения «содержит» (*has_part*)

3 Процедура контекстуализации запросов к большим языковым моделям

Процедура формирования контекста с использованием онтологии ПрО для пользовательского запроса к БЯМ состоит из двух этапов: идентификация фрагмента онтологии, релевантного запросу пользователя; трансляция онтологического фрагмента в ЕЯ текст, составляющий содержание контекста.

Можно рассмотреть применение данной процедуры на примере формирования онтологического контекста для пользовательского запроса и последующую передачу их БЯМ в виде промпта. В качестве источника данных для получения контекста использовалась онтология, фрагменты которой представлены на рисунках 1 и 2, содержащая понятия из статей [19, 20]. В качестве БЯМ использовался *GigaChat-Pro* (https://giga.chat/) от компании Сбер (по состоянию на 20.08.2024).

Рассматривался пользовательский запрос: «Как отношения между ОП используются для формирования когнитивных фреймов (КФ)?» Ответ на него содержится в [19, 20].

В [20] рассматривалась концепция КФ, которая представляет собой формализованное описание визуализации некоторой точки зрения на понятие. В качестве «точек зрения» применительно к онтологиям рассматривались ОП содержания, которые представляют собой мини-онтологии для описания типовых положений вещей в ПрО (например, часть-целое, участие в событии, исполнитель роли). Таким образом, ОП является основой для построения КФ. В [19] рассматривалось объединение нескольких ОП для получения составного ОП, который может быть использован для описания сложной ситуации в ПрО (например, участие сущностей в событии в определённых ролях). Однако такое комбинирование ОП возможно в том случае, если между ними существуют отношения (специализирует, имеет часть, соотносится).

Правильный ответ на приведённый запрос должен включать указание на то, что именно отношения позволяют получить составной ОП, на основе которого можно построить КФ. Сформулировать его можно следующим образом: «Отношения позволяют получить составной ОП, на основе которого можно построить КФ».

В качестве формальной оценки соответствия ответов, сгенерированных БЯМ, и правильного используется косинусная близость между их контекстуализированными векторными представлениями (*contextualized word embeddings*) [21]. Для получения таких представлений могут быть использованы кодировщик *BERT*, предобученный на текстах требуемого языка, или модель *ELMo* (*Embeddings from Language Models*) [22]. В рассматриваемом случае использовался кодировщик *ruBert-base* [23], который был дообучен на [19, 20] для учёта специфики лексики и грамматических конструкций, используемых в онтологии. Для получения шкалированых значений косинусной близости (ШКБ) генерируемых БЯМ ответов (приведения значений ШКБ к единичному интервалу) необходимо определить минимально и максимально возможную близость. Для этого задаются несколько вариантов правильного ответа.

1) отношения помогают сформировать сложный ОП, который служит основой для построения КФ.
2) благодаря отношениям создаётся составной ОП, служащий базой для КФ.
3) посредством отношений формируется комбинированный ОП, используемый для конструирования КФ.
4) отношения позволяют получить составной ОП. Этот паттерн используется для построения КФ.

Найденное среднее значение косинусной близости между векторными представлениями данных вариантов и векторными представлением правильного ответа составляет 0,942. Это значение принято за близость, соответствующую наиболее точным и полным ответам. Аналогичным образом определена близость для максимально плохих ответов – 0,991. В качестве таковых произвольным образом выбрано несколько предложений из [19, 20], включающих некоторые понятия из рассматриваемого вопроса, однако не отвечающих на него.

Формирование контекста начинается с определения понятий онтологии, наиболее близких к запросу пользователя. В качестве метрики применена косинусная близость векторных представлений вопроса пользователя и лексического значения понятия. Для получения таких представлений использовался кодировщик *BERT*. Были получены оценки семантической близости между запросом пользователя и всеми понятиями онтологии. В качестве выходных были выбраны три понятия, имеющие наибольшую близость: «ОП содержания» (*ContentOntologyDesignPattern*), «Когнитивный фрейм» (*CognitiveFrame*) и «Составной ОП содержания» (*CompositeOntologyDesignPattern*).

Второй этап формирования контекста запроса включает извлечение фрагмента онтологии, относящегося к выбранным понятиям. Для этого из онтологии извлекаются логические выражения (*OWL* аксиомы), которые имеют в левых частях данные понятия. Например, для понятия *CompositeOntologyDesignPattern* такими *OWL* аксиомами являются:

CompositeOntologyDesignPattern *SubClassOf* ***ContentOntologyDesignPattern***
CompositeOntologyDesignPattern *EquivalentTo* ***ContentOntologyDesignPattern*** *and (has_part some* ***ContentOntologyDesignPattern****)*

Далее производится конвертация найденных *OWL* аксиом в ЕЯ предложения с помощью лексического представления онтологии, которое содержит ЕЯ наименования понятий и отношений, а также их формы. Данный процесс рассматривается на примере *OWL* аксиомы:

CompositeOntologyDesignPattern *equivalentTo* ***ContentOntologyDesignPattern*** *and (has_part some* ***ContentOntologyDesignPattern****)*

Понятия *CompositeOntologyDesignPattern, ContentOntologyDesignPattern* используются в данной аксиоме, как носитель и значение свойства *has_part*, лексическое представление которого предписывает использовать для них соответственно формы именительного {*case: NOM*} и винительного {*case: ACC*} падежей (рисунок 1), т.е. «Составной ОП содержания» и «ОП содержания». Свойство *has_part* имеет наименование «содержит». Таким образом, ЕЯ предложение для рассматриваемой аксиомы имеет вид:

Составной ОП содержит ОП содержания

Подобным образом с использованием лексического представления для свойства *subClassOf* (рисунок 3) производится конвертация *SubClassOf* аксиом, используемых для определения иерархии наследования.

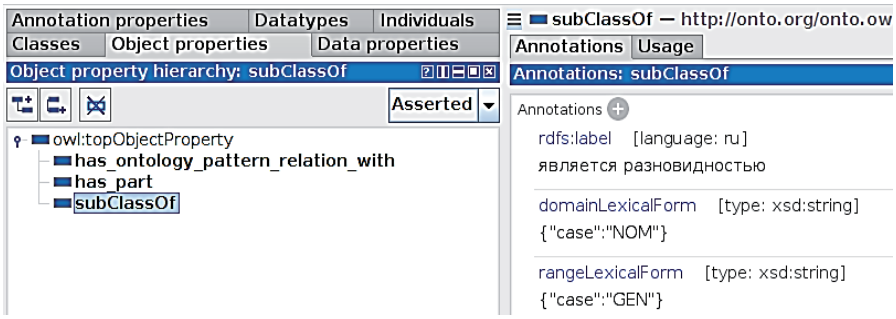


Рисунок 3 - Фрагмент онтологии с лексическим представлением отношения наследования (*subClassOf*)

Например, для *OWL* аксиомы:

CompositeOntologyDesignPattern *SubClassOf* ***ContentOntologyDesignPattern***

соответствующее ЕЯ предложение имеет вид:

Составной ОП содержания является разновидностью ОП содержания

Полученные таким образом ЕЯ предложения добавляются в контекст запроса наряду с лексическими значениями понятий, представленный в виде *rdfs:comment* аннотаций в онтологии. Итоговый промпт для БЯМ, включающий вопрос и его контекст, имеет вид:

Ответь на вопрос только с помощью указанного контекста: *Вопрос:* Как отношения между ОП используются для формирования КФ? *Контекст:* «ОП содержания (*Content ontology design patterns, CDP*) описывает вариант представления знаний ПрО в виде фрагментов онтологий, т.е. нескольких классов онтологии, связанных отношениями. Для каждого паттерна содержания задаётся обобщённое определение ситуации (*General Use Case, GUC*), в которой необходимо его применять. Например, участие в событии, исполнение роли, наличие частей у объекта и другие… ОП содержания является разновидностью ОП проектирования. Составной ОП содержания является разновидностью ОП содержания. Составной ОП содержания содержит ОП содержания».

Были получены следующие ответы, имеющие примерно одинаковое значение ШКБ (т.е. формально они одинаковые с точки зрения близости к правильному ответу):

Ответ 1. ШКБ= 0.100. Отношения между ОП используются для формирования КФ следующим образом:

На основе одного или нескольких ОП содержания, которые представляют варианты представления знаний ПрО в виде фрагментов онтологий, формируются КФ. Эти КФ визуализируют фрагменты онтологии и передают экспертам знания о понятиях, включая их содержание и визуальные образы. КФ могут быть сформированы как из простых ОП содержания, так и из составных, которые представляют комбинации паттернов для решения более сложных задач представления знаний.

Ответ 2. ШКБ= 0.103. Отношения между ОП используются для формирования КФ следующим образом:

1. ОП содержания (*CDP*) представляют варианты представления знаний в виде фрагментов онтологий. Эти фрагменты состоят из классов онтологии, связанных отношениями.

2. Для каждого паттерна содержания задаётся обобщённое определение ситуации (*GUC*), которая определяет контекст использования данного паттерна.

3. На основе этих определений ситуаций задаются квалификационные вопросы, которые могут быть преобразованы в запросы к онтологии. Ответы на эти вопросы гарантированно будут получены при реализации соответствующих паттернов…

6. Составные ОП содержания представляют собой комбинации ОП для решения сложных задач представления знаний. Они содержат один или несколько паттернов содержания.

Полученные варианты ответов абстрактны и не содержат ожидаемую информацию, обозначенную в приведённом правильном ответе. Для выяснения причины можно проверить, достаточно ли в онтологии информации о понятиях, используемых в пользовательском запросе. Сделать это проще, чем в случае использования векторной БД, ввиду того, что в онтологии информация о ПрО распределена по её элементам (классам, экземплярам, свойствам и др.), которые образуют интуитивно понятную эксперту систему.

Для понятия *CompositeOntologyDesignPattern* (Составной ОП содержания) нет упоминания о его связи с отношениями ни в его ЕЯ определении, ни в *OWL* аксиомах (рисунок 1). Для включения отсутствующей информации в контекст запроса необходимо добавить её в онтологию в виде аксиом, формально определяющих понятие «Отношение между ОП содержания», или дополнить ею ЕЯ определение.

Воспользовавшись вторым способом (ввиду его относительной простоты), можно вставить соответствующий текстовый фрагмент (рисунок 4).

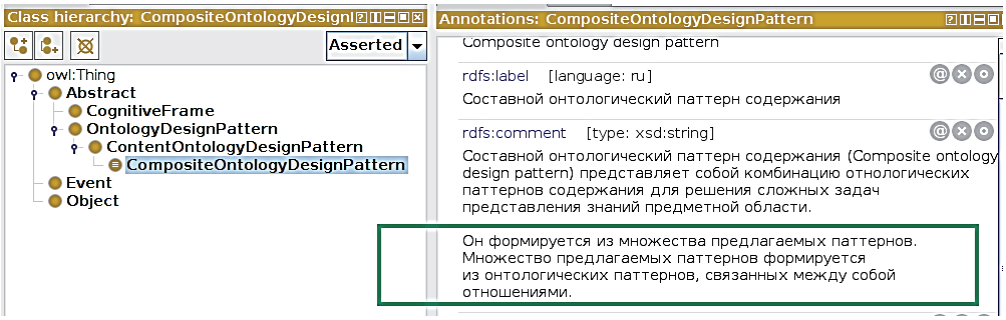


Рисунок 4 - Расширенное определение понятия «Составной онтологический паттерн содержания» (CompositeOntologyDesignPattern)

Упоминание отношений попадает в контекст запроса, и БЯМ даёт следующий ответ:

Отношения между ОП используются для формирования составных ОП содержания, которые в свою очередь служат основой для создания КФ. КФ представляют собой визуализированные фрагменты онтологии, передающие знания о понятиях. Они включают в себя содержание, сформированное на основе отношений «понятие-отношение-понятие», и визуальный образ. Таким образом, отношения между ОП играют ключевую роль в структурировании и представлении знаний в форме КФ.

ШКБ данного ответа составляет 0.24, что превышает оценки полученных ранее ответов в два раза и свидетельствует о том, что данный ответ уже в большей степени соответствует правильному. Если его рассмотреть содержательно, то можно обнаружить, что его первое предложение включает ожидаемый ответ: «Отношения позволяют получить составной ОП, на основе которого можно построить КФ».

Заключение

В работе предложен подход к применению технологии *RAG*, ориентированной на построение контекста для пользовательского запроса к БЯМ на основе онтологии ПрО вместо векторной БД. Рассмотрено лексическое представление понятийной системы онтологии, поз-

воляющее интерпретировать её фрагменты в виде ЕЯ текстов. Это обеспечивает возможность формирования из них контекста пользовательского запроса с целью предоставления БЯМ данных для генерации ответа.

За счёт использования онтологии обеспечивается больший контроль над получаемым контекстом, чем в случае использования векторной БД, т.к. его содержимое определяется элементами понятийной системы онтологии и их лексическим представлением, которые могут быть изменены экспертом ПрО.

Предложенный подход может быть использован для отладки онтологии экспертом ПрО, незнакомым со специализированными языками запросов и приёмами онтологического моделирования, т.к. позволяет опрашивать онтологию с помощью ЕЯ вопросов с целью выявления в ней пробелов и неточностей.

Список источников

[1] ***Zhao Z., Zhouю K., Li J., Tang T.*** A Survey of Large Language Models. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2303.18223.

[2] ***Minaee S., Mikolov T., Nikzad N.*** Large Language Models: A Survey. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.06196.

[3] ***Li Z., Peng J., Wang Y.*** ChatSOP: An SOP-Guided MCTS Planning Framework for Controllable LLM Dialogue Agents. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2407.03884.

[4] ***Roller S.E., Dinan E., Goyal N.*** Recipes for building an open-domain chatbot. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2004.13637.

[5] ***Zhang H., Li W.W., Chen R.L.*** LLM-Enhanced Dialogue Management for Full-Duplex Spoken Dialogue Systems. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2502.14145.

[6] ***Lewis P., Perez E., Piktus A.*** Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2502.14145.

[7] ***Sia S., Duh K.*** In-context Learning as Maintaining Coherency: A Study of On-the-fly Machine Translation Using Large Language Models. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.03573.

[8] ***Arslan M., Ghanem H., Munawar S.*** A Survey on RAG with LLMs. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol.246. P.3781–3790. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.178.

[9] ***Guu K., Lee K.*** REALM: Retrieval-augmented language model pre-training. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2002.08909.

[10] ***Liu R., Jia Z., Bao F.*** Retrieval-Augmented Dialogue Knowledge Aggregation for expressive conversational speech synthesis. *Information Fusion*. 2025. Vol.118. P.102948. DOI: 10.48550/arXiv.2501.06467.

[11] ***Peng B., Zhu Y., Liu Y.*** Graph retrieval-augmented generation: a survey. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.08921.

[12] ***Yasunaga M., Ren H., Bosselut A.*** QA-GNN: Reasoning with language models and knowledge graphs for question answering. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2104.06378.

[13] ***Taunk D., Khanna L., Kandru P.*** GrapeQA: GRraph augmentation and pruning to enhance question-answering. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.12320.

[14] ***Zhang J., Zhang X., Yu J.*** Subgraph retrieval enhanced model for multi-hop knowledge base question answering // Proceedings of the 60th annual meeting of the association for computational linguistics (volume 1: Long papers). *Association for Computational Linguistics*, 2022. DOI: 10.18653/v1/2022.acl-long.396.

[15] ***Mavromatis C., Karypis G.*** GNN-RAG: Graph neural retrieval for large language model reasoning. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.20139.

[16] ***Боровик С.Ю.*** Онтологии, интерсубъективное управление и эвергетика В.А. Виттиха. *Онтология проектирования*. 2020. Том 10, №3. С.255–272. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-255-272.

[17] ***Guarino N., Oberle D., Staab S.*** What is an ontology? // Handbook on ontologies. Springer, 2009. P.1–17. DOI: 10.1007/978-3-540-92673-3_0.

[18] ***Ломов П.А.*** Формирование лексического модуля прикладной онтологии для её обучения. *Онтология проектирования*. 2024. Том 13, №4. С.520–530. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-520-530.

[19] ***Ломов П.А.*** Автоматизация синтеза составных онтологических паттернов содержания. *Онтология проектирования*. 2016. Том 6, №2. С.162–172. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-162-172.

[20] ***Ломов П.А., Шишаев М.Г.*** Формирование когнитивных фреймов на основе онтологических паттернов для визуализации онтологий. *Информационные системы и технологии*. 2015. №6. С.12–22.

[21] ***Reimers N., Gurevych I.*** Sentence-BERT: Sentence embeddings using siamese BERT-networks. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1908.10084.
[22] ***Peters M.E., Neumann M., Iyyer M.*** Deep contextualized word representations. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1802.05365.
[23] ***Zmitrovich D., Abramov A., Kalmykov A.*** A family of pretrained transformer language models for russian. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2309.10931.

Сведения об авторе

Ломов Павел Андреевич, 1984 г. рождения, к.т.н., старший научный сотрудник Института информатики и математического моделирования имени В.А. Путилова Кольского научного центра РАН. Области научных интересов: представление знаний, онтологическое моделирование, семантическая сеть. AuthorID (РИНЦ): 8479-8320. Author ID (Scopus): 55350587100; ORCID: 0000-0002-0924-0188; Researcher ID (WoS): P-6627-2015. *palandlom@yandex.ru*.

Поступила в редакцию 02.02.2025, после рецензирования 10.03.2025. Принята к публикации 20.03.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-239-248

Using ontologies to contextualize queries to large language models

© 2025, P.A. Lomov

Kola Science Centre of the Russian Academy of Science,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling named after V.A. Putilov, Apatity, Russia

Abstract

The use of large language models has become a common phenomenon in question-answering and dialog systems. For this, the model must be pre-trained on prepared text data, enabling it to generate highly probable correct responses in a dialog with the user. However, answer quality decreases when the questions pertain to objects, processes, or phenomena that are less described in the texts used to train the model. For this purpose, data that is new to the model is transferred to it along with the user query in the form of context, which is usually generated using a vector database of text fragments. The article proposes to use an ontology of a subject area as a source of contextual data instead of a vector database. Ontologies are supplied with a lexical representation of their formalized terminology system to identify an ontological fragment relevant to the user query and convert it into a natural language text of the formed context. This allows to reduce the response text volume while improving its semantic alignment with the user query. The article discusses the minimum structural requirements for the lexical representation of an ontology, including natural language names, their forms for concepts and relations, as well as their lexical meanings. The application of the proposed approach is shown through an example of obtaining an answer to a question on scientific articles using a large language model. The advantages and disadvantages of the proposed approach are discussed.

Keywords: *ontology, large language model, query, context, response generation*.

For citation: *Lomov PA*. Using ontologies to contextualize queries to large language models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 239-248. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-239-248.

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

List of figures

Figure 1 - Lexical representation of the ontology concept “Composite ontology design pattern”
Figure 2 - Lexical representation of the “has part” relation
Figure 3 - Lexical representation of the inheritance relation (subClassOf)
Figure 4 - Extended definition of the ontology concept “Composite ontology design pattern”

References

[1] ***Zhao Z, Zhouyu K, Li J, Tang T.*** A Survey of Large Language Models. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2303.18223.

[2] ***Minaee S, Mikolov T, Nikzad N.*** Large Language Models: A Survey. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.06196.

[3] ***Li Z, Peng J, Wang Y.*** ChatSOP: An SOP-Guided MCTS Planning Framework for Controllable LLM Dialogue Agents. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2407.03884.

[4] ***Roller SE, Dinan E, Goyal N.*** Recipes for building an open-domain chatbot. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2004.13637.

[5] ***Zhang H, Li WW, Chen RL.*** LLM-Enhanced Dialogue Management for Full-Duplex Spoken Dialogue Systems. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2502.14145.

[6] ***Lewis P, Perez E, Piktus A.*** Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2502.14145.

[7] ***Sia S, Duh K.*** In-context Learning as Maintaining Coherency: A Study of On-the-fly Machine Translation Using Large Language Models. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.03573.

[8] ***Arslan M, Ghanem H, Munawar S.*** A Survey on RAG with LLMs // *Procedia Computer Science*. 2024; 246: 3781–3790. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.178.

[9] ***Guu K, Lee K.*** REALM: Retrieval-augmented language model pre-training. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2002.08909.

[10] ***Liu R, Jia Z, Bao F.*** Retrieval-Augmented Dialogue Knowledge Aggregation for expressive conversational speech synthesis // *Information Fusion*. 2025; 118: 102948. DOI: 10.48550/arXiv.2501.06467.

[11] ***Peng B, Zhu Y, Liu Y.*** Graph retrieval-augmented generation: a survey. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.08921.

[12] ***Yasunaga M, Ren H, Bosselut A.*** QA-GNN: Reasoning with language models and knowledge graphs for question answering. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2104.06378.

[13] ***Taunk D, Khanna L, Kandru P.*** GrapeQA: GRaph augmentation and pruning to enhance question-answering. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.12320.

[14] ***Zhang J, Zhang X, Yu J.*** Subgraph retrieval enhanced model for multi-hop knowledge base question answering // Proceedings of the 60th annual meeting of the association for computational linguistics (volume 1: Long papers). Association for Computational Linguistics, 2022. DOI: 10.18653/v1/2022.acl-long.396.

[15] ***Mavromatis C, Karypis G.*** GNN-RAG: Graph neural retrieval for large language model reasoning. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.20139.

[16] ***Borovik SY.*** Ontologies, Intersubjective Control and V.A. Vittikh Evergetics [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(3): 255–272. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-255-272.

[17] ***Guarino N, Oberle D, Staab S.*** What is an ontology? // Handbook on ontologies. Springer, 2009. P.1–17. DOI: 10.1007/978-3-540-92673-3_0.

[18] ***Lomov PA.*** Formation of the Lexical Module of Applied Ontology for Its Learning [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 13(4): 520–530. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-520-530.

[19] ***Lomov PA.*** Automation of Synthesis of Composite Ontological Content Patterns [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 20(6): 162–172. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-162-172.

[20] ***Lomov PA, Shishaev MG***. Formation of Cognitive Frames Based on Ontological Patterns for Ontology Visualization [In Russian]. *Information Systems and Technologies*. 2015; 6: 12–22.

[21] ***Reimers N, Gurevych I.*** Sentence-BERT: Sentence embeddings using siamese BERT-networks. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1908.10084.

[22] ***Peters ME, Neumann M, Iyyer M.*** Deep contextualized word representations. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1802.05365.

[23] ***Zmitrovich D, Abramov A, Kalmykov A.*** A family of pretrained transformer language models for Russian. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2309.10931.

About the author

Pavel Andreevich Lomov (b.1984), PhD, a senior researcher at the Institute for Informatics and Mathematical Modeling named after V.A. Putilov – Subdivision of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Research interests: knowledge representation, ontological modeling, semantic web. AuthorID (RSCI): 8479-8320. Author ID (Scopus): 55350587100; ORCID: 0000-0002-0924-0188; Researcher ID (WoS): P-6627-2015. *palandlom@yandex.ru.*

Received February 2, 2025, Revised March 10, 2025. Accepted March 20, 2025.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.023:9 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261

Метод упорядочения альтернатив на основе заданных норм

© 2025, С.В. Микони

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

Аннотация

Для формирования облика проектируемого изделия привлекаются лучшие образцы в данной предметной области. Выбор прототипа изделия осуществляется методами многомерной оптимизации на основе критериев и теории ценности / полезности. В работе предлагается использовать двунаправленные (двусторонние) требования к значениям показателей, которые реализуются моделью нормы. Процедура оценивания показателей, основанная на отношениях превосходства на конечном множестве альтернатив, предваряется анализом показателей на соответствие норме. Появляется возможность упорядочения объектов по величине отклонения от нормы по обе стороны от её границ. Для сопоставления результатов упорядочения объектов относительно нормы и односторонних требований к значениям показателей выполнено экспериментальное исследование в системе выбора и ранжирования. В качестве объектов оценивания рассматривались беспилотные летательные аппараты. Однонаправленные требования к значениям показателей моделировались линейными и логистическими функциями. Двунаправленные требования к значениям показателей моделировались логистическими функциями фронтов модели нормы. Эксперименты показали различие результатов, получаемых на основе односторонних и двусторонних требований. Различие полученных рейтингов беспилотных летательных аппаратов оценивалось коэффициентом ранговой корреляции по Кендаллу. Полученные результаты указывает на новизну предлагаемого метода упорядочения объектов относительно нормы, который может быть востребован для выбора прототипа проектируемого изделия и варианта существующего объекта, отвечающего требованиям нормы к значениям показателей.

Ключевые слова: *показатель, класс, норма, принадлежность классу, упорядочение, рейтинг.*

Цитирование: *Микони С.В.* Метод упорядочения альтернатив на основе заданных норм. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.249-261. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261.

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Памяти ***Сергея Сергеевича Семёнова*** *– инициатора исследований прототипов беспилотных летательных аппаратов на стадии проектирования*

Введение

На этапах проектирования и применения технических систем востребован поиск лучшего варианта. Разработке методов оценки качества и технического уровня сложных технических систем на всех этапах жизненного цикла посвящены книги С.С. Семёнова [1-3]. Оригинальный метод оценки с учётом полного жизненного цикла был опубликован в [4]. Начиная с 2010 года С.С. Семёнов проводил исследования в области создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов (БЛА), в которых рассматривались

вопросы формирования состава показателей, подлежащих оцениванию, поиска информации об их значениях для разных типов БЛА, выбора критериев, оценочных функций и весов показателей [5-14]. Эти работы позволяют принимать взвешенные решения при формировании облика проектируемых БЛА.

В качестве исходных данных для выбора варианта облика предлагалось использовать существующие образцы БЛА. При выборе наилучшего варианта образцы БЛА сопоставляются *между собой* по значениям характеризующих их показателей, отвечающих отношениям превосходства [15, 16]: $y_j \le c_j$, ограничение сверху (не более c_j); $y_j \ge c_j$, ограничение снизу (не менее c_j), где y_j – проектное, а c_j – целевое значение j-го показателя БЛА, $j = \overline{1,n}$. Ранжирование образцов БЛА выполняется по результатам решения задачи многокритериальной оптимизации [17]. Количество критериев определяется числом n >1 оцениваемых показателей. В качестве целевого значения c_j оптимизируемого j-го показателя принимается одна из границ шкалы $[y_{j\,\min}, y_{j\,\max}]$:

$c_j = y_{j\,\min}$ – при ***минимизации*** j-го показателя,

$c_j = y_{j\,\max}$ – при ***максимизации*** j-го показателя.

Облик проектируемого БЛА должен быть сбалансирован относительно граничных значений показателей, которые не всегда могут быть целевыми. Альтернативой им может быть используемое на практике понятие нормы [18, 19], которое можно распространить на перспективные значения показателей (норма меняется вместе с техническим прогрессом).

В данной работе предлагается использовать понятие нормы для выбора значений показателей перспективных вариантов БЛА. Для исследования методов упорядочения БЛА использована инструментальная системы выбора и ранжирования СВИРЬ-М [20].

1 Соотношение цели и нормы

Любая активная система чередует либо совмещает процессы *сохранения* и *улучшения* своего состояния. Для улучшения состояния она руководствуется *целью*, а достигнутое состояние принимается за *норму*, которой придерживаются в заданном промежутке времени. Таким образом, на содержательном уровне цель и норма связываются процессами *сохранения* и *улучшения* системой своего состояния. Цель – это то, что надо достигать, а норма – это то, что надо сохранять. Процессы *сохранения* и *улучшения* состояния отражают противоположные свойства *стабильности* и *развития* системы.

Формальные модели этих процессов выражаются через предикаты первого порядка на шкале оцениваемого показателя объекта x. Жёсткая цель представляется предикатом $y(x) \to \max$ (min), а мягкая цель – предикатом $y(x) \ge c$ ($y(x) \le c$) или словесно – значение y должно быть не менее (не более) значения c.

Норма формализуется предикатом принадлежности интервалу значений шкалы показателя: $y(x) \in [c_1, c_2]$. При равной важности всех значений показателя в интервале $[c_1, c_2]$ принадлежность ему выражается через совмещение двух мягких целей: $c_1 \le y \le c_2$ или в раздельной записи: $(y \ge c_1)$ & $(y \le c_2)$.

Если в интервале выделена наиболее значимая точка, например $c = (c_1 + c_2)/2$, то норма сводится к достижению двух противоположных жёстких целей: $y(x) \to \max$, если $y(x) < c_1$ и $y(x) \to \min$, если $y(x) > c_2$. Таким образом, содержательные связи между свойствами *стабильности* и *развития* системы формализуются логической связью между их моделями.

Жёсткие границы интервала $[c_1, c_2]$ следует рассматривать как частный случай отсутствия размытости границ. В общем случае границы нормы являются размытыми, что расши-

ряет интервал до допустимых и предельных границ нормы. Достижение показателем предельной границы угрожает существованию объекта x.

Допустимые и предельные границы нормы выражаются соответственно через интервалы $[c_{\text{дом}}, c_{\text{доб}}]$ и $[c_{\text{пом}}, c_{\text{поб}}]$, где индексами дом (пом) и доб (поб) обозначаются допустимые (д) и предельные (п) отклонения (о) от границ нормы в сторону меньших (м) и больших (б) значений показателя. Расширению границ нормы соответствуют отношения вхождения интервалов: $[c_1, c_2] \subseteq [c_{\text{дом}}, c_{\text{доб}}] \subseteq [c_{\text{пом}}, c_{\text{поб}}]$.

2 Модели нормы и решаемые задачи

Интервалы $[c_{\text{пом}}, c_1)$ и $(c_2, c_{\text{поб}}]$ представляют отрезки шкалы показателя, отражающие отклонения его значения в меньшую и большую сторону от нормы. Если принять интервал $[c_1, c_2]$ за модель нормы (Н), то интервалу $[c_{\text{пом}}, c_1)$ ставится в соответствие класс «Меньше нормы» (МН), а интервалу $(c_2, c_{\text{поб}}]$ – класс «Больше нормы» (БН). Этим формулируется задача классификации объекта x по оцениваемому показателю на три класса: Н, МН и БН. Границы допустимых отклонений от нормы могут быть использованы как центры области размытости между соседними классами. Примеры нелинейных функций принадлежности классам Н, МН и БН приведены в [21]. Принадлежность объекта каждому из этих классов по многим показателям вычисляется как их средневзвешенная свёртка.

Принадлежность значения показателя классам МН и БН рассматривается в задачах наблюдения состояния объекта и его управления. Моделирование *развития* объекта по многим показателям приводит к усложнению классификационной модели в направлении учёта показателей, требующих улучшения. В связи с этим для представления отношения нежелательности / желательности отклонения в [21] введены два дополнительных класса «Хуже нормы» (ХН) и «Лучше нормы» (ЛН). Нежелательность отклонения значения нейтрального показателя в любую сторону от границ нормы выражается через делегирование принадлежностей классам МН и БН в класс ХН. Элементы класса ЛН формируются из принадлежностей классу БН для максимизируемых показателей и из принадлежностей классу МН для минимизируемых показателей.

Результатом вычисления принадлежности объекта классам по многим показателям является вектор $\boldsymbol{\mu}(x) = (\mu_{\text{н}}(x), \mu_{\text{хн}}(x), \mu_{\text{лн}}(x))$, $(\mu_{\text{н}}(x) + \mu_{\text{хн}}(x) + \mu_{\text{лн}}(x)) = 1$. Компоненты вектора отражают состояние объекта через постоянство, ухудшение и улучшение его свойств.

Качество состояния оценивается через соотношение таких свойств, как стабильность, риск и развитие. В отсутствие отклонений от нормы $\mu_{\text{н}}(x) \to 1$, что означает отсутствие как риска, так и развития. Представляет интерес соотношение $\mu_{\text{н}}(x)$ и $\mu_{\text{лн}}(x)$, как долей единицы при $\mu_{\text{хн}}(x) \to 0$. Соотношение $\mu_{\text{н}}(x) > \mu_{\text{лн}}(x)$ характеризует превосходство стабильности над развитием, а $\mu_{\text{н}}(x) < \mu_{\text{лн}}(x)$ отражает обратную тенденцию.

В задаче сопоставления объектов по принадлежности одному из классов выполняется их упорядочение по величине функции принадлежности этому классу. Для получения линейного порядка на множестве объектов по принадлежности всем классам требуется преобразование векторных оценок в скалярные (числовые) оценки, которые называются индикаторами состояния (ИС) объекта [21]. Они вычисляются суммированием оценочных функций, образуемых на основе критериев: $\mu_{\text{Н}}(x) \to \max$, $\mu_{\text{ЛН}}(x) \to \max$, $\mu_{\text{ХН}}(x) \to \min$. Важность оценочных функций задаётся вектором весов: $\mathbf{w} = (w(\mu_{\text{Н}}(x)); w(\mu_{\text{ЛН}}(x)); w(\mu_{\text{ХН}}(x)))$.

В отсутствие информации об их важности $w(\mu_{\text{Н}}(x)) = w(\mu_{\text{ЛН}}(x)) = w(\mu_{\text{ХН}}(x)) = 1/3$.

Если на основе статистики установлены границы уровней качества на шкале [0, 1] ИС, то существует возможность по значению ИС определить уровень качества объекта x. Для сопоставления объектов по их ИС в задаче с оптимизируемыми показателями веса всех классов

должны быть ненулевыми. Для сопоставления объектов по одному из классов веса остальных классов задаются нулевыми.

Таким образом, задача упорядочения объектов по результатам классификации решается в следующей последовательности.

1) задаются шкалы и нормы количественных показателей.
2) задаются важности (веса) показателей.
3) выполняется классификация каждого объекта относительно нормы.
4) задаются важности (веса) классов.
5) вычисляется ИС объекта.
6) выполняется упорядочение объектов по ИС.
7) по результатам упорядочения выбирается предпочтительный объект.
8) для оценивания отклонений от нормы объекты упорядочиваются относительно соответствующих классов.

3 Сопоставление методов упорядочения беспилотных летательных аппаратов

Свойства метода упорядочения объектов по заданным нормам могут быть определены в сопоставлении с методами упорядочения с использованием многокритериальной и многомерной оптимизация объектов по ценности. Для проведения экспериментов по упорядочению БЛА разными методами принят минимальный набор наиболее значимых показателей.

3.1 Характеристики беспилотных летательных аппаратов

В эксперименте приняты характеристики БЛА, приведённые в таблице 1 [13]:
$M_{ВЗЛ}$ – взлётная масса БЛА (кг);
$M_{БН}$ – масса боевой нагрузки (кг);
$D_П$ – дальность полёта (км);
$T_П$ – продолжительность полёта (км);
$H_П$ – высота полёта (м);
V_{max} – максимальная скорость полёта (км/ч);
n – количество точек подвески УР, УАБ (ед.);
$C_{БЛА}$ – стоимость БЛА (млн. долл.).
Символом * в таблице помечены экспертные оценки показателей.

Таблица 1 - Характеристики разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов с взлётной массой 0,3-2,0 т. [13]

N	БЛА	Страна	$M_{ВЗЛ}$	$M_{БН}$	$D_П$	$T_П$	$H_П$	V_{max}	*n*	$C_{БЛА}$
1	Форпост-М	Россия	454	100	500	17,5	5000	200	2	7,5
2	Дозор-600	Россия	640	220	3700	30	7500	210	2	6
3	Байрактар ТВ2	Турция	650	150	300	24	7000	220	4	8
4	**Гермес 900**	Израиль	1180	350	4000	36	9145	220	2*	12*
5	**Орион-1 (Э)**	Россия	1200	200	600	24	8000	200	2	6
6	**Импакт 1300**	Израиль	1300	400	1500	30	9000	250	2*	9*
7	**CH-4B**	Китай	1350	345	1600	14	7000	250	4	4
8	**Вин Лун-1D**	Китай	1500	400	2000	35	7500	280	4	8*
9	**MQ-1C Грэй Игл**	США	1634	478	8000	36	8840	280	4	17*
10	**Рустом-2**	Индия	1800	350	900	24	10660	300	2	10

Функциональность БЛА характеризуется скоростью, высотой и продолжительностью полёта. Продолжительность полёта косвенно характеризует энергоёмкость БЛА. Она оценивается затратами электроэнергии либо топлива на дальность полёта.

Взлётная масса является классификационным показателем, который в значительной степени определяет массу полезной нагрузки БЛА. Если по значению классификационного показателя два БЛА различаются в два и более раз, они принадлежат разным категориям [14]. Согласно этому условию первые три БЛА по взлётной массе не сопоставимы с остальными БЛА, выделенными (полужирный шрифт в таблице 1) в оцениваемую группу.

3.2 Модель многомерного оценивания беспилотных летательных аппаратов

Показатели БЛА разделены на группы: экономические и характеристики. Для сопоставления разных методов упорядочения БЛА можно ограничиться показателями группы характеристики, которые разделены на четыре подгруппы: тактическая, техническая, боевая, выживаемость. В тактическую подгруппу включены дальность и продолжительность полёта, в техническую – взлётная масса и масса боевой нагрузки, в боевую – количество точек подвески, в подгруппу выживаемость – максимальная скорость и высота полёта.

Методы упорядочения БЛА различаются требованиями, предъявляемыми к значениям показателей.

- Для метода многокритериальной оптимизации предъявляется требование максимизации значений $y_j \to \max$, которое моделируется линейной оценочной функцией (ОцФ), возрастающей на шкале $[y_{j\,\min}, y_{j\,\max}]$.
- В качестве ОцФ для многомерной оптимизации БЛА приемлема логистическая ОцФ. Одним из её параметров является точка перегиба c_j. Для сопоставимости с методом упорядочения по принадлежности классам рассматриваются два варианта задания значения c_j, связанного с границами нормы:
  - по среднему значению нормы $c_{j1} = (c_{j\,н} + c_{j\,в})/2$;
  - по среднему значению переднего фронта классу Н $c_{j2} = (c_{дом,j} + c_{j\,н})/2$.
- Для упорядочения БЛА по принадлежности классам требуется вычисление ИС БЛА [21]. Все оцениваемые показатели оптимизируемы, причём $\mu_{лн}(y_j) = \mu_{бн}(y_j)$. Вычисление ИС по принадлежности одному классу осуществляется путём назначения единицы этому классу в векторе весов и нулю – остальным классам. Например, для вычисления ИС по классу Н вектор весов $\mathbf{w} = (w(\mu_{Н}(x)); w(\mu_{ЛН}(x)); w(\mu_{ХН}(x)))$ кодируется как $\mathbf{w} = (1, 0, 0)$.

Для создания модели многомерной оптимизации БЛА по отклонению от норм помимо границ шкал показателей БЛА задаются границы норм и допустимых отклонений от норм в меньшую и большую стороны от границ норм (см. таблицу 2).

В таблице 2 приняты следующие обозначения:
МинГШ (МаксГШ) – минимальная (максимальная) граница шкалы показателя;
НГК (ВГК) Норма – нижняя (верхняя) граница нормы на шкале показателя;
ДОМ (ДОБ) – допустимое отклонение в меньшую (большую) сторону от границы нормы.

Таблица 2 - Границы шкал и норм показателей беспилотных летательных аппаратов

	$D_П$	$М_{БН}$	ПН	n	V_{max}	$H_П$	$C_{БЛА}$
МинГШ	300	14	0,16	0	200	5000	4
МаксГШ	8000	36	0,35	4	300	10660	17
НГК Норма	950	20	0,29	1,9	245	6900	6,8
ВГК Норма	1050	22	0,31	2,1	255	7100	7,2
ДОМ	900	18	0,28	1,5	240	6800	6,5
ДОБ	1100	24	0,32	2,5	260	7200	7,5

Представляют интерес два варианта параметров нормы: среднее значение нормы (СН) и среднее значение расплывчатости нормы (СРН). Модель нормы содержит двусторонние требования к значению показателя.

Для оценивания степени различия / сходства рейтингов БЛА, получаемых разными методами, использованы два показателя: показатель изменения порядка мест $D(A, B)$ в рейтинге

B по сравнению с *A* и показатель сходства рейтингов – коэффициент ранговой корреляции Кендалла *r*(*A*, *B*) [22].

Показатель изменения порядка мест *D*(*A*, *B*) измеряется в шкале [0, 1]. Значению 0 соответствует полное сходство порядков *A* и *B*, а значению 1 – их обратный порядок. Значение 0,5 означает безразличие порядков *A* и *B*. Показатель *r*(*A*, *B*) отражает сходство рейтингов *A* и *B*, представляемое коэффициентом ранговой корреляции с шкалой [–1, 1][1]. Значению 1 соответствует полное сходство рейтингов *A* и *B*, а значению –1 – их обратный порядок. Значение 0 означает отсутствие взаимосвязи между *A* и *B*.

4 Примеры упорядочения беспилотных летательных аппаратов

На рисунке 1 показан граф Парето-доминирования на множестве номеров[2] оцениваемых БЛА {4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}. Множество Парето-недоминируемых альтернатив представлено БЛА Гермес 900 (4), Импакт 1300 (6), MQ-1C Грэй Игл (9), Рустом-2 (10). Любой из них является кандидатом на лучший объект, для выбора которого необходимо привлечь дополнительную информацию, в качестве которой использована важность (вес) оцениваемого показателя. В отсутствие экспертных предпочтений веса показателей приняты равноценными.

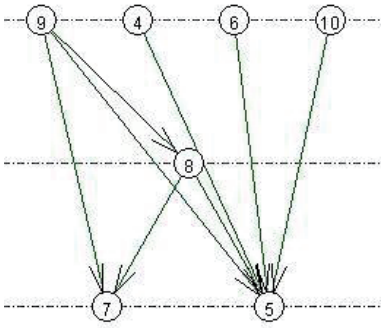


Рисунок 1 – Граф Парето-доминирования

В таблице 3 приведены веса составных и первичных показателей. Равноценные веса четырёх составных показателей (выделены полужирным шрифтом) рассчитываются, исходя из их числа: ¼ = 0,25. Веса первичных показателей определяются их числом в подгруппе.

Таблица 3 – Веса составных и первичных показателей беспилотных летательных аппаратов

Показатель	Вес в подгруппе	Вес в иерархии
Характеристика БЛА	**1,00**	**1,000**
Тактический	**0,25**	**0,250**
Дальность полёта $D_П$, км	0,50	0,125
Продолжительность полёта $T_П$, ч	0,50	0,125
Технический	**0,25**	**0,250**
Полезная нагрузка	1,00	0,250
Боевой	**0,25**	**0,250**
Количество точек подвески (УР и УАБ) n, ед.	1,00	0,250
Выживаемость	**0,25**	**0,250**
Макс. скорость полёта $V_{МАКС}$, км/ч	0,50	0,125
Высота полёта $H_П$, м	0,50	0,125

Количественная оценка БЛА по всем показателям рассчитывается как средневзвешенная свёртка их значений.

В таблицах сопоставления рейтингов, полученных разными методами упорядочения (таблицы 4-8), методы именуются типом применяемой ОцФ, сокращённое имя которой приводится в тексте. Цифры в двух левых столбцах таблицы указывают на места, полученные БЛА при оценивании каждым методом, а цифры в правых столбцах таблицы – на различие рангов БЛА, полученных сопоставляемыми методами. Отрицательный знак указывает на повышение места БЛА, а положительный – на его понижение. Нули означают неизменность

[1] Для удобства оба показателя измеряются в процентах.
[2] Нумерация БЛА приведена в таблице 1.

места БЛА при оценивании разными методами. Для сокращения в тексте, помечающем каждый эксперимент сопоставления методов упорядочения БЛА, используются имена ОцФ.

4.1 Линейные и логистические оценочные функции показателей беспилотных летательных аппаратов

Таблица 4 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями Лин и «среднее значение нормы» показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ Лин	ОцФ СН	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	1	0	0,00
Ван Лун-1D	2	2	0	0,00
Гермес-900	3	5	**2**	**33,33**
СН-4В	4	4	0	0,00
Импакт-1300	5	3	-2	**-33,33**
Рустом-2	6	6	0	0,00
Орион-1 (Э)	7	7	0	0,00

За базовую принята модель БЛА с линейными ОцФ Лин. С ней сопоставлена модель с возрастающими логистическими ОцФ показателей с точкой перегиба, равной СН. Например, согласно таблице 2 $c_1(D_п)$ = (950 + 1050)/2=1000. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 4.

Изменение порядка мест БЛА составляет *D*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 14,3%, а сходство рейтингов *r*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 71,4% оценивается как высокое. БЛА Гермес-900 и Импакт-1300 обменялись местами (3-е и 5-е места). Учитывая параметрическую связь логистических ОцФ с нормой, БЛА Импакт-1300 в большей степени соответствует норме.

4.2 Логистические оценочные функции с точками перегиба □среднее значение нормы□ и □среднее значение расплывчатости нормы□

Таблица 5 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями «среднее значение нормы» и «среднее значение расплывчатости нормы» показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ СН	ОцФ СРН	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	1	0	0,00
Ван Лун-1D	2	4	2	**33,33**
Импакт-1300	3	2	-1	**-16,67**
СН-4В	4	6	2	**33,33**
Гермес-900	5	3	-2	**-33,33**
Рустом-2	6	5	-1	**-16,67**
Орион-1 (Э)	7	7	0	0,00

За базовую принята модель БЛА с логистическими ОцФ показателей с точкой перегиба, равной СН. С ней сопоставлена модель с логистическими ОцФ показателей с СРН. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 5.

СН ОцФ равно $c_2(D_п)$ = 1000, а СРН ОцФ равно $c_2(D_п)$ = (900 + 950)/2 = 925. Изменение этого параметра логистической функции повлияло на изменение порядка мест БЛА. Оно определено параметром *D*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 19,3%. Сходство рейтингов *r*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 61,9% оценивается как умеренное. Сдвиг точки перегиба логистических ОцФ с середины нормы на фронт модели нормы оказывает существенное влияние на рейтинг БЛА с изменением их порядка на 19%.

4.3 Линейные оценочные функции показателей беспилотных летательных аппаратов и принадлежность классу Н

За базовую принята модель БЛА с ОцФ Лин. С ней сопоставлена модель с функциями принадлежности классу Н. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 6.

Таблица 6 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями Лин и функциями принадлежности классу Н показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ Лин	Класс Н	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	6	5	**83,33**
Ван Лун-1D	2	7	5	**83,33**
Гермес-900	3	2	-1	**-16,67**
СН-4В	4	4	0	0,00
Импакт-1300	5	1	-4	**-66,67**
Рустом-2	6	5	-1	**-16,67**
Орион-1 (Э)	7	3	-4	**-66,67**

Изменение порядка мест БЛА составляет *D*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 66,67%, а сходство рейтингов *r*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 33,33% оценивается как низкое. Коэффициент изменения порядка *D* = 66,67% отражает слабую обратную связь рейтингов.

4.4 Логистические оценочные функции с точками перегиба «среднее значение нормы» и принадлежность классу Н

Таблица 7 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями «среднее значение нормы» и функциями принадлежности классу Н показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ СН	Класс Н	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	6	5	**83,33**
Ван Лун-1D	2	7	5	**83,33**
Импакт-1300	3	1	-2	**-33,33**
СН-4В	4	4	0	0,00
Гермес-900	5	2	-3	**-50,00**
Рустом-2	6	5	-1	**-16,67**
Орион-1 (Э)	7	3	-4	**-66,67**

За базовую принята модель БЛА с логистическими ОцФ с точками перегиба СН. С ней сопоставлена модель с функциями принадлежности классу Н. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 7.

Изменение порядка мест БЛА составляет *D*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 61,9%, а сходство рейтингов *r*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 21,81% оценивается как низкое. Коэффициент изменения порядка *D* = 61,9% отражает ещё более слабую обратную связь рейтингов в сравнении с применением ОцФ Лин.

4.5 Логистические оценочные функции с точками перегиба «среднее значение расплывчатости нормы» и принадлежность классу Н

Таблица 8 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями «среднее значение расплывчатости нормы» и функциями принадлежности классу Н показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ СРН	Класс Н	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	6	5	**83,33**
Импакт-1300	2	1	-1	**-16,67**
Гермес-900	3	2	-1	**-16,67**
Ван Лун-1D	4	7	3	**50,00**
Рустом-2	5	5	0	0,00
СН-4В	6	4	-2	**-33,33**
Орион-1 (Э)	7	3	-4	**-66,67**

За базовую принята модель БЛА с логистическими ОцФ с точками перегиба СРН. С ней сопоставлена модель с функциями принадлежности классу Н. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 8.

Изменение порядка мест БЛА составляет *D*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 52,38%, а сходство рейтингов *r*(ОцФ Лин, ОцФ СН) 4,76% оценивается как очень низкое. Коэффициент изменения порядка *D* = 52,38% соответствует значению 0,5 в шкале [0, 1]. Это означает практическое отсутствие сходства между сопоставляемыми рейтингами БЛА.

Результаты упорядочения БЛА по принадлежности норме не обязательно согласуются с отношением Парето-доминирования (см. рисунок 2). Если занявший первое место БЛА Импакт-1300 входит во множество Парето, то входящие в него БЛА MQ-1C Грэй Игл (9) и Рустом-2 (10) получили места ниже всеми доминируемого БЛА Орион-1 (5), занявшего 3-е место. Это объясняется ужесточением требований к значениям показателей со стороны нормы.

Выполненные сопоставления рейтингов БЛА, полученных разными методами упорядочения, позволяют сделать вывод о значительном расхождении рейтингов, что объясняется различием требований к значениям показателей.

5 Оценка отклонений беспилотных летательных аппаратов от нормы

Поскольку упорядочение БЛА по принадлежности классу Н выполняется в два этапа, информация, полученная на этапе классификации, может использоваться для оценивания меры отклонений показателей от нормы. В таблице 9 приведена принадлежность БЛА классам по всем показателям. Для упорядочения БЛА по принадлежности классу Н используется класс ХН, суммирующий отклонения в обе стороны от границ нормы. Лучшим считается БЛА, имеющий наименьшее суммарное отклонение от нормы. Таковым является БЛА Импакт-1300 с $\mu_{ХН}$(Импакт-1300) 0,46. Поскольку целевым классом является Н, класс ЛН в этой задаче не учитывается.

Таблица 9 - Принадлежность беспилотных летательных аппаратов классам отклонений

БЛА	Меньше нормы	Норма	Больше нормы	Лучше нормы	Хуже нормы
Гермес-900	0,12	0,37	0,38	0,00	0,50
Орион-1 (Э)	0,42	0,29	0,19	0,00	0,60
Импакт-1300	0,00	0,39	0,46	0,00	**0,46**
СН-4В	0,21	0,25	0,37	0,00	0,58
Ван Лун-1D	0,08	0,00	0,92	0,00	1,00
MQ-1C Грэй Игл	0,00	0,02	0,92	0,00	0,92
Рустом-2	0,15	0,25	0,40	0,00	0,54

Оценка меры отклонений БЛА Импакт-1300 от нормы выполняется по таблице 10, в которой показатели ранжируются по кратности отклонения от ближайшей границы нормы.

Таблица 10 – Показатели беспилотного летательного аппарата Импакт-1300, имеющие отклонение от класса Н

Показатель	Значение	Норма	Отклонение
Дальность полёта $D_П$, км	1500	[950, 1050]	1,43
Продолжительность полёта $T_П$, час	30	[20, 22]	1,36
Высота полёта $H_П$, м	9000	[6900, 7100]	1,27
Масса боевой нагрузки $M_{БН}$, кг	400	[226, 352]	1,13

Наибольшее отклонение имеется по показателю дальности полёта в большую сторону от границы 1050 км. Полуторный запас по этому показателю отражает его избыточность по отношению к потребностям. Это касается и остальных трёх показателей с меньшей долей избыточности. Можно отметить, что в таблице 10 отсутствуют показатели с отклонением в меньшую сторону от заданных норм.

Заключение

В работе упорядочение объектов относительно выполнения односторонних требований к значениям показателей расширено на случай двусторонних требований, выраженных через понятие нормы. Определение отношения соответствия значения показателя норме относится

к задачам классификации. Для учёта отклонений значений показателей от нормы в меньшую или в большую сторону требуется включение в рассмотрение двух дополнительных классов. Принадлежность объекта каждому из этих классов расширяет исходные данные для последующего упорядочения объектов в отношении превосходства. Таким образом, задача упорядочения объектов относительно нормы представляет собой двухэтапную процедуру реализации отношений соответствия и превосходства. Наряду с базовым вариантом упорядочения объектов относительно нормы имеется возможность их ранжирования относительно как каждого типа отклонения, так и в целом на основе вычисления ИС объекта.

По результатам экспериментального сопоставления известных и предложенного методов упорядочения объектов, выполненного в системе выбора и ранжирования СВИРЬ-М на примере семи БЛА, было установлено: отсутствие сходства полученных рейтингов БЛА; рассогласование рангов отдельных БЛА с отношением Парето-доминирования, построенным по односторонним требованиям к значениям показателей.

Список источников

[1] ***Семенов С.С.*** Оценка качества и технического уровня сложных технических систем. Практика применения метода экспертных оценок. М.: Ленанд. 2015. 352 с.

[2] ***Семенов С.С., Щербинин В.В.*** Оценка технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб. М.: Машиностроение. 2015. 326 с.

[3] ***Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В.*** Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: Ленанд, 2016. 520 с.

[4] ***Воронов Е.М. Щербинин В.В., Семенов С.С.*** К оценке технического уровня сложных технических систем с учетом полного жизненного цикла. *Онтология проектирования*. Т.6, №2(20). 2016. С.173-192. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-173-192.

[5] ***Полтавский А.В., Маклаков В.В., Аверкин А.Е., Полохов А.Н., Бородуля В.М., Бурба А.А., Семенов С.С., Седых Ю.И.*** Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. М.: ИПУ РАН. 2010. 102 с.

[6] ***Семенов С.С., Полтавский А.В., Щербинин В.В.*** К определению функций ценности единичных оценочных показателей при оценке технического уровня ударных комплексов беспилотных летательных аппаратов. *Вопросы оборонной техники*. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. 2012. № 5 (257). С.56-63.

[7] ***Семенов С.С., Коваленко И.Л., Полтавский А.В.*** Структура и системы интегральных и единичных оценочных показателей при оценке технического уровня многофункциональных беспилотных летательных аппаратов. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2013. № 2. С.22-27.

[8] ***Семенов С.С., Полтавский А.В.*** Оценка технического уровня комплексов беспилотных летательных аппаратов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского". Сборник докладов. М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2013. С.500-507.

[9] ***Семенов С.С., Полтавский А.В.*** Оценка технического уровня как концептуальный подход к созданию новой конкурентоспособной техники. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции "Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского". Сборник докладов. М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2017. С. 193-213.

[10] ***Полтавский А.В., Семенов С.С., Бурба А.А.*** Информационное моделирование оценки технического уровня сложных технических систем. *Двойные технологии*. 2019. № 4 (89). С.68-75.

[11] ***Крянев А.В., Семенов С.С., Калдаева А.Э.*** Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов. *Надёжность*. 2020. Том 20. №4. С.50-60. DOI:10.21683/1729-2646-2020-20-4-50-60.

[12] ***Крянев А.В., Климанов С.Г., Полтавский А.В., Семенов С.С.*** Характеристика многофункциональных беспилотных летательных аппаратов по методу Варда. *Полёт*. 2020. № 12. С. 7-25.

[13] ***Микони С.В., Семенов С.С.*** Оценивание рейтинга разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов. *Полёт*, 2021. № 6. с.28-40.

[14] ***Микони С.В., Полтавский А.В., Семенов С.С.*** Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров. *Надёжность*. 2022. №2. С. 55-63. DOI:10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63.

[15] ***Ерохин Б.Т., Богословский В.Н., Куликовский А.Ю.*** Методы проектирования сложных систем по комплексному критерию качества. *Известия РАН*. 2010. № 2 (64). С.33-38.
[16] ***Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И.*** Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. М.: Радио и связь, 2004. 552 с.
[17] ***Steuer R.E.*** Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1986.
[18] ***Карпович В.Н.*** Норма и описание как категории эпистемологии: рациональность как вид и основание нормативности. *Сибирский философский журнал*. 2013. Т.11. №4. С.5-11.
[19] ***Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М.*** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
[20] ***Микони С.В., Соколов Б.В., Бураков Д.П.*** Система выбора и ранжирования альтернатив СВИРЬ-М: теоретические основы и практика применения. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №3(53). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-3-167-180.
[21] ***Микони С.В.*** Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.
[22] ***Кенделл М***. Ранговые корреляции. М.: Статистика, 1975. 216 с.

Сведения об авторе

Микони Станислав Витальевич, 1936 г. рождения. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова в 1963 г., д.т.н. (1992), профессор (1994), ведущий научный сотрудник СПИИРАН. В списке публикаций 350 работ, из них 2 монографии и 7 учебных пособий в области технической диагностики, дискретной математики, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; https://orcid.org/0000-0001-7153-6804. *smikoni@mail.ru.*

Поступила в редакцию 23.01.2025, после рецензирования 24.02.2025. Принята к публикации 03.03.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261

Method of ranking alternatives based on given norms

© 2025, S.V. Mikoni

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

Abstract

The best examples in a given subject area are used to shape the appearance of the designed product. The selection of the product prototype is carried out using multidimensional optimization methods based on criteria and value/utility theory. The paper proposes to use bidirectional (two-sided) requirements for indicator values that are implemented through the norm model. Prior to assessing indicators based on superiority relations within a finite set of alternatives, an analysis is conducted to verify compliance with the norm. This approach enables the ordering of objects based on the magnitude of deviation from the norm on both sides of its boundaries. An experimental study in the selection and ranking system was performed to compare the results of ordering objects relative to the norm and one-sided requirements for indicator val-

ues. Unmanned aerial vehicles were considered as evaluation objects. Unidirectional requirements for indicator values were modeled using linear and logistic functions, while bidirectional requirements were modeled by logistic functions of the norm model fronts. The experiments showed a difference in the results obtained on the basis of one-sided and two-sided requirements. The difference in the obtained ratings of unmanned aerial vehicles was assessed using the Kendall rank correlation coefficient. The obtained results indicate the novelty of the proposed method of ranking objects relative to the norm, which can be used to select a prototype of the designed product and a version of an existing object that meets the norm's requirements for indicator values.

Keywords: *indicator, class, norm, class membership, ranking, rating.*

Citation: *Mikoni SV* Method of ranking alternatives based on given norms [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 14(3): 249-261. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261.

Financial support: The research was carried out within the framework of budget topic FFZF-2025-0020.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Pareto dominance graph
Table 1 – Characteristics of reconnaissance-strike and strike UAVs with a takeoff weight of 0.3-2.0 t
Table 2 – Boundaries of scales and standards of UAV indicators
Table 3 – Weights of composite and primary indicators of UAVs
Table 4 – Comparison of ratings with Lin evaluation functions and average value of norm of UAV indicators
Table 5 – Comparison of ratings with evaluation functions of average value of norm and average value of norm fuzziness of UAV's indicators
Table 6 – Comparison of ratings with Lin evaluation functions and membership functions of class N of UAV indicators
Table 7 – Comparison with the evaluation functions of average value of norm and the class N membership functions of UAV indicators
Table 8 – Comparison of ratings with evaluation functions of average value of norm fuzziness and the class N membership functions of UAV indicators
Table 9 – UAV's belonging to deviation classes
Table 10 – UAV indicators deviating from the "Norm" class

References

[1] ***Semenov SS.*** Assessment of the quality and technical level of complex technical systems. Practice of application of the expert assessment method [In Russian]. Moscow: Lenand. 2015. 352 p.

[2] ***Semenov SS, Shcherbinin VV.*** Assessment of the technical level of guidance systems for guided aerial bombs [In Russian]. Moscow: Mashinostroenie. 2015. 326 p.

[3] ***Semenov SS, Voronov EM, Poltavsky AV, Kryanev AV.*** Methods of decision-making in problems of assessing the quality and technical level of complex technical systems [In Russian]. Moscow: Lenand, 2016. 520 p.

[4] ***Voronov EM, Shcherbinin VV, Semenov SS.*** On the assessment of the technical level of complex technical systems taking into account the full life cycle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(2): 173-192. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-173-192.

[5] ***Poltavsky AV, Maklakov VV, Averkin AE, Polokhov AN, Borodulya VM, Burba AA, Semenov SS, Sedykh YuI.*** System principles of creation and application of multipurpose complexes of unmanned aerial vehicles [In Russian]. Moscow: IPU RAS, 2010. 102 p.

[6] ***Semenov SS, Poltavsky AV, Shcherbinin VV.*** On the definition of value functions of individual evaluation indicators in assessing the technical level of strike complexes of unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Issues of defense equipment. Series 9. Special control systems, tracking drives and their elements*. 2012; 5(257): 56-63.

[7] ***Semenov SS, Kovalenko IL, Poltavsky AV.*** Structure and systems of integral and individual evaluation indicators in assessing the technical level of multifunctional unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Bulletin of computer and information technologies*. 2013; 2: 22-27.

[8] ***Semenov SS, Poltavsky AV.*** Assessment of the technical level of unmanned aerial vehicle complexes [In Russian]. Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference "Scientific readings on aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky". Collection of reports. Moscow: Publishing house of the Academy named after N.E. Zhukovsky, 2013. P.500-507.

[9] ***Semenov SS, Poltavsky AV.*** Assessment of the technical level as a conceptual approach to the creation of new competitive equipment [In Russian]. Proceedings of the XIV All-Russian scientific and technical conference "Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky". Collection of reports. Moscow: Publishing house of the N.E. Zhukovsky Academy, 2017. P.193-213.
[10] ***Poltavsky AV, Semenov SS, Burba AA.*** Information modeling of assessing the technical level of complex technical systems [In Russian]. *Dual technologies*. 2019; 4(89): 68-75.
[11] ***Kryanev AV, Semenov SS, Kaldaeva AE.*** Methodological approach to determining the priority indicators of reconnaissance-strike and strike unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Reliability*. 2020; 20(4): 50-60. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-4-50-60.
[12] ***Kryanev AV, Klimanov SG, Poltavsky AV, Semenov SS.*** Characteristics of multifunctional unmanned aerial vehicles using the Ward method [In Russian]. *Flight*. 2020; 12: 7-25.
[13] ***Mikoni SV, Semenov SS.*** Evaluation of the rating of reconnaissance-strike and strike unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Flight.* 2021; 6: 28-40.
[14] ***Mikoni SV, Poltavsky AV, Semenov SS.*** Methodology for designing a multidimensional assessment model for tethered high-altitude platforms based on multicopters [In Russian]. *Reliability*. 2022; 2: 55-63. DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63.
[15] ***Erokhin BT, Bogoslovsky VN, Kulikovsky AYu.*** Methods of designing complex systems according to a comprehensive quality criterion [In Russian]. *Izvestiya RAS*. 2010; 2(64): 33-38.
[16] ***Semenov SS, Kharchev VN, Ioffin AI.*** Evaluation of the technical level of weapons and military equipment [In Russian]. Moscow: Radio and Communications, 2004. 552 p.
[17] ***Steuer RE.*** Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1986.
[18] ***Karpovich VN.*** Norm and description as categories of epistemology: rationality as a type and basis of normativity [In Russian]. *Siberian Journal of Philosophy*. 2013; 11(4): 5-11.
[19] ***Yakushev AI, Vorontsov LN, Fedotov NM.*** Interchangeability, standardization and technical measurements [In Russian]. Moscow: Mechanical engineering. 1986. 352 p.
[20] ***Mikoni SV, Sokolov BV, Burakov DP.*** SVIR-M, selection and ranking alternatives system: theoretical foundations and practice of application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-167-180.
[21] ***Mikoni SV.*** Modeling deviations of object quality indicators from the norm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.
[22] ***Kendall MA***. Rank Correlation Methods London: Charles Griffin and Co. Ltd., 42 Drury Lane, 1948.

About the author

Stanislav Vitalievich Mikoni (b. 1936) graduated from the Obraztsov Institute of Engineers of Railway Transport (Leningrad) in 1963, D. Sc. Eng. (1992), Professor (1994), Leading Researcher of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. The list of publications includes 350 works, including 2 monographs and 7 textbooks in the field of technical diagnostics, discrete mathematics, systems analysis, decision theory, and artificial intelligence. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; ORCID: 0000-0001-7153-6804. *smikoni@mail.ru.*

Received January 23, 2025, Revised February 24, 2025. Accepted March 03, 2025.

УДК 004.827+164.041 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-262-269

О третьих формах конъюнкции и дизъюнкции в логиках с векторной семантикой

© 2025, Л.В. Аршинский

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

Аннотация

В работе вводятся понятия информационного и нативного противоречий. Под первым понимается противоречивость суждения, обусловленная противоречивостью источников информации; под вторым – ситуация, когда утверждение совместно истинно и ложно в одном и том же отношении в один и тот же момент времени (противоречие имманентно объекту). На основе понятия нативного противоречия для класса логик с векторной семантикой впервые определяются третьи формы конъюнкции и дизъюнкции (нативные конъюнкция и дизъюнкция) как дополнение к известным первой и второй формам, а также другие нативные связки и отношения. Рассмотрены некоторые их свойства: выполнимость законов де Моргана для этих форм в совокупности с первой формой отрицания; коммутативность; особая роль вектора истинности «неопределённость» и др. Отмечается, что хотя данные формы вводятся в допущение существования нативного противоречия, они, а также иные нативные связки и отношения, могут представлять интерес при принятии решений в условиях информационных противоречий. В качестве примера нативного противоречия приводятся кубиты – основа квантовой обработки информации.

Ключевые слова: *логики с векторной семантикой, логические связки, вектор истинности, противоречие, нативные отношения.*

Цитирование: *Аршинский, Л.В.* О третьих формах конъюнкции и дизъюнкции в логиках с векторной семантикой. *Онтология проектирования.* 2025. Т.15, №2(56). С.262-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-262-269.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В работах автора (см., например [1, 2]) обсуждались вопросы логического формализма, построенного на основе векторной семантики типа V^{TF}, когда истинность суждения a имеет векторное представление:

$$||a||=\langle a^{+};a^{-}\rangle, \quad (1)$$

где позитивный компонент a^{+} характеризует степень уверенности, что суждение истинно, а негативный a^{-} – что ложно; $a^{+};a^{-}\in[0,1]$.

Такой взгляд оправдывался тем, что во многих предметных областях вывод об истинности или ложности того или иного суждения приходится делать на основе информации, поступающей из различных не зависящих друг от друга источников. Сведения от них могут согласовываться, а могут противоречить друг другу. Источники могут иметь разную степень доверия, что должно отражаться соответствующим формализмом. Обычный подход к формализации неточного знания, основанный на скалярных показателях вероятности/уверенности/истинности (см., например [3-5]), не всегда адекватен, так как основан на предположении, что дефицит доверия к тому, что a истинно означает частичное доверие к тому, что a ложно и наоборот. Это приводит к ситуации, когда трудно отличить противоречивые суждения (различные источники утверждают о противоположном) от неопределённых (сведения «за» или «против» a неубедительны или их нет).

Помимо скалярного возможен интервальный подход [6, 7], но он тоже не всегда эффективен, поскольку если противоречивость ещё можно выразить некоторым подинтервалом, например, интервала [0,1], то отсутствие сведений вызывает проблему: непонятны размер и положение такого подинтервала, и как различить два типа интервалов? В этих условиях независимое накопление свидетельств «за» и «против» в векторе $\langle a^+;a^-\rangle$ выглядит предпочтительным.

В теории нечётких множеств существует близкое к V^{TF}-семантике понятие интуиционистских нечётких множеств – *IFS* [8, 9], основанное на тройках $\langle x,\mu_A(x),\nu_A(x)\rangle$, где $\mu_A(x)$ – степень принадлежности элемента x множеству A (истинно, что $x\in A$); $\nu_A(x)$ – степень непринадлежности (ложно, что $x\in A$). Двойку $\langle \mu_A(x),\nu_A(x)\rangle$ при этом можно рассматривать как аналог (1), но на $\mu_A(x)$ и $\nu_A(x)$ наложено ограничение:

$$0\le\mu_A(x)+\nu_A(x)\le 1. \quad (2)$$

Это напоминает теорию свидетельств Г. Шафера [7] и отличает *IFS* и теорию свидетельств от V^{TF}. В V^{TF}-семантике и a^+ и a^- могут совместно равняться 1, то есть:

$$0\le a^+ + a^-\le 2. \quad (3)$$

Различие принципиальное, поскольку (2) допускает, по существу, только состояние неопределённости (незнания, частичного знания), а (3) – и незнания, и противоречия(!).

1 Противоречия и неопределённость. Два вида противоречий

Вопрос о противоречии – один из фундаментальных в науке. Важен он и в задачах разработки систем, основанных на знаниях, системах поддержки принятия решений, иных подобных приложениях. Этот вопрос разделил логику Аристотеля и диалектику. В первой постулировалась(!) несовместимость утверждения и отрицания одного и того же в отношении одних и тех же вещей в одном и том же смысле и в один момент времени, во второй такое совмещение допускалось [10, 11] (нередко через нарушение принципов единства смысла и времени). Сложность состоит в том, что в практике часто предлагаются ситуации, когда приходится выбирать между двумя взаимоисключающими утверждениями. Запрет на их совместность представлен известной аксиомой:

$$\neg(\neg a\&a),$$

нарушение которой делает возможным вывод:

$$\neg a\&a \vdash b,$$

где b – любое суждение [12]. Если теория содержит противоречие, в ней выводимо что угодно, это обесценивает теорию и обосновывает запрет на противоречие.

Неприятие противоречий в теориях не избавляет от столкновения с ними на практике. Нередко при обработке эмпирического материала приходится иметь дело с взаимоисключающими данными. Ситуация взаимного исключения возникает, к примеру, при оценке осуществимости будущих случайных событий. Стремление учесть это обстоятельство породило теорию вероятностей и целый спектр многозначных логик (см., например [13, 14]).

Не менее значима и ситуация с дефицитом данных. Частный случай – дефицит доверия к ним, когда информация имеется, но полной уверенности в ней нет. Дефицит обрабатывается, например, теорией свидетельств или интуиционистскими нечёткими множествами, однако противоречивость в них, как и в нечётких логиках, допускается в ограниченном виде. В то же время и дефицит, и противоречивость формализуются семантикой V^{TF}.

Когда говорят о формализации противоречия, рассуждают о противоречии вообще, не затрагивая причины и источники. В то же время надо выделить два его вида. Первый вид противоречия – *информационный*. В этом случае имеются исключающие друг друга сведения о состоянии объекта, хотя он в состоянии противоречия не пребывает. Например, из од-

ного источника известно, что на улице солнечно, а из другого – что за окном снег или дождь (контрарность); или один сообщает, что идёт снег, а другой – что снега нет (контрадикторность) и т.п. В любом случае состояние погоды (в данное время и в данном месте) какое-то одно, и истинно одно высказывание, однако при отсутствии иной информации приходится принимать решение, учитывая все источники. В V^{TF}-семантике это делается присвоением разных значений компонентам вектора (1). Например, истинность утверждения a = «На улице идёт дождь» может выглядеть как $\|a\|=\langle 0.3;0.1\rangle$ или $\|a\|=\langle 0.7;0.9\rangle$ в зависимости от степени доверия к той и другой информации. Здесь первый (позитивный) компонент показывает основанное на свидетельствах доверие к тому, что дождь есть, а второй (негативный), что его нет. Доверие к обоим источникам может быть абсолютным, и тогда ситуация формализуется вектором $\langle 1;1\rangle$ (полное противоречие свидетельств) или отсутствовать полностью – вектор $\langle 0;0\rangle$ (неопределённость) [1].

Второй вид противоречия требует допущения, что противоречие существует реально, что оно свойственно природе объекта (имманентно ему). Иначе говоря, соответствующее утверждение истинно и ложно *в одном и том же отношении в один и тот же момент времени* в силу природы объекта(!). Это расходится с традиционными взглядами, но развитие вычислительных технологий подводит к такому представлению. Речь идёт о квантовых вычислительных устройствах. В основе квантовых вычислений лежит понятие кубита – квантового бита, который одновременно пребывает в состояниях 0 и 1, как если ложь и истина в них реализуются совместно (см., например [15, 16]). Если это принять за факт, тогда компоненты вектора (1) можно рассматривать как отражение совместности категорий Истины и Лжи в одном объекте (предмете, явлении, событии…). В таком случае a^+ и a^- показывают, насколько утверждение совместно истинно и ложно согласно природе вещей. Соответствующие и отражающиеся в утверждении свойства не разделяются по времени и смыслу, а соединены в объекте. Этот вид противоречия можно назвать *нативным*. Квантовая механика не отделяет по времени и смыслу, например, пребывание электрона в состоянии со спином ½ от состояния со спином –½, или нахождение фотона в состояниях с разной поляризацией [15]. Эти состояния реализуются одновременно и неразрывны с объектом, присущи ему по своей природе. То есть явление можно трактовать как нативное противоречие. В квантовой механике это описывается суперпозицией волновых функций, а в V^{TF}-семантике – вектором (1). Именно для такого представления о противоречии предлагается ввести третью форму конъюнкции и дизъюнкции (хотя они могут трактоваться и информационно).

2 Третья форма конъюнкции и дизъюнкции. Свойства третьих форм

Первая форма конъюнкции и дизъюнкции определяется как [1]:

$$\|a\&b\|=\langle a^+\bullet b^+;a^-\oplus b^-\rangle; \tag{4}$$

$$\|a\vee b\|=\langle a^+\oplus b^+;a^-\bullet b^-\rangle. \tag{5}$$

Здесь $\bullet$ и $\oplus$, соответственно, триангулированные (треугольные) норма (*t*-норма) и ко-норма (*s*-норма) в инфиксной записи, связанные дополнительно как: $1-x\bullet y=(1-x)\oplus(1-y)$; или, что аналогично: $1-x\oplus y=(1-x)\bullet(1-y)$; $x, y\in[0,1]$. Примеры – пары функций $x\bullet y=\mathbf{min}(x,y)$, $x\oplus y=\mathbf{max}(x,y)$; и $x\bullet y=x\cdot y$, $x\oplus y=x+y-x\cdot y$. Вторая их форма определяется как [1]: $\|a\&_2 b\|=\langle a^+\bullet b^+;a^-\bullet b^-\rangle$; $\|a\vee_2 b\|=\langle a^+\oplus b^+;a^-\oplus b^-\rangle$.

Первая форма – обобщение обычных (классических, а также нечётких) конъюнкции и дизъюнкции на семантику V^{TF}. Это формализация естественно-языковых связок И и ИЛИ для векторного случая. Введение связей $a^++a^-=1$ (аналогично, $b^++b^-=1$) превращает (4) в нечёткую конъюнкцию, а (5) в нечёткую дизъюнкцию. Для вторых форм естественно-языковые

связки предложить трудно – эта форма ни в классической, ни в нечёткой логике не встречается. Она носит информационный характер и выражает не конъюнкцию/дизъюнкцию явлений, а конъюнкцию/дизъюнкцию информации с учётом доверия к ней. Это информационные конъюнкция и дизъюнкция. Обе формы связок проиллюстрированы рисунком 1.

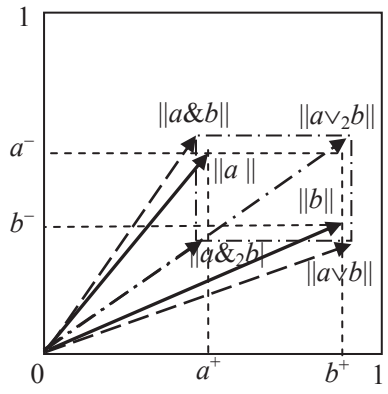


Рисунок 1 – Первая и вторая формы конъюнкции и дизъюнкции

Помимо этих двух пар связок, V^{TF}- семантика включает две формы отрицаниями [1]. Первая форма отрицания:

$$\|\neg a\|=\langle a^-;a^+\rangle; \quad (6)$$

вторая форма:

$$\|\sim a\|=\langle 1-a^+;1-a^-\rangle.$$

Первая форма означает перестановку местами аргументов «за» и «против», вторая – отрицание в силу дефицита информации. Т.е. вторая форма отрицания, как и вторая форма конъюнкции и дизъюнкции, носит информационный характер.

В [17, 18] показано, что алгебра связок $\{\&,\vee,\neg\}$ с константами $\langle 0;1\rangle$ (строгая ложь) и $\langle 1;0\rangle$ (строгая истина) – аналогами 0 и 1 булевой алгебры – совпадает с алгеброй связок $\{\&_2,\vee_2,\sim\}$, если $\langle 0;1\rangle$ и $\langle 1;0\rangle$ заменить, соответственно, на $\langle 0;0\rangle$ (неопределённость) и $\langle 1;1\rangle$ (полное противоречие). Т.е. $\langle 0;0\rangle$ и $\langle 1;1\rangle$ здесь выступают в качестве нуля и единицы.

Третья форма конъюнкции и дизъюнкции обусловлена представлением о нативном противоречии как совместной реализации двух взаимоисключающих состояний. В качестве примера приведены кубиты, однако ситуацию можно представить и с более общих позиций. Отвлекаясь от физических особенностей, предлагается принять к сведению, что утверждение может быть истинным и ложным одновременно. Тогда конъюнкция a и b представляется как:

$$\|a\&_n b\|=\langle a^+\bullet b^+;a^+\bullet b^-\oplus a^-\bullet b^+\oplus a^-\bullet b^-\rangle, \quad (7)$$

а дизъюнкция как:

$$\|a\vee_n b\|=\langle a^+\bullet b^+\oplus a^+\bullet b^-\oplus a^-\bullet b^+;a^-\bullet b^-\rangle. \quad (8)$$

Конъюнкция истинна в той мере, в какой a и b совместно истинны, и ложна в той, в какой ложно хотя бы одно из них. Аналогично, дизъюнкция истинна настолько, насколько истинно хотя бы одно утверждение и ложна настолько, насколько a и b совместно ложны. Для кубитов это описывается волновыми функциями, для векторов (1) используются триангулированные нормы. Третья форма конъюнкции и дизъюнкции называется *нативной* конъюнкцией и дизъюнкцией. Индекс «n» и прилагательное «нативный» здесь являются отсылкой к нативному противоречию.

В таблице 1 приведён сравнительный пример таблиц истинности для $\&$, $\vee$, $\&_2$, $\vee_2$ и $\&_n$, $\vee_n$ при придельных значениях истинности Л(строгая ложь)=$\langle 0;1\rangle$, И(строгая истина)=$\langle 1;0\rangle$, Н(неопределённость)=$\langle 0;0\rangle$, П(полное противоречие)=$\langle 1;1\rangle$ (первая и вторая формы таблиц взяты из [1]). Видно, что для значений вектора истинности, соответствующих классическим истине И=$\langle 1;0\rangle$ и лжи Л=$\langle 0;1\rangle$, результаты для первой и третьей форм совпадают (выделено жирным). В отличие от первой формы, неопределённость $\langle 0;0\rangle$ для a или b порождает неопределённость для $a\&_n b$ и $a\vee_n b$ независимо от истинности второго элемента. Вторая форма конъюнкции и дизъюнкции – как обычные И и ИЛИ для значений истинности Н и П.

Для первой и второй форм конъюнкции и дизъюнкции справедливы соотношения де Моргана в следующем виде [1]:

$\neg(a\&b)=\neg a\vee\neg b$; $\neg(a\vee b)=\neg a\&\neg b$; $\sim(a\&b)=\sim a\vee\sim b$; $\sim(a\vee b)=\sim a\&\sim b$; $\sim(a\&_2 b)=\sim a\vee_2\sim b$; $\sim(a\vee_2 b)=\sim a\&_2\sim b$. Но: $\neg(a\&_2 b)=\neg a\&_2\neg b$; $\neg(a\vee_2 b)=\neg a\&_2\neg b$.

Знак «=» здесь означает (логическую) эквивалентность – совпадение значений векторов истинности.

Таблица 1 – Таблицы истинности для различных форм конъюнкции и дизъюнкции

a	b	$a\&b$	$a\vee b$	$a\&_2 b$	$a\vee_2 b$	$a\&_n b$	$a\vee_n b$
Л	**Л**	**Л**	**Л**	Л	Л	**Л**	**Л**
Л	**И**	**Л**	**И**	Н	П	**Л**	**И**
Л	Н	Л	Н	Н	Л	Н	Н
Л	П	Л	П	Л	П	Л	П
И	**Л**	**Л**	**И**	Н	П	**Л**	**И**
И	**И**	**И**	**И**	И	И	**И**	**И**
И	Н	Н	И	Н	И	Н	Н
И	П	П	И	И	П	П	И
Н	**Л**	Л	Н	Н	Л	**Н**	**Н**
Н	**И**	Н	И	Н	И	**Н**	**Н**
Н	**Н**	Н	Н	**Н**	**Н**	**Н**	**Н**
Н	**П**	Л	И	**Н**	**П**	**Н**	**Н**
П	Л	Л	П	Л	П	Л	П
П	И	П	И	И	П	П	И
П	**Н**	Л	И	**Н**	**П**	Н	Н
П	**П**	П	П	**П**	**П**	П	П

Для третьей формы конъюнкции и дизъюнкции получается:

$$\neg(a\&_n b) = \neg a\vee_n\neg b; \quad (9)$$

$$\neg(a\vee_n b) = \neg a\&_n\neg b. \quad (10)$$

Для проверки (9) достаточно сравнить векторы истинности левой и правой частей:
$\|\neg(a\&_n b)\| = \langle a^+\bullet b^-\oplus a^-\bullet b^+\oplus a^-\bullet b^-; a^+\bullet b^+\rangle$; $\|\neg a\vee_n\neg b\| = \langle a^-\bullet b^-\oplus a^-\bullet b^+\oplus a^+\bullet b^-; a^+\bullet b^+\rangle$.
Справедливость (10) подтверждается аналогично.

Для третьей формы конъюнкции и дизъюнкции, и второй формы отрицания соотношения подобные (9) и (10) отсутствуют. Это позволяет рекомендовать для работы с $a\&_n b$ и $a\vee_n b$ первую форму – отрицание в форме перестановки $\neg$.

Помимо (9) и (10) важно отметить следующие свойства, вытекающие из определения третьих форм и свойств триангулированных норм: $a\&_n b < a\vee_n b$.
Также: $a\&_n b = b\&_n a$; $a\vee_n b = b\vee_n a$; $\|a\&_n a\| = \langle a^+\bullet a^+; a^+\bullet a^-\oplus a^-\bullet a^+\oplus a^-\bullet a^-\rangle$;
$\|a\vee_n a\| = \langle a^+\bullet a^+\oplus a^+\bullet a^-\oplus a^-\bullet a^+; a^-\bullet a^-\rangle$.
Кроме того: $a\&_n Л = \langle 0; a^+\oplus a^-\rangle$; $a\&_n И = a$; $a\&_n Н = Н$; $a\&_n П = \langle a^+; a^+\oplus a^-\oplus a^-\rangle < a$;
И $a\vee_n Л = a$; $a\vee_n И = \langle a^+\oplus a^-; 0\rangle$; $a\vee_n Н = Н$; $a\vee_n П = \langle a^+\oplus a^+\oplus a^-; a^-\rangle > a$.

Здесь $<$ – отношение правдоподобия, означающее, что если $a < b$ ($a > b$), то $a^+ \le b^+$ и $a^- \ge b^-$ ($a^+ \ge b^+$ и $a^- \le b^-$) [1].

Видно, что свойство идемпотентности для $a\&_n b$ и $a\vee_n b$, строго говоря, не выполняется. Не выполняется в общем случае и свойство ассоциативности. Его выполнимость требует дистрибутивности операций $\bullet$ и $\oplus$, что справедливо, например, для $x\bullet y=\mathbf{min}(x,y)$ и $x\oplus y=\mathbf{max}(x,y)$, но несправедливо для $x\bullet y=x\cdot y$ и $x\oplus y=x+y-x\cdot y$.

Вектор И соответствует единице для $\&_n$, а Л – нулю для $\vee_n$. Вектор Н оказывается своего рода «аннигилятором» для $\&_n$ и $\vee_n$: обе операции с ним дают в результате Н.

Изложенный принцип можно распространить на другие связки и отношения. В частности, помимо конъюнкции и дизъюнкции можно определить *нативное исключающее* ИЛИ (исключающую дизъюнкцию) как: $\|a\underline{\mathrm{XOR}}_n b\| = \langle a^+\bullet b^-\oplus a^-\bullet b^+; a^+\bullet b^+\oplus a^-\bullet b^-\rangle$;
нативную импликацию как: $\|a\to_n b\| = \|\neg a\vee_n b\| = \langle a^+\bullet b^+\oplus a^-\bullet b^+\oplus a^-\bullet b^-; a^+\bullet b^-\rangle$;
нативную эквивалентность как: $\|a=_n b\| = \langle a^+\bullet b^+\oplus a^-\bullet b^-; a^+\bullet b^-\oplus a^-\bullet b^+\rangle$; и другие.

3 Обсуждение

Несмотря на то, что третьи формы конъюнкции и дизъюнкции введены с отсылкой к квантовой обработке информации, они не связаны напрямую с квантовой обработкой: V^{TF}-семантика допускает понятие неопределённости вектора истинности $\langle 0;0\rangle$, чего нет в квантовой механике. Используемые в квантовых вычислениях волновые функции ψ_1 и ψ_0 состояний $|1\rangle$ и $|0\rangle$ подчиняются свойству $|\psi_1|^2+|\psi_0|^2=1$ [15, 16], что делает невозможной ситуацию неопределённости. При этом ψ_1 и ψ_2 описывают *физический процесс*, а не логику вообще. По этой же причине кубиты обрабатываются на основе единого физического закона, тогда как для векторов истинности может использоваться ряд *t*- и *s*-норм (см., например [19]). Отсылка к кубитам сделана для того, чтобы показать целесообразность понятия нативного противоречия, когда Истина и Ложь реализуются совместно.

Третьи формы введены для нативных противоречий и могут найти применение при принятии решений в условиях обработки информационных противоречий, дополняя первую и вторую формы. Особенность состоит в том, что неопределённость Н делает неопределёнными не только связки $\&_n$ (И) и $\vee_n$ (ИЛИ), но и новые введённые связки и отношения $\underline{\vee}_n$, $\rightarrow_n$, $=_n$, а также иные конструкции, «аннигилируя» их истинность (превращая её в Н).

Заключение

На основе представления о нативном противоречии для семантики V^{TF} вводится понятие третьей формы конъюнкции и дизъюнкции (нативных конъюнкции и дизъюнкции) как дополнение к известным первой и второй формам, а также другие нативные связки и отношения. Из двух форм отрицания для работы с третьими формами конъюнкции и дизъюнкции рекомендуется использовать первую форму (вторая форма тоже может найти своё место). Третья форма совместно с нативными связками и отношениями может представлять интерес для информационного противоречия.

Список источников

[1] ***Аршинский Л.В.*** Методы обработки нестрогих высказываний. Иркутск: Изд-во Восточно-Сибирского института МВД России, 1998. 40 с.

[2] ***Аршинский Л.В.*** Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. 228 с.

[3] ***Элти Дж., Кумбс М.*** Экспертные системы: концепции и примеры / Пер. с англ. и предисл. Б.И. Шитикова. М.: Финансы и статистика, 1987. 191 с.

[4] ***Хачатрян А.Р.*** Анализ классических методов объединения свидетельств в экспертных системах. Изв. АН СССР. *Техническая кибернетика*, 1987. № 5. С.67-73.

[5] ***Броневич А.Г., Лепский А.Е.*** Нечёткие модели анализа данных и принятия решений. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 264 с.

[6] ***Quinlan J.R.*** INFERNO: a causations approach to uncertain inference. *The Computer Journal*, 1983. Vol.26. N 3. P.255-269.

[7] ***Shafer G.*** A Mathematical Theory of Evidence. Princeton and London: Princeton University Press, 1976. 297 p.

[8] ***Atanassov K.T.*** Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986. Vol.20(1). P.87-96.

[9] ***Atanassov K.T.*** New operations defined over the intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994. Vol.61(2). P.137-142.

[10] ***Аристотель.*** Сочинения: в 4 т. Т. 2. / Ред. З.Н. Микеладзе. М.: Мысль, 1978. 687 с.

[11] ***Чанышев А.Н.*** Курс лекций по древней философии. М.: Высшая школа, 1981. 374 с.

[12] ***Мендельсон Э.*** Введение в математическую логику / Пер. с англ.; под ред. С.И.Адяна. 3-е изд. М.: Наука, 1984. 320 с.

[13] ***Карпенко А.С.*** Многозначные логики. М.: Наука, 1997. 223 с.

[14] ***Gottwald S.*** Treatise on Many-Valued Logics. Leipzig, 2000. 604 p.

[15] ***Feinman R.P.*** Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 1982. v.21, N 6,7. P.467-488.
[16] ***Торгаев С.Н., Шульга И.Д., Юрченко Е.А., Громов М.Л.*** Основы квантовых вычислений. Томск: ТГУ, 2020. 88 с.
[17] ***Аршинский Л.В.*** Многозначные логики с векторной семантикой. *Электронный журнал «Logical Studies»,* 2004. № 12. http://www.logic.ru/LogStud/12.
[18] ***Аршинский Л.В.*** Логическая семантика с точки зрения семантики векторной. *Прикладные проблемы дискретного анализа*: сб. науч. тр. / Под ред. О.В. Кузьмина. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. С.8-18.
[19] Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 312 с.

Сведения об авторе

Аршинский Леонид Вадимович, 1957 г. рождения. Окончил Иркутский государственный университет в 1979 г., д.т.н. (2008). Профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. В списке научных трудов более 260 работ в области оптимизации, искусственного интеллекта, системного анализа, информационной безопасности. Член-корреспондент Российской академии естественных наук и Российской инженерной академии, член Российской ассоциации искусственного интеллекта. AuthorID (RSCI): 520252; Author ID (Scopus): 57193195356; Researcher ID (WoS): C-3869-2013; ORCID 0000-0001-5135-7921. *larsh@mail.ru*.

Поступила в редакцию 06.03.2025, после рецензирования 14.03.2025. Принята к публикации 25.03.2025.

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-262-269

On the third forms of conjunction and disjunction in logic with vector semantics

© 2025, L.V. Arshinskiy

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract

The paper introduces the concepts of informational and native contradictions. Informational contradiction is understood as the inconsistency of a resulting from discrepancies in information sources, while native contradiction describes a situation where a statement is simultaneously true and false in the same respect (i.e., the contradiction is inherent to the object). Based on the concept of native contradiction within the class of logic with vector semantics, the third forms of conjunction and disjunction (native conjunction and disjunction) are defined for the first time as an extension to the known first and second forms, along with other native connectives and relations. Several properties of these forms are examined, including the applicability of de Morgan's laws when combined with the first form of negation, commutativity, and the distinct role of the truth vector "uncertainty." It is also noted that while these forms are defined under the assumption of a native contradiction, they, along with other native connectives and relations, may be useful for decision-making in contexts of informational contradictions. Qubits, which serve as the foundation of quantum information processing, are cited as an example of a native contradiction.

Keywords: *logic with vector semantics, logical connectives, truth vector, contradiction, native relationships.*

For citation: *Arshinskiy LV.* On the third forms of conjunction and disjunction in logic with vector semantics [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 262-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-262-269.

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

List of figures and tables

Figure 1 – First and second form of conjunction and disjunction
Table 1 – Truth tables for various forms of conjunction and disjunction

References

[1] ***Arshinskiy LV.*** Methods for processing of non-strict propositions [In Russian]. Irkutsk: East-Siberian Institute of MIA of Russia. 1998. 40 p.
[2] ***Arshinskiy LV.*** Vector logic: foundations, concepts, models [In Russian]. Irkutsk: Irkutsk state university. 2007. 228 p.
[3] ***Elty JL, Coombs MJ.*** Expert systems: concepts and examples [In Russian]. Trans. from English and foreword by B.I. Shitikov. Moscow: Finance and Statistics. 1987. 191 p.
[4] ***Khachatryan AR.*** Analysis of classical methods of combining evidence in expert systems [In Russian]. *Izvestiya AN SSSR. Tech. Cybernetics.* 1987; 5: 67-73.
[5] ***Bronevich AG, Lepskiy AE.*** Fuzzy models of data analysis and decision making [In Russian]. Moscow: Publishing house of the Higher School of Economics. 2022. 264 p.
[6] ***Quinlan JR.*** INFERNO: a causations approach to uncertain inference. *The computer J.* 1983; 26-3: 255-269.
[7] ***Shafer G.*** A Mathematical Theory of Evidence. Princeton and London: Princeton University Press; 1976. 297 p.
[8] ***Atanassov KT.*** Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 1986; 20(1): 87-96.
[9] ***Atanassov KT.*** New operations defined over the intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems.* 1994; 61(2): 137-142.
[10] ***Aristotle.*** Works: in 4 volumes. Vol. 2. [in Russian] Z.N. Mikeladze (ed.). Moscow: Mysl; 1978. 687 p.
[11] ***Chanyshev AN.*** Lecture course on ancient philosophy: a teaching aid for philosophical faculties and university departments [in Russian]. Moscow: Higher School; 1981. 374 p.
[12] ***Mendelson E.*** Introduction to Mathematical Logic [In Russian]. Translated from English, S.I. Adyan (ed.). 3rd ed. Moscow: Nauka; 1984. 320 p.
[13] ***Karpenko AS.*** Multivalued logic [In Russian]. Moscow: Nauka; 1997. 223 p.
[14] ***Gottwald S.*** Treatise on Many-Valued Logic. Leipzig; 2000. 604 p.
[15] ***Feinman RP***. Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*. 1982; 21(6,7): 467-488.
[16] ***Torgaev SN, Shulga ID, Yurchenko EA, Gromov ML.*** Fundamentals of quantum computing [In Russian]. Tomsk: STU. 2020. 88 p.
[17] ***Arshinskiy LV.*** Many-valued logic with vector semantics. *Electronic journal "Logical Studies"*. 2004; 12: http://www.logic.ru/LogStud/12.
[18] ***Arshinskiy LV.*** Logical semantics from the perspective of vector semantics [In Russian]. *Applied problems of discrete analysis*: collection of scientific papers. O.V. Kuzmin (ed.). Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House. 2021: 8-18.
[19] Fuzzy sets in control models and artificial intelligence [In Russian]. D.A. Pospelov (ed.). Moscow: Nauka. Chief editor of physical and mathematical literature. 1986. 312 p.

About the author

Leonid Vadimovich Arshinskiy (b.1957) graduated from the Irkutsk State University (Irkutsk-city) in 1979, Dr. of Tech. Sc. (2008). He is a professor of the Information Systems and Information Security Department of the Irkutsk State Transport University, a corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences and the Russian Academy of Engineering, and a member of the Russian Association of Artificial Intelligence. He is the author of more than 260 scientific articles and abstracts in the field of ground effect wings optimization, artificial intelligence, system analysis, and information security. AuthorID (RCI): 520252; Author ID (Scopus): 57193195356; Researcher ID (WoS): C-3869-2013; ORCID 0000-0001-5135-7921. *larsh@mail.ru.*

Received March 06, 2025. Revised March 14, 2025. Accepted March 25, 2025.

УДК 004.942 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-270-280

Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола

© 2025, И.Н. Пожаркова[1, 2]

[1] *Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия*

[2] *Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

Аннотация

Методы вычислительной гидродинамики позволяют оценивать характеристики газожидкостных потоков, в частности свободных струй, с учётом различных явлений. Особенностями струй, исследуемых в данной работе, являются значительные геометрические размеры и начальные скорости, что повышает вычислительную сложность используемых моделей и увеличивает время их расчёта. Основу выбора численных методов и их настроечных параметров составляет поэтапное увеличение вычислительной сложности используемых моделей до уровня, удовлетворяющего критериям их качества: обеспечение приемлемых относительно решаемых задач значений времени расчёта; точности, определяемой величиной отклонения полученных результатов от экспериментальных целевых характеристик струй. Описаны этапы выбора, включающие проведение эксперимента для оценки точности рассматриваемых методов, принципы согласования экспериментальных и расчётных характеристик для выполнения валидации. Эффективность использования предлагаемой схемы выбора показана на примере решения задачи моделирования свободных струй огнетушащего вещества из пожарного ствола. Представлены результаты проведённых на полигоне натурных испытаний и расчётов на основе выбранных моделей. Новизна заключается в формализации методов вычислительной гидродинамики, обеспечивающих приемлемые относительно целевых характеристик точность и время расчёта траекторий свободных струй, что может быть использовано при разработке систем автоматизированного наведения потока огнетушащего вещества из ствола пожарного робота на заданные области защищаемого пространства.

Ключевые слова: *моделирование, точность модели, время расчёта, свободные струи, многофазные потоки, вычислительная гидродинамика, огнетушащее вещество, пожарный ствол.*

Цитирование: *Пожаркова И.Н.* Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.270-280. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-270-280.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Численное моделирование свободных струй под воздействием внешних сил является основой решения ряда задач: оценка параметров исследуемых потоковых процессов [1], разработка и совершенствование исполнительных и управляющих устройств, алгоритмов [2] и др. Выбор методов вычислительной гидродинамики определяется свойствами жидкости и среды, в которую она истекает, а также изучаемыми при этом явлениями [3].

Предметная область настоящей работы ограничена свободными струями огнетушащего вещества из пожарных стволов, движущегося в воздухе под воздействием сил сопротивления, тяжести и т.д., без учёта ветра

Неучёт ветра обусловлен тем, что имеющиеся эмпирические данные, которые можно использовать для оценки точности и валидации моделей, получены на основе испытаний ствольной техники в штиль, для того, чтобы обеспечить унификацию параметров, определяемых по результатам экспериментов, проводимых на различных полигонах, в т.ч. закрытых. Характерными особенностями таких потоков огнетушащего вещества являются большие геометрические размеры траекторий (десятки метров), высокие начальные скорости (десятки

метров в секунду), раздробление и распыл сплошной струи на отдельные фрагменты и капли различных размеров (рисунок 1), а также обратный процесс слияния капель.

Для математического описания указанных явлений необходимо использование соответствующих методов и размеров ячеек расчётной сетки [4], на которые разбивается исследуемое пространство, что потребует значительного количества ресурсов для проведения расчёта.

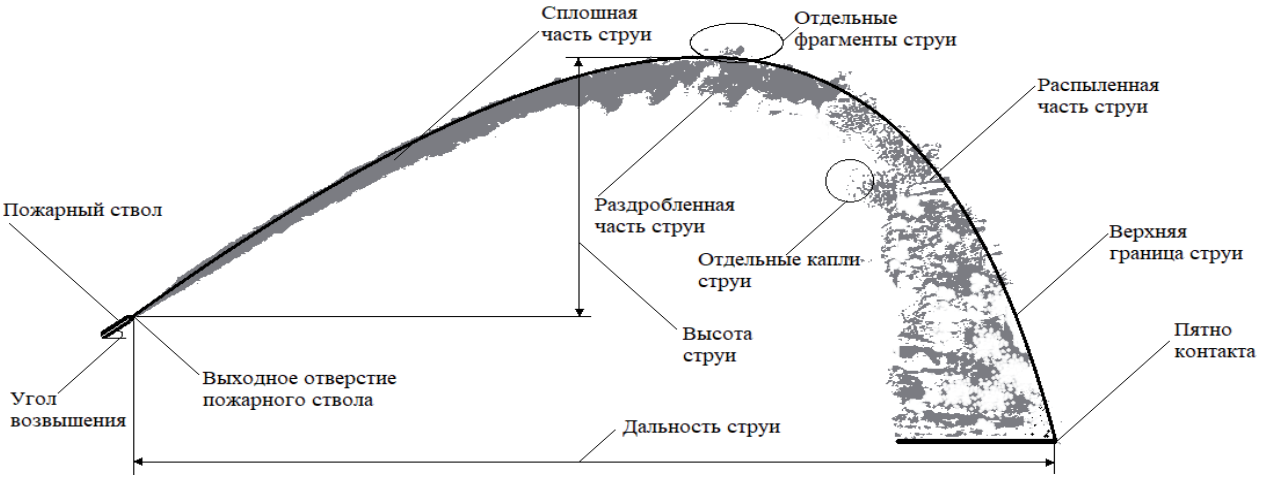


Рисунок 1 – Схема свободной струи огнетушащего вещества из пожарного ствола

Исследуемые в данной работе свободные струи представляют собой многофазные потоки [5]. Первичная фаза – газовая: воздух, двигающийся за счёт взаимодействия (в частности, в распылённой и раздробленной частях струи) с жидкой вторичной фазой (огнетушащим веществом). Если характерный размер межфазной границы значительно превышает соответствующие размеры ячеек расчётной сетки на участке сплошной струи (рисунок 1), то для описания этого участка можно использовать метод переноса объёмной доли жидкости (*Volume Of Fluid*, *VOF*) [6], который позволяет сократить время расчёта по сравнению с эйлеровой моделью [7]. Это может быть актуально при решении задач, требующих построения траекторий на множестве различных значений параметров, влияющих на исследуемые процессы, например, задач формирования выборок для обучения нейросетевых моделей [2].

Когда раздробление и распыл жидкости (рисунок 1) оказывают существенное влияние на траекторию её движения, необходимо учитывать не только её сплошную, но и дисперсную фазы [8], а также переходы между ними. Для этого применяются, в частности, гибридные методы, совместно использующие две модели, например, *VOF-DPM* [9]: для сплошной фазы – *VOF*, для дискретной фазы – модель Лагранжа (*Discrete Phase Model*, *DPM*). В исследованиях, одним из предметов которых является обратный переход (слияние отдельных капель и т.д.), применяются более сложные модели на базе эйлеровой.

- Многофазная модель Эйлера, использующая метод *VOF* для описания отдельных фаз (*Multi-fluid VOF*) [10]. Особенностью данного подхода является представление жидкости, как дисперсного потока, который при определённом критическом значении объёмной доли приобретает свойства сплошной фазы.
- Модель плотности алгебраической площади границы между фазами (*Algebraic Interfacial Area Density*, *AIAD*) [11], в которой переходы между сплошными и дисперсными фазами представлены на основе уравнений массообмена.
- Обобщённая двухфазная методика, в которой переходы между фазами описываются на основе *AIAD, Multi-fluid VOF*, а также с использованием модели равновесного распределения [12].

Оценка степени влияния переходов между фазами на траекторию свободной струи в задачах наведения потока огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола (ПЛС) на заданную область пространства [2] представляет сложную проблему. Цель настоящего исследования заключается в формализации выбора вычислительных моделей и их параметров, обеспечивающих высокие точность и скорость расчёта.

1 Методы

Схема выбора методов вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamic, CFD*) и их параметров для моделирования свободных струй представлена на рисунке 2.

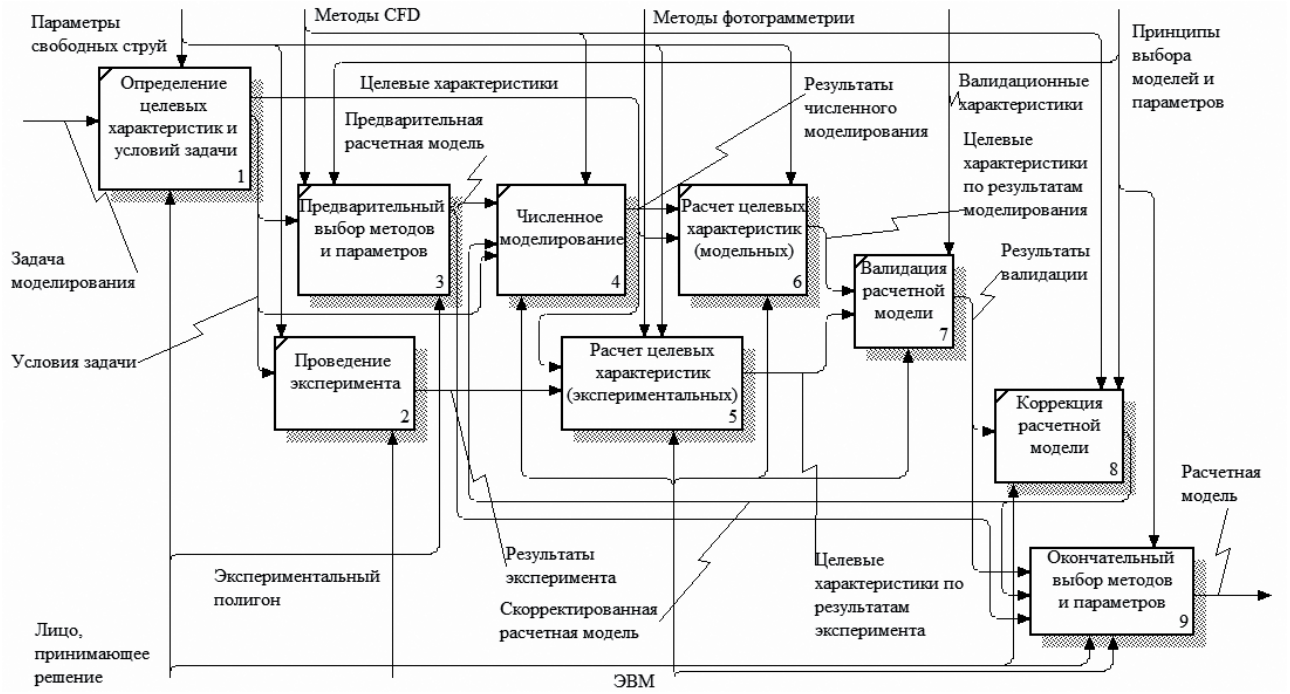


Рисунок 2 – Схема выбора методов вычислительной гидродинамики и их параметров для моделирования свободных струй

Характеристиками, представляющим интерес в исследуемой области, являются: высота h, дальность L, верхняя граница струи (множество точек P траектории движения переднего фронта), размер пятна контакта d, интенсивность орошения в зоне пятна контакта q (рисунок 1). Наибольшую важность имеют h, L и P, т.к. на их основе формируются соответствующие ограничения (например, при разработке алгоритмов решения задач наведения огнетушащего вещества из ствола пожарного робота на заданную точку защищаемого пространства [13] под воздействием управляющих параметров: угол возвышения, расход огнетушащего вещества, рабочее давление [2]).

Критериями качества моделей, используемых для численного расчёта движения свободных струй, является выполнение следующих условий:

$$T \le T_{max}, \tag{1}$$

$$D_i \le D_{max,i}, \tag{2}$$

где T – время моделирования на имеющемся оборудовании,

T_{max} – максимально допустимое значение времени расчёта на имеющемся оборудовании,

D_i – ошибка оценки i-й целевой характеристики, полученной на основе моделирования,

$D_{max,i}$ – максимально допустимая величина ошибки оценки i-й целевой характеристики.

При выполнении условий (1) и (2) для различных конфигураций моделей и их параметров предпочтение отдаётся той, для которой свёртка (3) имеет минимальное значение.

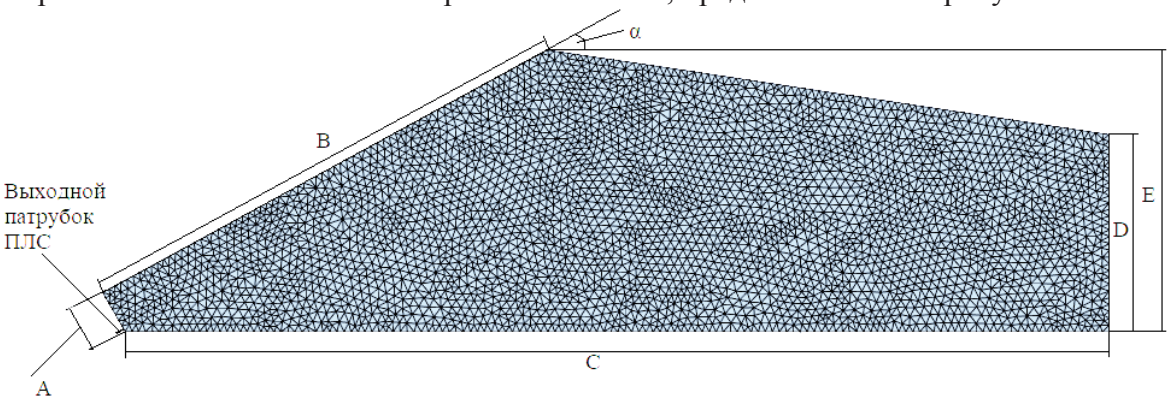
$$F(T, D_i) = \alpha \cdot T/T_{max} + \Sigma_i(\beta_i \cdot D_i/D_{max,i}), \tag{3}$$

где α, β_i – весовые коэффициенты важности соответствующих критериев (1) и (2).

Выбор моделей и их параметров для описания свободных струй огнетушащего вещества с целью обеспечения достижения приемлемого времени расчёта осуществляется согласно

схеме (рисунок 2, блоки 3 и 8) от наиболее простых с вычислительной точки зрения к более сложным, включающим решение большего количества уравнений. Отсутствие необходимости учитывать процессы перехода из дисперсной фазы в сплошную позволяет в качестве предварительных моделей вычислительной гидродинамики (МВГ) использовать наиболее простые *k-epsilon turbulence model* (*k*-ε) [14] и *k-omega turbulence model* (*k*-ω) [15] для описания турбулентности и *VOF* [6] для описания фаз. На время расчёта влияют геометрические размеры исследуемого пространства, количество ячеек расчётной сетки, граничные условия, использование дополнительных функций (например, для демпфирования или ограничения турбулентности).

В работе использовалась схема расчётной сетки, представленная на рисунке 3.



A – длина задней стенки моделируемого пространства, смежной с выходным патрубком ПЛС,
B – длина верхней стенки моделируемого пространства на начальном участке струи,
C – длина моделируемого пространства,
D – высота передней стенки моделируемого пространства,
E – максимальная высота моделируемого пространства,
α – угол возвышения выходного патрубка ПЛС.

Рисунок 3 – Схема моделируемого пространства с разбиением на ячейки расчётной сетки

Параметры A, B, C, D, E, а также ширина W моделируемого пространства выбираются по результатам предварительных натурных испытаний так, чтобы обеспечить полный охват исследуемой струи и исключить влияние на её движение явлений, возникающих на границах расчётной сетки. В частности, $A \geq A_{min} = 1.5$ м, $B \geq B_{min}$ (расстояние от выходного отверстия ПЛС до наивысшей точки струи), $C \geq C_{min}$ (дальность струи с запасом не менее 5 м), $D \geq D_{min}$ (высота струи), $E \geq E_{min} \approx D_{min} + 2 \cdot A_{min}$, $W \geq W_{min} = 5$ м. Чем выше начальная скорость огнетушащего вещества, тем сильнее раздробление и распыл струи, и тем больший запас геометрических размеров пространства относительно указанных минимальных значений требуется.

Размеры ячеек расчётной сетки выбираются так, чтобы получить приемлемую точность моделирования с учётом явлений, оказывающих влияние на траекторию свободной струи. Малые отклонения параметров, описывающих поток огнетушащего вещества на выходе из ПЛС (профиль скорости, диаметр и форма выходного отверстия и т.д.) могут приводить к значительным изменениям выбранных целевых характеристик. Поэтому важно обеспечить в области моделируемого пространства высокую точность расчётов, в частности за счёт:

- использования внутри исследуемого ПЛС малых размеров ячеек расчётной сетки;
- уменьшения размеров ячеек расчётной сетки в областях исследуемого пространства, находящихся в непосредственной близости от стенок ПЛС (пристеночные области);
- использования на начальном участке траектории огнетушащего вещества (на выходе из ПЛС) размеров ячеек расчётной сетки, достаточных для представления его характерных геометрических особенностей.

Расчёт целевых характеристик по результатам моделирования и экспериментов (блоки 6 и 5 на рисунке 2) производится так, чтобы обеспечить согласование соответствующих вели-

чин. В данной работе для определения параметров струи огнетушащего вещества, представленных в таблице 1, использовались методы [16, 17].

Таблица 1 – Согласование целевых характеристик, определяемых по результатам моделирования и эксперимента

Характеристики	Способ оценки по результатам моделирования	Способ оценки по результатам эксперимента
Высота струи	Расстояние по вертикальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наивысшей точки расчётной сетки, в которой объёмная доля жидкой фазы превышает заданное граничное значение	Измеренное в ходе эксперимента расстояние по вертикальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наивысшей точки основного потока струи. Соответствующее расстояние, рассчитанное на основе цифровых изображений струи с использованием обратного перспективного преобразования по методике, представленной в [17]
Дальность струи	Расстояние по горизонтальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наиболее удалённой от него точки расчётной сетки, в которой объёмная доля жидкой фазы превышает заданное граничное значение на высоте, соответствующей поверхности моделируемого экспериментального полигона	Измеренное в ходе эксперимента расстояние по горизонтальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наиболее удалённой от него точки поверхности полигона, которой достигла струя. Соответствующее расстояние, рассчитанное на основе цифровых изображений струи с использованием обратного перспективного преобразования по методике, представленной в [17]
Верхняя граница струи	Линия (множество точек) максимальных скоростей потока огнетушащего вещества [16]	Верхняя граница визуально наиболее плотной части струи, определяемая на основе цифровых изображений с использованием обратного перспективного преобразования по методике, представленной в [17]

Валидация (блок 7 на рисунке 2) используемых МВГ производилась путём оценки точности (отклонений) результатов расчётов относительно полученных на основе натурных испытаний с соответствующими значениями исходных параметров.

Точность моделирования относительно результатов, полученных экспериментально, оценивалась на основе относительного отклонения (4) для простых целевых характеристик (высота и дальность струи) и среднеквадратического отклонения (5) – для сложных (верхняя граница струи).

$$RD=|X_e-X_m|/X_e \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $X_e \neq 0$ и X_m – значения простой целевой характеристики, полученные соответственно по результатам эксперимента и моделирования.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} | P_{e,i} - P_{m,i} |^2}, \quad (5)$$

где N – количество точек, а $P_{e,i}$ – координаты i-й точки верхней границы струи, построенной по результатам эксперимента; $P_{m,i}$ – координаты точки верхней границы струи, построенной по результатам моделирования, ближайшей к точке $P_{e,i}$.

Решение об изменении (усложнении) МВГ или их параметров принимается в зависимости от значений указанных отклонений. В качестве критериев достижения приемлемой точности (2) использовалось выполнение условий (6) и (7):

$$RD \leq 10\%, \quad (6)$$

$$RMSD \leq 1 \text{ м} \quad (7)$$

При невыполнении данных условий производится коррекция используемых моделей или их параметров и повторное выполнение численного расчёта целевых характеристик и вали-

дации. Для этого применялся алгоритм последовательного повышения вычислительной сложности путём увеличения количества решаемых на каждом временном шаге уравнений, описывающих динамику струи.

Окончательный выбор моделей и их параметров (блок 9, рисунок 2) производится среди конфигураций, удовлетворяющих критериям (1) и (2) и минимуму функции (3).

Современные ПЛС, позволяющие регулировать угол распыления струи огнетушащего вещества (в т.ч. роботизированные), имеют сложную геометрию насадков, для описания которых необходимо повышать количество ячеек расчётной сетки, что приводит к увеличению времени, требуемое для вычислений. В данной работе исследование выполнено в два этапа:

1) Первичный выбор МВГ и их параметров для решения задачи расчёта движения воды из ПЛС с простой геометрией и малым расходом огнетушащего вещества (РС-70) [13]. Валидация производилась на основе дальности и высоты траектории струи.
2) Оценка точности выбранных методов и их параметров при моделировании траектории струи воды из ПЛС со сложной геометрией (ЛС-П20У) [13] и высоким расходом огнетушащего вещества. Валидация производилась на основе дальности, высоты и верхней границы траектории струи.

2 Результаты

Для первичного выбора МВГ проведён расчёт траекторий свободных струй воды из ПЛС РС-70 для следующих значений управляющих параметров: угол возвышения 30^{o}, расход огнетушащего вещества 7,4 л/с, рабочее давление 0,4 МПа. Соответствующие значения дальности и высоты по экспериментальным замерам составили 32 м и 6,7 м. В таблице 2 и на рисунке 4 представлены полученные результаты с использованием различных наборов моделей вычислительной гидродинамики и их параметров.

Таблица 2 – Результаты моделирования траектории струи воды из пожарного ствола РС-70

Обозначение моделей	Время расчёта T, ч	Дальность L, м / Относительное отклонение RD, %	Высота h, м / Относительное отклонение RD, %	Свёртка F (3): α=0.5, $\beta(L)=\beta(h)$=0.25
а	11.5	30.5 / 4.7	6.9 / 3	0.672
б	**10.5**	**29.5 / 7.8**	**6.8 / 1.5**	**0.670**
в	11.5	29.5 / 7.8	6.8 / 1.5	0.712
г	11.5	22.3 / 30.3	5.9 / 11.9	1.534
д	13	19.2 / 40	4.9 / 26.9	2.214

а – модель турбулентности k-ε (здесь и далее модификация на основе ренормализованных групп (*ReNormalization Group, RNG* [14])) с демпфированием турбулентности, модель фазового взаимодействия *VOF* с ограничением объёмной доли жидкости 10^{-8}.

б – модель турбулентности k-ε с демпфированием турбулентности, модель фазового взаимодействия *VOF* с ограничением объёмной доли жидкости 10^{-6}.

в – модель турбулентности k-ε с демпфированием турбулентности, модель фазового взаимодействия *VOF* с учётом неявных сил и ограничением объёмной доли жидкости 10^{-6}.

г – модель турбулентности k-ω (здесь и далее модификация с использованием метода переноса сдвиговых напряжений (*Shear Stress Transport, SST* [15])), модель фазового взаимодействия *VOF* с ограничением объёмной доли жидкости 10^{-6}.

д – модель турбулентности k-ε, модель фазового взаимодействия Эйлера.

Время расчёта в таблице 2 соответствует модельному времени 7 с., выбранному с запасом, исходя из момента достижения струёй устойчивого режима, при котором отсутствуют значительные изменения целевых характеристик. Как следует из полученных результатов, условию (6) удовлетворяют только траектории, построенные на основе совместного использования моделей *k*-ε и *VOF* с различными настроечными параметрами. Минимальное значение функции (3) обеспечивается для схемы с ограничением объёмной доли жидкости 10^{-6} и без учёта неявных сил (таблица 2, б), поэтому она выбрана в качестве базовой для дальнейших вычислений.

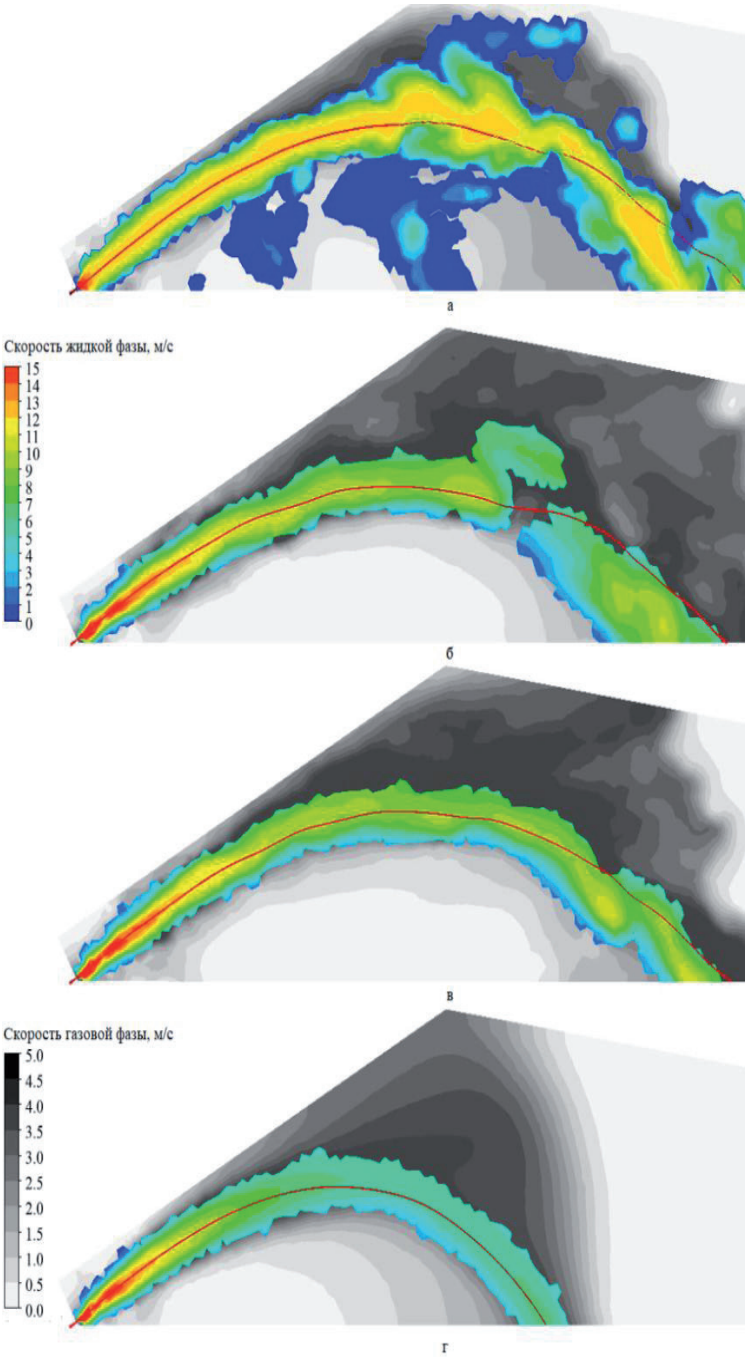


Рисунок 4 – Поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскости симметрии пожарного ствола РС-70 и линии потока (красные линии)

Существенные отклонения целевых характеристик, полученные с использованием моделей *k*-ω и Эйлера (г и д, таблица 2), можно объяснить подбором значений их параметров, не соответствующих особенностям исследуемых процессов. Однако, даже для таких настроек при достаточно большом времени расчёта наблюдаются слабо (по сравнению со схемами *k*-ε+*VOF*) выраженные турбулентность и явления распада сплошного потока (рисунок 4) вследствие значительного снижения скоростей движения жидкой фазы на начальном участке.

Оценка точности моделей а, б, в, д при решении задачи построения траектории струи из ПЛС со сложной геометрией производилась на основе натурных испытаний, проведённых на экспериментальном полигоне Сибирской пожарно-спасательной академии. На рисунке 5 представлены фрагменты изображений воды из ЛС-П20У, полученные для следующих значений управляющих параметров: угол возвышения выходного патрубка 60°, расход огнетушащего вещества 14,3 л/с, рабочее давление 0,27 МПа.

В верхней части рисунка 5 представлен фрагмент цифровой фотографии потока огнетушащего вещества после предварительной обработки, а в нижней – после выделения верхней и нижней границ на базе методики [17] и её программной реализации.

На рисунке 6 изображены поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскостью симметрии выходного патрубка, полученные по результатам численного расчёта на основе *k*-ε и *VOF* с использованием модели с параметрами, соответствующими проведённым натурным испытаниям.

На рисунке 7 представлены совмещённые кривые, соответствующие верхним границам струи, которые построены на основе эксперимента (с использованием обратных перспективных преобразований [17] с учётом расположения камеры относительно ПЛС и углов её наклона по координатным осям полигона) и моделирования (линия максимальных скоростей потока [16]), а в таблице 3 приведены результаты валидации. Из таблицы 3 видно, что условия (6) и (7) выполняются для всех представленных характеристик, что соответствует приемлемой точности модели. Время расчёта составило 10 часов, что также удовлетворяет принятым целевым критериям.

Рисунок 5 – Фрагменты изображения струи огнетушащего вещества из ПЛС после предварительной обработки (вверху) и выделения границ (внизу)

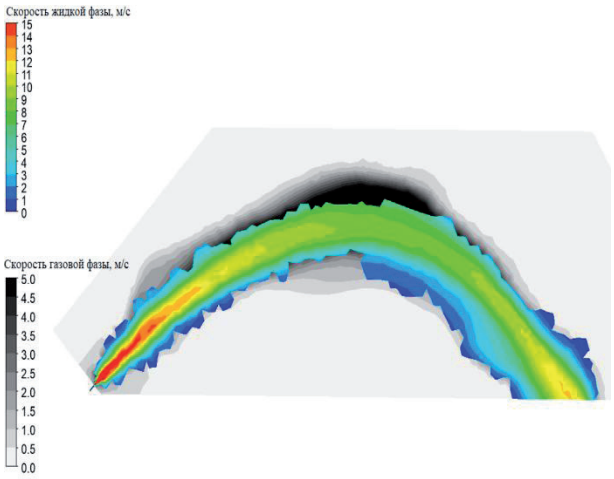


Рисунок 6 – Поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскостью симметрии выходного патрубка ЛС-П20У

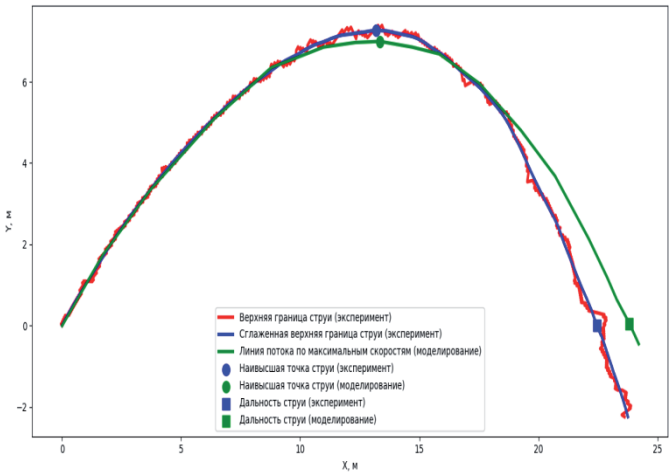


Рисунок 7 – Верхние границы струи, полученные по результатам эксперимента и моделирования

Таблица 3 – Оценка точности моделирования относительно результатов эксперимента

Характеристики	Эксперимент, м	Моделирование, м	Отклонение *RD* / *RMSD*	Выполнение условий (6) и (7)
Высота	7.3	7	4.1%	4.1% ≤ 10%
Дальность	22.5	23.8	5.8%	5.8% ≤ 10%
Верхняя граница струи	См. рисунок 7		0.42 м	0.42 м ≤ 1 м

Заключение

Представленная схема выбора МВГ позволяет определять соответствующие модели, а также значения настроечных параметров, обеспечивающие приемлемые точность и скорость расчёта траекторий свободных струй из ПЛС, и может использоваться при разработке и совершенствовании исполнительных и управляющих устройств и алгоритмов.

Численные расчёты траекторий струй воды, проведённые с использованием выбранных методов, показали высокую точность и скорость расчёта. В моделируемых потоках огнетушащего вещества отмечено наличие характерных явлений, которые наблюдались при натурных испытаниях: колебания, раздробление и распыление струи.

Список источников

[1] ***Jankee G.K., Ganapathisubramani B.*** Scalings for rectangular synthetic jet trajectory in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. 915. P.A57. DOI: 10.1017/jfm.2020.1142.

[2] ***Пожаркова И.Н.*** Оценка эффективности применения сетей Колмогорова-Арнольда в задачах управления пожарными роботами. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2024. № 7. С.33-41.

[3] ***Muralha A., Melo J.F., Ramos H.M.*** Assessment of CFD solvers and turbulent models for water free jets in spillways. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 104. DOI: 10.3390/fluids5030104.

[4] ***Lee M., Park G., Park C., Kim C.*** Improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 2020(1). P.8827936. DOI: 10.1155/2020/8827936.

[5] ***Li S.J., Zhu L.T., Zhang X.B., Luo Z.H***. Recent advances in CFD simulations of multiphase flow processes with phase change. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. Vol.62(28). P.10729-10786. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c00706.

[6] ***Liu Z. et al***. Numerical study on primary breakup of disturbed liquid jet sprays using a VOF model and LES method. *Processes*. 2022. 10(6). P. 1148. DOI: 10.3390/pr10061148.

[7] ***Shynybayeva A., Rojas-Solórzano L.R.*** Eulerian–Eulerian modeling of multiphase flow in horizontal annuli: Current limitations and challenges. *Processes*. 2020. 8(11). P. 1426. DOI: 10.3390/pr8111426.

[8] ***Octau C. et al.*** Liquid–solid two-phase jet in a turbulent crossflow: Experiments and simulations. *Chemical engineering research and design*. 2020. 155. P. 156-171. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.01.004.

[9] ***Jin W. et al.*** Three-dimensional simulation of impinging jet atomization of soft mist inhalers using the hybrid VOF-DPM model. *Powder Technology*. 2022. 407. P. 117622. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117622.

[10] ***Garoosi F., Mahdi T.F.*** New benchmark problems for validation and verification of incompressible multi-fluid flows based on the improved Volume-Of-Fluid (VOF) method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. 648. P. 129313. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129313.

[11] ***Höhne T., Porombka P., Moya Sáez S.*** Validation of AIAD sub-models for advanced numerical modelling of horizontal two-phase flows. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 102. DOI: 10.3390/fluids5030102.

[12] ***Setoodeh H. et al.*** CFD-modelling of boiling in a heated pipe including flow pattern transition. *Applied Thermal Engineering*. 2022. 204. P. 117962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117962.

[13] ***Горбань Ю.И.*** Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной охране. М.: Пожнаука. 2013. 351 с.

[14] ***Xiao J. et al.*** Assessment of different CFD modeling and solving approaches for a supersonic steam ejector simulation. *Atmosphere*. 2022. 13(1). P. 144. DOI: 10.3390/atmos13010144.

[15] ***Lewak M.W., Tępiński J., Klapsa W.*** The use of the k-ω SST turbulence model for mathematical modeling of jet fire. *Safety & Fire Technology*. 2022. 59(1). P. 28-40. DOI: 10.12845/sft.59.1.2022.1.

[16] ***Пожаркова И.Н.*** Алгоритмы построения потоковых характеристик свободных струй по результатам численного моделирования. *Информационные технологии*. 2024. №9(30). С.443-448. DOI:10.17587/it.30.443-448.

[17] ***Пожаркова И.Н.*** Распознавание траекторий струй огнетушащего вещества из пожарного ствола на основе цифровых изображений. *Программные продукты и системы*. 2024. № 2. С.262-269. DOI: 10.15827/0236-235X.142.262-269.

Сведения об авторе

Пожаркова Ирина Николаевна, 1981 г. рождения. Окончила Красноярский государственный технический университет в 2003 г., к.т.н. (2009). Профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, докторант, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. В списке научных трудов около 150 работ. ORCID: 0000-0003-1153-350X; Author ID (РИНЦ): 501137; Author ID (Scopus): 55990913900; Researcher ID (WoS): A-7628-2015. *pozharkova@mail.ru.*

Поступила в редакцию 05.11.2024, после рецензирования 24.02.2025. Принята к публикации 11.03.2025.

CC BY

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-270-280

Selection of numerical methods for modeling free jets from a fire nozzle

© 2025, I.N. Pozharkova[1,2]

[1] *Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia*

[2] *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

Abstract

Computational fluid dynamics methods enable the estimation of gas-liquid flow characteristics, particularly free jets, while accounting for various phenomena. The jets analyzed in this paper exhibit significant geometric dimensions and high initial velocities, which increase the computational complexity of the models used and extend their calculation time. The selection of numerical methods and their tuning parameters is based on a step-by-step increase in computational complexity to a level that meets quality criteria: ensuring an acceptable calculation time relative to the problem being solved and achieving accuracy determined by the deviation of the obtained results from the experimental target characteristics of the jets. The selection stages are outlined, including an experiment to evaluate the accuracy of the considered methods and the principles for aligning experimental and calculated characteristics for validation. The efficiency of the proposed selection scheme is demonstrated using the example of modeling free jets of fire extinguishing agent from a fire nozzle. The results of full-scale tests and calculations based on the selected models, conducted at the testing ground, are presented. The novelty lies in the formalization of computational fluid dynamics methods that ensure acceptable accuracy and calculation time for determining the trajectories of free jets relative to target characteristics. These methods can be applied in the development of automated systems for guiding the flow of fire extinguishing agent from a fire robot nozzle to specified areas of the protected space.

Keywords: *modeling, model accuracy, computation time, free jets, multiphase flows, computational fluid dynamics, fire extinguishing agent, fire nozzle.*

For citation: *Pozharkova IN.* Selection of numerical methods for modeling free jets from a fire nozzle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 270-280. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-270-280.

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

List of figures and tables

Figure 1 - Diagram of the free jet of fire extinguishing agent from a fire nozzle
Figure 2 - Diagram of selection of computational dynamics methods and their parameters for modeling free jets
Figure 3 - Diagram of the modeled space with division into cells of the computational grid
Figure 4 - Velocity fields of liquid and gas phases in the section of the vertical plane of symmetry of the PC-70 fire nozzle and flow line (red lines)
Figure 5 - Images of the fire extinguishing agent jet from the fire monitor after pretreatment (from above) and delineation (from below)
Figure 6 - Velocity fields of liquid and gas phases in the cross-section of the vertical plane of symmetry of the outlet branch pipe LS-P20U
Figure 7 - Upper jet limits obtained from experimental and modeling results
Table 1 - Target characteristics determined by the results of modeling and experiment
Table 2 - Results of modeling the water jet trajectory from the fire nozzle PC-70
Table 3 - Evaluation of modeling accuracy relative to the experimental results

References

[1] ***Jankee GK, Ganapathisubramani B.*** Scalings for rectangular synthetic jet trajectory in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. 915. P. A57. DOI: 10.1017/jfm.2020.1142.

[2] ***Pozharkova IN.*** Evaluation of Kolmogorov-Arnold networks efficiency in fire control tasks [In Russian]. *Devices and Systems. Control, monitoring, diagnostics*. 2024. № 7. P. 33-41.

[3] ***Muralha A, Melo JF, Ramos HM.*** Assessment of CFD solvers and turbulent models for water free jets in spillways. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 104. DOI: 10.3390/fluids5030104.
[4] ***Lee M, Park G, Park C, Kim C.*** Improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 2020(1). P.8827936. DOI: 10.1155/2020/8827936.
[5] ***Li SJ, Zhu LT, Zhang XB, Luo ZH***. Recent advances in CFD simulations of multiphase flow processes with phase change. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023; 62(28): 10729-10786. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c00706.
[6] ***Liu Z. et al***. Numerical study on primary breakup of disturbed liquid jet sprays using a VOF model and LES method. *Processes*. 2022. 10(6). P.1148. DOI: 10.3390/pr10061148.
[7] ***Shynybayeva A, Rojas-Solórzano LR.*** Eulerian–Eulerian modeling of multiphase flow in horizontal annuli: Current limitations and challenges. *Processes*. 2020. 8(11). P.1426. DOI: 10.3390/pr8111426.
[8] ***Octau C. et al.*** Liquid–solid two-phase jet in a turbulent crossflow: Experiments and simulations. *Chemical engineering research and design*. 2020; 155: 156-171. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.01.004.
[9] ***Jin W. et al.*** Three-dimensional simulation of impinging jet atomization of soft mist inhalers using the hybrid VOF-DPM model. *Powder Technology*. 2022; 407. P.117622. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117622.
[10] ***Garoosi F, Mahdi TF.*** New benchmark problems for validation and verification of incompressible multi-fluid flows based on the improved Volume-Of-Fluid (VOF) method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. 648. P.129313. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129313.
[11] ***Höhne T, Porombka P, Moya Sáez S.*** Validation of AIAD sub-models for advanced numerical modelling of horizontal two-phase flows. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 102. DOI: 10.3390/fluids5030102.
[12] ***Setoodeh H. et al.*** CFD-modelling of boiling in a heated pipe including flow pattern transition. *Applied Thermal Engineering*. 2022. 204. P.117962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117962.
[13] ***Gorban Yu.I.*** Fire robots and barrel equipment in the fire department. [In Russian]. Moscow: Pozhnauka. 2013. 351 c.
[14] ***Xiao J. et al.*** Assessment of different CFD modeling and solving approaches for a supersonic steam ejector simulation. *Atmosphere*. 2022. 13(1). P.144. DOI: 10.3390/atmos13010144.
[15] ***Lewak MW, Tępiński J, Klapsa W.*** The use of the k-ω SST turbulence model for mathematical modeling of jet fire. *Safety & Fire Technology*. 2022. 59(1). P. 28-40. DOI: 10.12845/sft.59.1.2022.1.
[16] ***Pozharkova IN.*** Algorithms for constructing flow characteristics of free jets based on the results of numerical modeling [In Russian]. *Information technology*. 2024; 9(30): 443-448. DOI: 10.17587/it.30.443-448.
[17] ***Pozharkova I.N.*** Recognition of fire extinguishing agent jet trajectories from a fire nozzle based on digital images [In Russian]. *Software products and systems*. 2024; 2: 262-269. DOI: 10.15827/0236-235X.142.262-269.

About the author

Irina Nikolaevna Pozharkova (b. 1981) graduated from Krasnoyarsk State Technical University (Krasnoyarsk, Russia) in 2003, PhD (2009). She is a Professor at Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia (Department of engineering and technical expertise and forensics). She is an associate professor at Siberian Federal University (Department of automation systems, automatic control and design). She is a co-author of about 150 scientific articles and abstracts. ORCID: 0000-0003-1153-350X; Author ID (RSCI): 501137; Author ID (Scopus): 55990913900; Researcher ID (WoS): A-7628-2015. *pozharkova@mail.ru*.

Received November 5, 2024. Revised February 24, 2025. Accepted March 11, 2025.

УДК 004.83+005.8 *Научная статья* DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-281-294

Система поддержки принятия решений для выбора профиля обучения

© 2025, Е.Б. Старцева[1], Н.О. Никулина[2]✉, А.И. Малахова[1]

[1]Уфимский университет науки и технологий (УУНиТ), Уфа, Россия
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация

Рассматривается подход, позволяющий сделать обоснованный выбор профиля обучения в образовательной организации. Информационные средства образовательных организаций, предоставляющие поддержку пользователям-абитуриентам, основаны на правилах приёма, направлениях обучения и данных о средних баллах поступивших в предыдущие годы. В работе предлагается при выборе профиля обучения учитывать результаты тестирования по Холланду, а полученные данные использовать в правилах выбора профиля обучения в системе поддержки принятия решений. Решение о подходящем пользователю профиле обучения принимается последовательно с учётом степени уверенности в его правильности. Это позволяет предоставить пользователю поддержку: сориентировать пользователя по правилам поступления в образовательную организацию; определить приоритетное направление обучения в соответствии с укрупнёнными группами специальностей и направлений; определить наиболее подходящий профиль в выбранном направлении обучения. Новизна предложенного подхода состоит в сопоставлении шести основных психологических профилей, выделенных по методу Холланда, с направлениями обучения в образовательной организации. По результатам сопоставления формируется база знаний в виде правил принятия решений. Оценка возможных вариантов решений осуществляется с использованием лингвистических переменных, отражающих степень уверенности пользователя в предложенном информационной системой выборе. Для повышения адекватности системы поддержки принятия решений модель процесса принятия решений корректируется при формировании правил принятия решений.

Ключевые слова: *профиль обучения, направление обучения, психологический профиль по Холланду, правила принятия решений, база знаний, онтология, система поддержки принятия решений.*

Цитирование: *Старцева Е.Б., Никулина Н.О., Малахова А.И.* Система поддержки принятия решений для выбора профиля обучения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.281-294. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-281-294.

Вклад авторов: Старцева Е.Б. – постановка задачи исследования, формирование правил принятия решений; Никулина Н.О. – методические основы исследования, моделирование процесса принятия решений, анализ результатов исследования; Малахова А.И. – разработка онтологической модели, формирование правил принятия решений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В современном образовании растёт число направлений обучения. Активно включаются в образовательные процессы учебные центры предприятий, корпоративные университеты. Достижения науки и технологий обусловили рост количества образовательных программ и их быструю сменяемость, что осложняет оптимальный выбор профиля обучения для всех заинтересованных сторон. К заинтересованным сторонам относятся: лица, получающие образование впервые; лица, проходящие профессиональную переподготовку или повышающие квалификацию; специалисты служб управления персоналом, подбирающие сотрудников в соответствии с потребностями компании; образовательные организации (ОО), в т.ч. учебные центры производственных предприятий. Поддержка принятия решений (ППР) в виде систе-

мы (СППР) может позволить сделать обоснованный выбор профиля обучения или подобрать специалиста требуемой квалификации.

Индивидуальные траектории обучения в четырёх- шестилетних образовательных программах сложно осуществить в условиях зарегулированной стандартами системы образования. Направления обучения в высших учебных заведениях (вуз) часто схожи между собой, и для обучающегося различия могут проявиться только на старших курсах. Поэтому важно подобрать то направление обучения, которое в наибольшей степени отвечало бы интересам обучающегося, вуза и будущего работодателя.

Работодателям важны не только профессиональные качества работника, но и его умения и навыки социального общения и взаимодействия в команде, способность быстро адаптироваться к новым условиям деятельности, получать и усваивать новые знания, так называемые «мягкие навыки». Обсуждается необходимость включения в приложение к диплому о высшем образовании информации о сформированных социальных навыках, например, умение работать в команде или способность вести переговоры[1].

«Высшее образование должно удерживать баланс между фундаментальностью и применимостью знаний в условиях меняющихся задач на рынке труда. Для этого наряду с фундаментальностью, которая обеспечивает выпускнику широкий кругозор и одновременно глубокие профессиональные знания, нужно обеспечить гибкость образовательных программ»[2]. С этой целью вносятся изменения в перечень специальностей и направлений подготовки высшего образования (укрупненные группы специальностей и направлений, УГСН)[3], расширяется спектр программ целевого обучения [1].

Вопросы повышения мотивации обучающихся обсуждаются в научном и педагогическом сообществе [2], их предлагается решать с использованием современных информационных технологий обучения, в т.ч. с применением средств искусственного интеллекта [3]. Описанный в [3] подход существенно облегчает и делает прозрачным процесс приёма в вуз как для абитуриентов, так и для приёмных комиссий. Результаты исследований показывают, что мотивация обучающихся со временем может изменяться в ходе образовательного процесса в силу различных причин, в т.ч. при приобретении новых знаний [2].

Для обоснованного выбора профиля обучения предлагается использовать СППР, которая позволит каждому выбирающему образовательную траекторию найти ответы на свои вопросы. Выбор профиля обучения может быть актуальным для школьника и для специалиста, решившего сменить вид деятельности и пройти профессиональную переподготовку.

Выявлению и развитию индивидуальных предпочтений и предрасположенности к определённому виду деятельности могут способствовать результаты тестирования по методу Холланда [4], который часто используется для профессиональной ориентации абитуриентов, а также при приёме на работу [5, 6]. Выделены шесть рабочих стилей деятельности (профилей), присущих человеку в зависимости от его психологических особенностей и предпочтений [4]:

1) реалистический профиль (предметная деятельность с материальными объектами реального мира);
2) исследовательский профиль;
3) артистический профиль (деятельность, направленная на создание художественных произведений);
4) социальный профиль (деятельность, связанная преимущественно с взаимодействием с людьми);
5) предпринимательский профиль;
6) конформистский профиль (строго формализованная деятельность).

[1] *Ячменникова П.* Дипломы развернут к работодателю. Минобрнауки готовит новый формат документов о высшем образовании. Газета «Коммерсантъ» №100/П от 10.06.2024, с.5. https://www.kommersant.ru/doc/6760703.

[2] Доклад министра науки и высшего образования РФ В. Фалькова на заседании Совета Федерации. 05.06.2024. https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/84010/.

[3] Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 01.02.2022 № 89. «Об утверждении перечня специальностей и направлений подготовки высшего образования по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, программам ординатуры и программам ассистентуры-стажировки». Москва: Минобрнауки России. Дата опубликования: 03.03.2022. 44 с. http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203030033.

1 Этапы принятия решений при выборе профиля обучения

Подготовка специалистов в вузах основана на следующих стандартах и разработанных в соответствии с ними нормативных документах.

- Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО)[4] по каждой специальности и направлению подготовки.
- Профессиональные стандарты[5], содержащие перечни трудовых функций в соответствии с квалификацией, получаемой выпускником вуза.
- Основные профессиональные образовательные программы (ОПОП), разрабатываемые вузом в соответствии ФГОС ВО и профессиональными стандартами.
- Учебные планы ОПОП, содержащие сведения об области профессиональной деятельности, наборе изучаемых дисциплин, а также перечень компетенций выпускника данной ОПОП.

В каждом ФГОС содержится перечень профессиональных стандартов, соответствующих профессиональной деятельности выпускников, освоивших ОПОП по определённому направлению обучения, входящему в соответствующую УГСН. Например, областью профессиональной деятельности для УГСН 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» является 06 «Связь, информационные и коммуникационные технологии». В этой области профессиональной деятельности разработано более полутора десятков профессиональных стандартов. При этом для разных направлений обучения по программе бакалавриата перечни профессиональных стандартов, соответствующих профессиональной деятельности выпускников, частично совпадают; общими для всех направлений обучения являются только профессиональные стандарты 06.001 «Программист» и 06.022 «Системный аналитик». В профессиональном стандарте закреплён набор трудовых функций и составляющих их трудовых действий специалиста определённой квалификации. Профессиональные компетенции выпускника, соответствующие профессиональному стандарту 06.001 «Программист» для направления подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика», приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Соответствие профессиональных компетенций выпускника трудовым функциям

Основная трудовая функция	Трудовые функции	Профессиональные компетенции выпускника
Разработка требований и проектирование программного обеспечения	• Анализ возможностей реализации требований к компьютерному программному обеспечению • Разработка технических спецификаций на программные компоненты и их взаимодействие • Проектирование компьютерного программного обеспечения	• Выполняет разработку технических спецификаций на программные компоненты и их взаимодействие, реализует спецификации при проектировании программных компонентов информационных систем • Выполняет анализ возможностей и верификацию результатов реализации требований к компьютерному программному обеспечению

Анализ информации, содержащейся в ФГОС ВО, ОПОП и профессиональных стандартах, часто не под силу абитуриенту, поэтому задача выбора профиля обучения чаще всего решается им последовательно.

1) формируется список желаемых вузов и изучаются правила поступления, опубликованные на их сайтах. Правила поступления основаны на Законе об образовании[6] и носят наиболее общий характер. Правила поступления в вуз могут отличаться набором вступительных испытаний и учётом дополнительных достижений абитуриента.
2) для каждого вуза формируется перечень желаемых направлений обучения (специальностей).
3) для выбранного направления обучения оцениваются возможности поступления на основе опубликованных вузом сведений о приёме в предыдущие годы и среднего балла поступивших.

Перед абитуриентом при решении задачи выбора профиля обучения возникают сложности, связанные с недостаточностью знаний об особенностях обучения в выбранном вузе. Например, направления обучения (специальности) в разных вузах имеют одинаковые названия, что продиктовано требованиями УГСН, но содержание ОПОП может различаться в за-

[4] Портал Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования. https://fgosvo.ru/.
[5] Реестр профессиональных стандартов. https://profstandart.rosmintrud.ru/.
[6] Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 № 273-ФЗ.

висимости от прикладной области, с которой связан конкретный вуз. Эти отличия в полной мере раскрываются в профилях обучения (специализациях), которых может быть несколько. Профили обучения ориентированы на подготовку выпускников узкой направленности, часто в зависимости от требований потенциальных работодателей региона, в котором находится вуз [1, 7]. Поэтому у абитуриентов часто возникают вопросы об отличиях ОПОП, для ответа на которые необходим анализ стандартов и нормативных документов и/или консультация специалистов приёмной комиссии вуза. Зачастую на подобных консультациях абитуриент получает формальные ответы об особенностях подготовки выпускников в вузе, а работники приёмной комиссий редко интересуются склонностями и предпочтениями абитуриента.

2 Подход к выбору профиля обучения

Предлагаемый подход с использованием профориентационного тестирования по методу Холланда [4] основан на следующем.

1) каждый абитуриент обладает психологическими особенностями, которые могут помочь или препятствовать ему при получении образования по определённому направлению обучения.
2) каждый абитуриент обладает склонностями и способностями к выполнению определённых трудовых функций, которые можно развить в процессе обучения.
3) выпускник вуза в соответствии с полученным образованием обладает набором профессиональных компетенций.
4) набор профессиональных компетенций выпускника соответствует трудовым функциям, закреплённым в профессиональном стандарте.

Направление обучения УГСН соответствует психологическому профилю «идеального» выпускника, успешно обучавшегося от первого до последнего курса и способного выполнять трудовые функции на высоком профессиональном уровне, не испытывая психологического дискомфорта. Требуется сопоставить психологические профили [4] с направлениями обучения УГСН на основе результатов анализа профессиональных компетенций, получаемых обучающимися в результате освоения ОПОП, и профессионального стандарта, соответствующего области деятельности.

Слабое соответствие (несоответствие) психологического профиля абитуриента выбранному направлению обучения может привести к неудовлетворённости обучающегося в ходе образовательного процесса, низкой успеваемости, а в дальнейшем к психологической неудовлетворённости профессиональной деятельностью или неспособности выполнять трудовые функции.

При создании СППР для сопоставления психологических профилей с направлениями обучения в вузе в качестве экспертов были приглашены руководители учебно-методических отделов вузов, методисты выпускающих кафедр, члены приёмных комиссий. Исходными данными для указанной задачи, помимо нормативных документов, являются:

- требования к выпускникам вуза, предъявляемые работодателями отрасли;
- описание психологических профилей по [4], содержащее перечень рекомендуемых профессий и области профессиональной деятельности.

Трудовые функции и действия, приведённые в профессиональном стандарте, описывают характер профессиональной деятельности. Для выполнения трудовых функций могут требоваться навыки, степень выраженности которых обусловлена природной склонностью к выполнению этих функций. Каждое направление обучения эксперты оценивали по степени его соответствия описанию психологического профиля, учитывая специфику обучения в вузе и требования потенциальных работодателей.

Например, исходя из набора компетенций, характеристик трудовых функций и сложившихся требований работодателя к выпускникам, опираясь на описание психологических профилей, экспертами сделан вывод, что наиболее успешными в процессе обучения по направлениям подготовки бакалавров УГСН 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» и дальнейшей профессиональной деятельности будут абитуриенты со следующими преобладающими психологическими профилями: 1) реалистический профиль; 2) исследовательский; 3) конформистский.

Предложенный подход используется на этапе построения онтологической базы знаний (БЗ) СППР. Онтологическая БЗ формируется в виде правил принятия решений, при этом оценка возможных вариантов решений выполняется с использованием лингвистических переменных, отражающих степень уверенности эксперта в предложенном выборе.

Алгоритм ППР представлен на рисунке 1 в виде процессной диаграммы, на которой выделены этапы выбора профиля обучения.

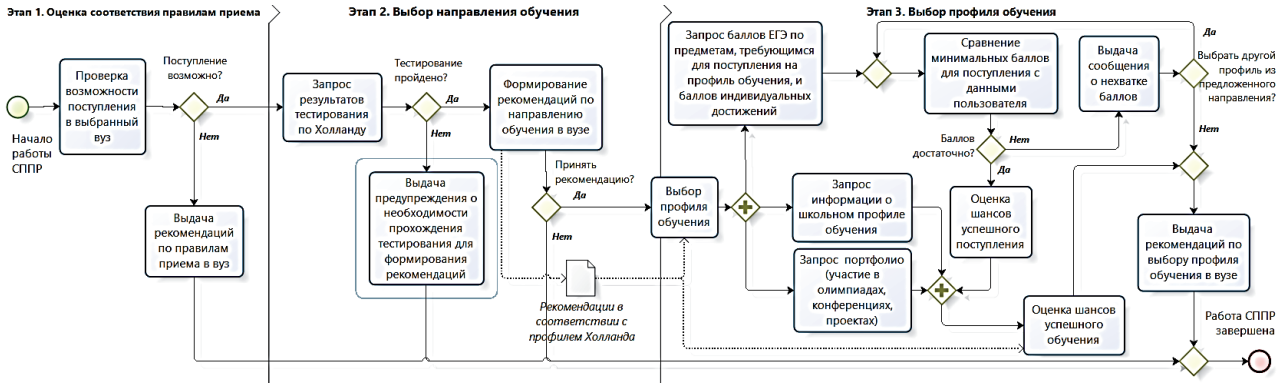


Рисунок 1 – Алгоритм поддержки принятия решений при выборе профиля обучения

Абитуриенту предлагается пройти тестирование по [4] для выявления склонностей и предпочтений в той или иной сфере деятельности. Пользователь перед работой в СППР предупреждается, что ему будут предложены рекомендации по выбору профиля обучения, точность которых зависит от полноты предоставленной информации. Результаты тестирования влияют на рекомендации СППР о прогнозе успешности обучения. В случае несоответствия или слабого соответствия психологического профиля пользователя выбранному направлению обучения СППР рекомендует другие направления обучения, имеющиеся в вузе, или выдаёт сообщение о том, что подходящих направлений обучения в данном вузе нет. Решение о выборе профиля обучения абитуриент принимает самостоятельно.

3 Формирование правил в базе знаний

Предложенный подход опробован в Университете Аликанте (Испания[7]) [8, 9], предоставившем полный набор данных, необходимых для проведения онтологического анализа и формирования правил принятия решений. Выбор профиля обучения – это итеративный процесс, поэтому в предлагаемой СППР задача решается поэтапно с возможностью многократного прохождения этапов до достижения требуемой степени уверенности в принятом решении. СППР должна оказывать помощь на разных этапах: 1) сориентировать пользователя относительно правил поступления в выбранный вуз; 2) оказать поддержку в процессе определения приоритетного направления обучения в вузе; 3) помочь определиться с профилем в выбранном направлении обучения.

На первом этапе ППР используются правила поступления и существующие в Испании стандарты обучения (*LOMCE*) [10] (аналог в России – ФГОС ВО), в соответствии с которыми определяются условия, необходимые для поступления; учитываются индивидуальные предпочтения и результаты расчётов синтетического вступительного показателя (*Prueba de acceso a la universidad – PAU*) [9]. В России показателю *PAU* соответствует средний балл результатов Единого государственного экзамена.

[7] Проблема выбора профиля обучения имеет много общего в России и в Испании, хотя в процессе её решения и есть особенности, обусловленные различиями в системах высшего образования и процедурах приёма на обучение.

На втором этапе ППР правила ориентируют на выбор УГСН (аналогично России).

На третьем этапе ППР по выбранной УГСН абитуриенту даются рекомендации по выбору конкретного профиля обучения с учётом полученного им балла *PAU*.

Наибольшую сложность при формировании БЗ СППР представляет этап извлечения, формализации и обработки информации об альтернативах, критериях выбора и системах предпочтений пользователей. Альтернативами являются направления обучения в вузе. Оптимальной альтернативой для абитуриента будет являться та, которая позволит ему реализовать свой потенциал с учётом индивидуальных предпочтений, психологических особенностей, интеллектуальных возможностей и набранных для поступления баллов.

В качестве критериев выбора рассматриваются [11]:

- психологический профиль по [4], полученный путём анкетирования и показывающий предрасположенность абитуриента к определённому направлению обучения или профессии (*HollandTestProfile*);
- направление школьного обучения в старших классах (*MajorHS*);
- университетская специальность (*MajorUni*);
- проходной балл при поступлении на университетскую специальность (*CutOffMark*);
- результат вступительных испытаний *PAU* (*EntranceMark*);
- вступительный экзамен по предмету (*EntranceExam*);
- перспектива развития специальности в соответствии с прогнозом развития рынка труда (*FCPerspective*);
- направление обучения в университете, как совокупность «родственных» специальностей (*StudyField*).

Указанные критерии проранжированы по значимости с использованием экспертных оценок по методу анализа иерархий [12]. Результаты расчётов по ранжированию критериев [11] показали, что первостепенную значимость при выборе направления обучения в университете приобретает тестирование по [4], которое позволяет определить предрасположенность абитуриента к конкретной профессиональной деятельности.

На основе оценки критериев построена их иерархия, являющаяся основой цепочки логического вывода, представленной в правилах принятия решений по выбору направления и профиля обучения. Для обработки результатов и построения онтологии использовался редактор онтологий *Protége* 5.0[8]. Критерии включены в онтологическую модель принятия решений по выбору профиля обучения в виде классов [9, 11].

Процедура извлечения информации о возможностях абитуриентов при поступлении в университет, особенностях обучения студентов и дальнейшего трудоустройства выпускников основана на статистическом анализе данных обо всех аспектах и этапах образовательного процесса. Извлечение данной информации осуществлялось путём интервьюирования экспертов по каждому направлению обучения, предлагаемому вузом, а также путём анализа информации, размещённой в открытом доступе на сайте вуза.

В [9, 13] предложен подход к построению СППР на основе инженерии знаний, включающий алгоритмы формирования рекомендаций по принятию решений о выборе профиля обучения. Для формирования рекомендаций предложено использовать метод прогрессивных рассуждений [14], основанный на выделении в процессе принятия решений по выбору профиля обучения трёх названных этапов ППР. При построении БЗ экспертами формируются оценки возможных вариантов решений с использованием лингвистических переменных. Знания, логическая система которых упорядочена, представлены в модуле правил. Это множество правил содержит правила приёма в вуз, правила выбора направления обучения и правила выбора конкретного профиля обучения [13].

На этапе разработки БЗ повышается адекватность модели процесса принятия решений по выбору профиля обучения, поскольку при определении правил СППР вносятся изменения в модель. Процесс разработки онтологической модели подробно описан в [9], формирование отношений между классами выполнен совместно с экспертами вуза.

[8] Официальная документация Protégé. http://protegewiki.stanfotd.edu/index.php/ProtegeUserDocs.

4 Пример применения СППР

Правила принятия решений при выборе профиля обучения разработаны в соответствии с результатами процессного моделирования (рисунок 1) и онтологического анализа. Для формирования правил в работе использован язык *Semantic Web Rule Language (SWRL)*[9]. При формировании условной части и заключения в правиле используются объекты онтологии *OWL DL* (*OWL* классы сущностей и их свойства, примеры сущностей и отношения между ними). Полученные правила записаны на языке *SWRL* в виде дизъюнктов Хорна. В соответствии с результатами моделирования сформированы правила (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Классы правил, используемых в СППР

Классы правил	Примеры правил
Правила поступления в вуз	ApplicationRule(?a), Uncertainty_factor(?c), has_value(?c, "Quite_sure"), Applicant(?x), UniversityStudyField(?y), aimsToEnter(?x, ?y), EntranceExam(?z) ->hasToPass(?x, ?z)
Правила поступления на направление обучения	StudyFieldSuccessStudyRule(?a), Uncertainty_factor(?c), has_value(?c, "Quite_sure"), Applicant(?x), UniversityStudyField(?y), aimsToEnter(?x, ?y), ProfileSocial(?z), hasHollandTestProfile(?x, ?z), isRecommendedToChoose(?y, ?w) -> C.C._SOCIALES_Y_JURÍDICAS(?w)
Правила успешности обучения на выбранном направлении	MajorUniSuccessApplicationRule(?a), Uncertainty_factor(?c), has_value(?c, "Sure"), Applicant(?x), QUÍMICA(?y), aimsToEnter(?x, ?y), EntranceMark(?z), hasEntranceMark(?x, ?z), CutOffMark(?w), hasCutOffMark(?y, ?w), has_value(?w, "10.342"), greaterThan(?z, ?w), EntrancePossibility(?b), hasEntrancePossibility(?x, ?b) ->has_value(?b, "high")

Практические задачи содержат чёткие условия и некоторую нечёткость цели в связи с тем, что их постановку осуществляет человек. Учёт фактора неопределённости при решении задач во многом изменяет методы принятия решения: изменяется принцип представления исходных данных и параметров модели, становятся неоднозначными понятия решения задачи и оптимальности решения.

Предлагается использовать нечёткую логику в задаче ППР абитуриентом при поступлении в вуз. Так как правила принятия решения, представленные экспертами, содержат неопределённости, то эти неопределённости учитываются и при построении *SWRL*-правил. Правила нечёткого управления сформулированы по методу Такаги-Сугено-Канга[10] и представляют собой нечёткую импликацию (см. таблицу 2). Для её использования разработана шкала перевода нечётких значений лингвистических переменных в коэффициенты уверенности [9, 13]. Эксперту было предложено оценить, насколько он уверен в принятом решении, указав «коэффициент уверенности». Помимо присвоения нечётких значений конкретным переменным, которые представлены в правилах (например, «низкий», «средний», «высокий»), предложен алгоритм для построения дерева решений, в котором указывается степень уверенности специалиста в работе правила.

В правилах, представленных в таблице 2, используются лингвистические переменные, которые описывают степень уверенности эксперта в работе правила – «не уверен» («not sure»), «не очень уверен» («not very sure»), «почти уверен» («almost sure»), «уверен» («sure»), «совершенно уверен» («quite sure»). Например, в формулировке одного из правил успешности обучения на специальности «Эксперт уверен, что вероятность поступления на специальность «Химия» при наличии балла 10.342 (и выше) высокая» применяется лингвистическая переменная «уверен», что соответствует коэффициенту уверенности 0,8. При формировании ответа на запрос к БЗ учитывается значение коэффициента уверенности – ответы ранжируются по убыванию его значения.

Пример реализации запроса в режиме *DL Query* представлен на рисунке 2, где показан пример ответа на запрос «Какое направление обучения больше всего подходит абитуриенту с реалистичным профилем по Холланду и результатом вступительных экзаменов 6.2 (по 10-балльной шкале)?». Ответ СППР: «Гастрономия и кулинарное искусство».

[9] *OWL 2. Web Ontology Language Guide. Document Overview* (*Second Edition*). http://www.w3.org/TR/owl2-overview.
[10] *Takagi T.* Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. 15. No. 1. Pp. 116-132.

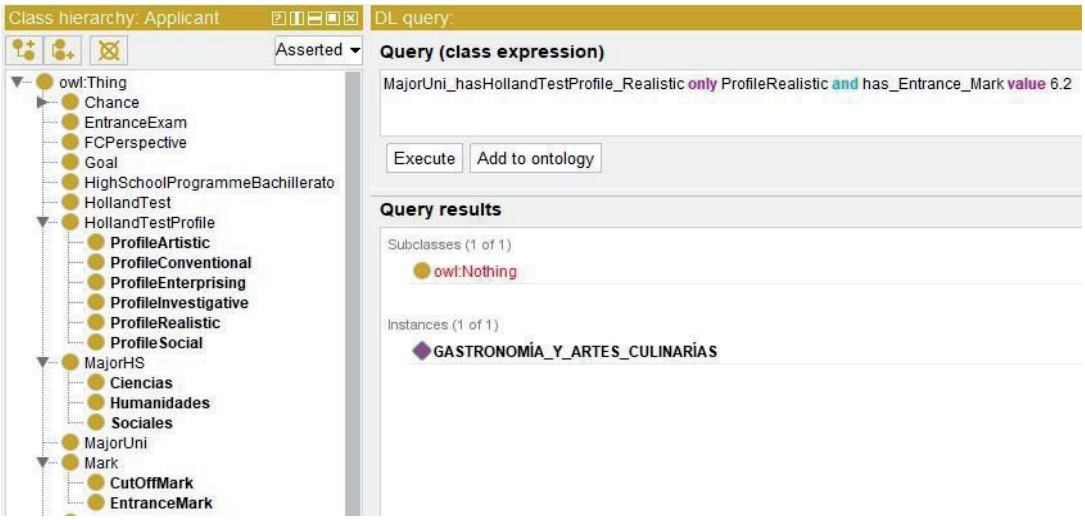


Рисунок 2 – Пример реализации запроса в режиме *DL Query*

Для проверки корректности сформированных и внесённых в БЗ правил проведено тестирование 50 первокурсников специальности *TADE* (группа направлений обучения «Туризм, администрирование и управление»), что позволило определить их психологические профили. Полученные значения психологических профилей респондентов распределились следующим образом (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты тестирования студентов по методу Холланда

Профиль по Холланду [4]	Количество студентов
Реалистический	24%
Конформистский	22%
Исследовательский	20%
Предпринимательский	16%
Социальный	14%
Артистический	4%

Данные опрошенных первокурсников были введены в онтологию как экземпляры класса *Applicant*. Экземпляр класса – это прецедент, принадлежащий классу. В результате созданы 50 экземпляров класса *Applicant* с данными студентов, которые прошли тестирование и выбрали специальность *TADE*. Используя режим *Query DL* к разработанной онтологии, можно формировать группы студентов с одинаковыми значениями психологических профилей и соответствующими рекомендованными направлениями обучения. Одна из таких групп была сформирована в результате выполнения запроса к БЗ: «Кому из студентов, обучающихся на специальности *TADE*, она была рекомендована при поступлении?». На рисунке 3 приведён пример этого запроса (*Query*), в котором фигурирует университетская специальность (*MajorUni*) и рекомендованное направление обучения в университете (*RecommendedToChoose_StudyField*): *hasMajorUni value Turismo_v_ADE_TADE and isRecommendedToChoose_StudyField value C.C._SOCIALES_Y_JURIDICAS.*

Ответ на запрос представляет собой перечень тех экземпляров класса *Applicant*, которые удовлетворяют запросу (указаны на рисунке 3 в области *Query results*). Таких экземпляров в БЗ оказалось 26. Персональные данные студентов обозначены на рисунке 3 как экземпляры класса *Applicant* с соответствующим порядковым номером. Учитывая, что специальность *TADE* относится к области социальных и юридических наук, и сравнивая эти данные с профилями [4], можно считать, что максимальное удовлетворение от выбора данной специальности будет у 52% студентов (22%+16%+14%), чьи профили (конформистский, предпринимательский, социальный) соответствуют профилю этой специальности по [4]. Согласно эксперименту 26 студентам из 50 опрошенных подходит выбранное направление обучения, а 24 студентам было предложено выбрать другое направление обучения в соответствии с их профилем. Полученное значение (52%) соответствует статистике среднего показателя удовлетворительного завершения обучения в срок в университетах Испании (51% [8, 9]).

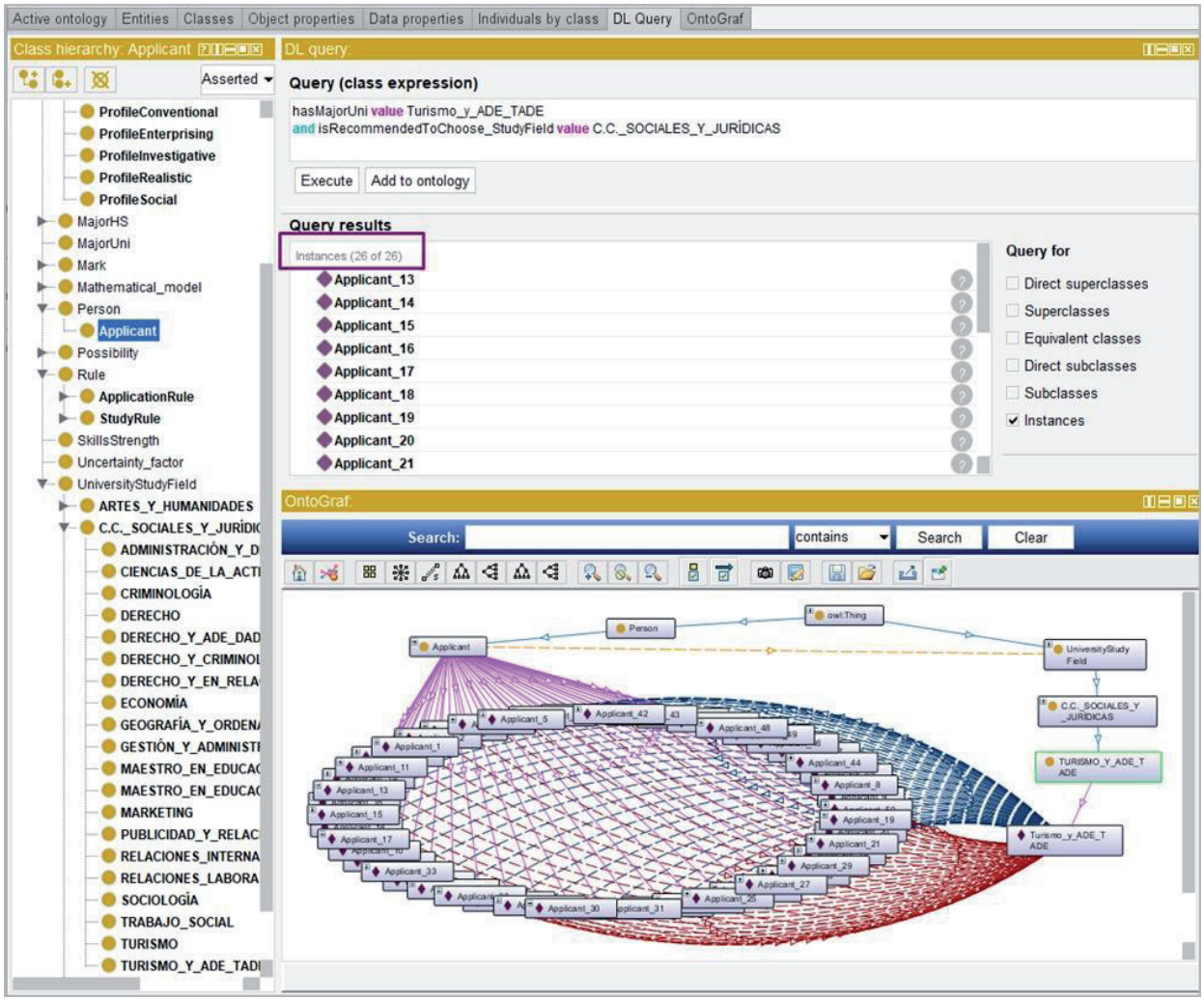


Рисунок 3 – Пример ответа на запрос к базе знаний

5 Возможности использования СППР

СППР с БЗ, основанной на онтологии предметной области, используются в образовательном процессе для разработки учебных курсов [15, 16], формирования и управления программами обучения [17-19], составления учебных планов [20], ведения научно-исследовательских работ [21] и др. В ходе проведённых исследований выявлены области возможного применения разработанной СППР. При определённых настройках и использовании механизма интеграции онтологий система позволит оказывать ППР всем участникам образовательного процесса, в т.ч. потенциальным работодателям. При этом ППР должна выполняться не однократно при поступлении в вуз, а в течение всего периода обучения, что даст возможность на каждом его этапе определять соответствие получаемой квалификации ожиданиям обучающегося и потребностям рынка труда и в случае необходимости дополнять ОПОП. В соответствии с возможностями использования СППР категория лиц, нуждающихся в ППР, приведена в таблице 4. Использование СППР позволит принимать правильные решения по формированию индивидуальных траекторий обучения в вузах. Оценка заинтересованности обучающихся в освоении ОПОП и отдельных дисциплин позволит отслеживать изменение мотивации к обучению, вводить дополнительные курсы и факультативные дисциплины, корректировать учебные программы дисциплин.

Таблица 4 – Перспективы применения СППР

Категория лиц, нуждающихся в ППР	**Вид ППР**	**Цель ППР**
Абитуриент/ обучающийся	Получение рекомендаций о соответствии своих возможностей требованиям образовательного учреждения, о соответствии своих психологических особенностей получаемой специальности/профилю обучения.	▪ Снизить риск ошибочного выбора направления обучения; ▪ получить рекомендации о наиболее соответствующих направлениях обучения и/или необходимости получения дополнительных навыков.
Представители приёмных комиссий образовательных организаций	▪ Получение информации о психологическом профиле абитуриентов; ▪ определение степени заинтересованности в получении знаний, умений, навыков в освоении ОПОП.	В конкурсной ситуации определить наиболее перспективного (заинтересованного) абитуриента или обучающегося, соответствующего требованиям получаемого профиля обучения с учётом его психологического профиля.
Служба персонала компаний-работодателей	Получение информации о психологическом профиле: ▪ кандидата на вакантную должность, ▪ кандидата из числа абитуриентов при отборе на целевое место обучения за счёт средств компании; ▪ сотрудника предприятия, направляемого на обучение за счёт компании.	▪ Определить соответствие кандидата на должность требованиям компании с точки зрения психологического профиля; ▪ в конкурсной ситуации определить наиболее перспективного сотрудника, претендующего на прохождение обучения за счёт компании.

Заключение

Предложенный подход к выбору профиля обучения с использованием СППР позволит абитуриенту лучше понять свои внутренние мотивы и побуждения, определив свой профиль будущей профессиональной деятельности. Применение СППР влияет на увеличение доли успешно закончивших обучение студентов вузов. Применение онтологии в СППР позволяет гибко настраивать правила по мере появления новых направлений обучения и при изменении требований к подготовке специалистов.

СППР может быть использована в вузах и других учебных заведениях при проведении профориентационных мероприятий, где учитываются психологические особенности человека, его мотивация и приспособленность к конкретному виду деятельности.

Список источников

[1] ***Дорохова Т.Ю., Пучков Н.П.*** Региональная система целевой подготовки специалистов в вузе: монография. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021. 132 с.

[2] ***Боргест Н.М.*** Будущее университета: онтологический подход. Часть 2: сущности, мотивация, проектное обучение. *Онтология проектирования*. 2012. № 1(3). С.87-105.

[3] ***Боргест Н.М.*** Будущее университета: онтологический подход. Часть 3: автоматизация бизнес-процессов. *Онтология проектирования*. 2014. № 1(11). С.24-41.

[4] ***Holland J.L***. A Psychological classification of occupations. Washington D.C: Johns Hopkins University, 1970. 72 p.

[5] ***Martinez Vicente J.M, Valls Fernández F.*** Aplicación de la teoría de holland a la clasificación de ocupaciones. Adaptación del inventario de clasificación de ocupaciones (ico). Revista Mexicana de Psicología, vol. 25, núm. 1, junio, 2008. P.151-164.

[6] ***Dean B. Burks***. Holland's typological model and its role in vocational guidance. Psychology and mind, 26.03.2020. https://virtualpsychcentre.com/hollands-typological-model-and-its-role-in-career-guidance/.

[7] ***Мартынов В.В., Макарова С.Ю.*** Технологии проектирования профессиональных образовательных программ подготовки кадров для цифровой экономики. *Информационные технологии*. 2024. Т.30, №2. С.103-111. DOI: 10.17587/it.30.103-111.

[8] ***Startseva E., Grimaylo A., Chernyahovskaya L., Pascual F.L***. Ontology rules application for efficient career choice. 5th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'19) in Valencia (Spain). 25-28 junio 2019. P.1179-1187. DOI: 10.4995/HEAd19.2019.9251.

[9] ***Startseva E.B***. Knowledge engineering for the improvement of academic guidance. Thesis submitted for the degree of doctorate from the University of Alicante, International doctorate degree (E013) doctorate in health science. Alicante: University of Alicante, 2021. 120 p.

[10] ***Gordaliza A., Angulo J., Ugarte M.*** LOMCE: An opportunity to strengthen the presence of Statistics in Secondary and High School Education. Boletín de Estadística e Investigación Operativa. Vol.29, No.2, Junio 2013, p.141-148.

[11] ***Startseva E.B., Chernyakhovskaya L.R., Grimaylo A.Yu., Nikulina N.O.*** Ontology Based Decision Support in Career Choise. In: 21th International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia (2019). IEEE Xplore Digital Library. Date Added to IEEE Xplore: 03 February 2020. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976531.

[12] ***Саати Т.*** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Перевод с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

[13] ***Startseva E.B., Nikulina N.O., Malakhova A.I.*** Knowledge Organization for Intelligent Decision Support System. *System engineering and information technologies*, 2021. Vol.3, 3(7). P.17-22. DOI: 10.54708/26585014_2021_33717.

[14] ***Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.*** Инженерия знаний. Модели и методы. СПб.: Издательство «Лань», 2016. 324 с.

[15] ***Загорулько Г.Б.*** Модель комплексной поддержки разработки интеллектуальных СППР. *Онтология проектирования*. 2019. Т. 9, №4(34). С.462-479. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-462-479.

[16] ***Solovov A.V., Menshikova A.A.*** Designing an ontology of the e-learning course content. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 99-112. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-99-112.

[17] ***Черепашков А.А., Шараухова А.Г.*** Онтологическая база для обучения персонала САПР. *Онтология проектирования*. 2021. Т. 11 №1(39). С.51-63. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-51-63.

[18] ***Антонов В.В., Куликов Г.Г., Кромина Л.А., Родионова Л.Е., Фахруллина А.Р., Харисова З.И.*** Концепция программно-аналитического комплекса образовательного процесса на основе онтологии и искусственных нейронных сетей. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №3(41). С.339-350. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350.

[19] ***Асанов А.З., Мышкина И.Ю., Грудцына Л.Ю.*** Прогнозирование востребованности компетенций при корректировке программ обучения с помощью когнитивных моделей. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №2(32). С.203-213. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.

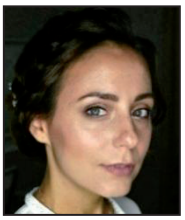
[20] ***Плешкова А.Ю.*** Онтологии в управлении образовательным процессом. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №4(46). С.506-517. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-506-517.

[21] ***Пиявский С.А.*** Онтология направляемого развития научных способностей молодёжи. Часть 1: основные понятия и модели. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №3(49). С.405-423. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-405-423.

Сведения об авторах

Старцева Елена Борисовна, 1970 г. рождения. Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (1992), к.т.н. (1997), доцент (2001). Доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ. Научные интересы: системное моделирование и проектирование информационных систем, системный анализ, поддержка принятия решений, интеллектуальные технологии управления знаниями. В списке трудов более 20 научных публикаций. AuthorID (РИНЦ): 143639; SPIN: 7621-1551; ORCID 0000-0003-3139-050X. Author ID (Scopus): 57216840886; *star_elena@list.ru.*

Никулина Наталья Олеговна, 1971 г. рождения. Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (1994), к.т.н. (1998), доцент (2003). Доцент кафедры практической и прикладной информатики института информационных технологий МИРЭА – Российского технологического университета. Научные интересы: управление проектами, системное моделирование и проектирование информационных систем в организационном управлении. В списке трудов более 50 работ в указанных областях. AuthorID (РИНЦ): 396597; SPIN: 5395-1463; ORCID 0000-0002-8594-2093; Author ID (Scopus): 57218643085; Researcher ID (WoS): AAX-8251-2020. *nikulina.nataly4@yandex.ru*.✉



Малахова Анна Ивановна, 1987 г. рождения. Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (2009), кандидат технических наук (2013). Доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ. Научные интересы: системный анализ, управление и обработка информации, интеллектуальные технологии управления знаниями в различных прикладных областях. Соавтор более 50 научных публикаций. Author ID (RSCI): 1005748; SPIN: 2382-5254; ORCID 0000-0003-0099-3594; Author ID (Scopus): 57224350806; Researcher ID (WoS): ABC-8039-2020. *aimalakhova@gmail.com*.

Поступила в редакцию 14.06.2024, после рецензирования 19.03.2025. Принята к публикации 25.03.2025.

CC BY

Scientific article DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-281-294

Decision support system for choosing a study program

© 2025, E.B. Startseva[1], N.O. Nikulina[2]✉, A.I. Malakhova[1]

[1] *Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia*
[2] *MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

Abstract

The article explores an approach that enables a reasonable choice of a study program in an educational organization. Existing information tools used by educational institutions to support applicants are typically based on admission rules, study areas, and historical data on the average grades of previously admitted students. This paper proposes incorporating Holland test results into the decision-making process for choosing a study program and integrating this data into the decision support system's selection rules.The decision on the most suitable study program for the user is made progressively, considering the degree of confidence in its accuracy. This approach provides structured guidance to the user by: orienting them on the rules for admission to an educational organization; determining the priority study area based on broader groups of specialties and fields; identifying the most appropriate program within the chosen study field. The novelty of this approach lies in mapping the six primary psychological types identified by the Holland method to the study areas of an educational institution. Based on this comparison, a knowledge base is developed in the form of decision-making rules. The possible choices are evaluated using linguistic variables that reflect the user's confidence level in the recommendation provided by the information system. To enhance the accuracy of the decision support system, the decision-making process model is refined when forming decision-making rules.

Keywords: *study program, Holland's personality type, decision-making rules, knowledge base, ontology, decision support system.*

For citation: *Startseva EB, Nikulina NO, Malakhova AI.* Decision support system for choosing a study program [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 281-294. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-281-294.

Authors' contributions: Startseva E.B. – problem formulation and development of decision-making rules. Nikulina N.O. – methodological foundations of the research, decision-making process modeling, and analysis of research results. Malakhova A.I. – development of an ontological model, and formulation of decision-making rules.

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

List of figures and tables

Figure 1 - Algorithm for supporting decision-making when choosing a study program
Figure 2 - Example of query implementation in DL Query mode
Figure 3 - Example of a response to a knowledge base query
Table 1 - Alignment of graduates' professional competencies with job functions
Table 2 - Classes of rules used in DSS
Table 3 - Students' test results using the Holland method

Table 4 - Perspectives of the use of DSS

References

[1] ***Dorokhova TY, Puchkov NP.*** Regional system of targeted training of specialists in higher education [In Russian]: monograph. Tambov: Publishing center of FGBOU VO "TSTU", 2021, 132 p.

[2] ***Borgest NM.*** Future of the University: Ontological Approach. Part 2: Entities, Motivation, Project-Based Education. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2012; 1(3): 87-105.

[3] ***Borgest NM.*** Future of the University: Ontological Approach. Part 3: Automation of Business Processes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2014; 1(11): 24-41.

[4] ***Holland JL.*** A Psychological classification of occupations. Washinton D.C: Johns Hopkins University, 1970. 72 p.

[5] ***Martinez Vicente JM, Valls Fernández F.*** Application of Holland's theory to the classification of occupations. Adaptation of the Position Classification Inventory (PCI) [In Spanish]. *Revista Mexicana de Psicología*, 2008; 25: 151-164.

[6] ***Dean B. Burks.*** Holland's typological model and its role in vocational guidance. Psychology and mind, 03/26/2020. https://virtualpsychcentre.com/hollands-typological-model-and-its-role-in-career-guidance/.

[7] ***Martynov VV, Makarova SYu.*** Technologies for designing professional educational training programs for the digital economy [In Russian]. *Information Technologies*. 2024; 30(2): 103-111. DOI: 10.17587/it.30.103-111.

[8] ***Startseva E, Grimaylo A, Chernyahovskaya L, Pascual FL***. Ontology rules application for efficient career choice. 5th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'19) in Valencia (Spain). 25-28 junio 2019. P.1179-1187. DOI: 10.4995/HEAd19.2019.9251.

[9] ***Startseva EB.*** Knowledge engineering for the improvement of academic guidance. Thesis submitted for the degree of doctorate from the University of Alicante, International doctorate degree (E013) doctorate in health science. Alicante: University of Alicante, 2021. 120 p.

[10] ***Gordaliza A, Angulo J, Ugarte M.*** LOMCE: An opportunity to strengthen the presence of Statistics in Secondary and High School Education [In Spanish]. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*. 2013; 29(2): 141-148.

[11] ***Startseva EB, Chernyakhovskaya LR, Grimaylo AYu, Nikulina NO.*** Ontology Based Decision Support in Career Choise. In: 21th International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia (2019). IEEE Xplore Digital Library. Date Added to IEEE Xplore: 03 February 2020. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976531 https://ieeexplore.ieee.org/document/8976531

[12] ***Saati T.*** Decision making. Analytic hierarchy process [In Russian]. Moscow: Radio and Communication 1993. 278 p.

[13] ***Startseva EB, Nikulina NO, Malakhova AI.*** Knowledge Organization for Intelligent Decision Support System. *System engineering and information technologies*, 2021; 3(3): 17-22. DOI: 10.54708/26585014_2021_33717.

[14] ***Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI.*** Knowledge Engineering. Models and methods [In Russian]. St. Petersburg: Publishing House "Lan", 2016, 324 p.

[15] ***Zagorulko GB***. Model of comprehensive support of intelligent DSS development [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 462-479. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-462-479.

[16] ***Solovov AV., Menshikova AA.*** Designing an ontology of the e-learning course content. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 99-112. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-99-112.

[17] ***Cherepashkov AA, Sharaukhova AG.*** The ontological basis for teaching CAD staff [In Russian]. *Ontology of* designing. 2021; 11(1): 51-63. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-51-63.

[18] ***Antonov VV, Kulikov GG, Kromina LA, Rodionova LE, Fakhrullina AR, Kharisova ZI.*** The concept of a software and analytical complex of the educational process based on ontology and artificial neural networks [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(3): 339-350. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350.

[19] ***Asanov AZ, Myshkina IY, Grudtsyna LY.*** Forecasting competence requirements for training programs adjustment with the help of cognitive models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(2): 203-213. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.

[20] ***Pleshkova AYu.*** Ontologies in educational process management [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(4): 506-517. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-506-517.

[21] ***Piyavsky SA.*** Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part1: basic concepts and models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(3): 405-423. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-405-423.

About the authors

Elena Borisovna Startseva (b. 1970) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (1992), candidate of technical sciences (1997), an associate professor (2001). She is an associate professor at the Department of Automated Management Systems of the Ufa University of Science and Technology. The research interests are system modeling and design of information systems, system analysis, decision-making support, and intelligent knowledge management technologies in various applied fields. The list of scientific papers includes more than 20 scientific works. AuthorID (RSCI): 143639; SPIN:7621-1551; ORCID 0000-0003-3139-050X; Author ID (Scopus): 57216840886. *star_elena@list.ru.*

Natalya Olegovna Nikulina (b. 1971) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (1994), candidate of technical sciences (1998), an associate professor (2003). She is an associate professor at the Department of Practical and Applied Informatics of the Institute of Information Technology, Russian Technological University – MIREA. The research interests are project management, system modeling, and design of information systems in organizational management. The list of scientific papers includes more than 50 works in the specified areas. AuthorID (RSCI): 396597; SPIN: 5395-1463; ORCID 0000-0002-8594-2093; Author ID (Scopus): 57218643085; Researcher ID (WoS): AAX-8251-2020. *nikulina.nataly4@yandex.ru.*✉.

Anna Ivanovna Malakhova (b. 1987) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (2009), candidate of technical sciences (2013). She is an associate professor at the Department of Automated Management Systems of the Ufa University of Science and Technology. The research interests are system analysis, information management and processing, intelligent knowledge management technologies in various applied fields. She is a co-author of more than 50 scientific publications. Author ID (RSCI): 1005748; SPIN: 2382-5254; ORCID 0000-0003-0099-3594; Author ID (Scopus): 57224350806; Researcher ID (WoS): ABC-8039-2020. *aimalakhova@gmail.com.*

Received June 14, 2024. Revised March 19, 2025. Accepted March 25, 2025.

Дискуссия. Разбор понятий

«В споре рождается истина»
Сократ

«Правильность и неправильность в отношении определений не должны рассматриваться как аналог истины и лжи. Быть правильным или неправильным не значит быть истинным или ложным»
В.В. Оглезнев, В.А. Суровцев[1]

«Определения не могут быть правильными или неправильными, они могут быть **полезными** или **нет**»
Хорошая мысль авторам на заметку

Мы благодарны читателям-авторам, которые откликаются на наши призывы к дискуссии по публикуемым в журнале материалам. В частности, речь идёт о статье из предыдущего номера[2], в которой сделана попытка наполнить содержанием, представить своё видение или дать свои определения концептуальному и понятийному анализам. Забегая вперёд и опираясь на «хорошую мысль», приведённую в одном из эпиграфов о «полезности» того или иного определения, можно и важно отметить, что инициированная редакцией дискуссия если и не приблизит нас к истине, то позволит в первом или ином приближении обсудить возможность консенсуса, где это возможно. А где-то обозначить применимость или напротив неуместность трактовки тех или иных употребляемых терминов, но в любом случае с опорой на убедительные аргументы.

Отрадно видеть скорую реакцию читателей журнала на приглашение к дискуссии, что позволяет утверждать, что потребность в определении понятий не просто остаётся «вечной» в развивающемся социокультурном пространстве, но актуализируется продолжающейся дифференциацией наук, знаний и рождаемых ими технологий. Первыми откликнулись специалисты технической сферы, наши постоянные авторы А.М. Фаянс (Москва, ИПУ РАН) и С.В. Микони (Санкт-Петербург, СПИИРАН), которые прислали, можно сказать, полноценные статьи в журнал с анализом опубликованного материала и своими представлениями, обоснованиями и позицией. Обращения к гуманитариям с просьбой дать свои комментарии, представить свой взгляд и своё видение затронутой темы, привели пока лишь к небольшим заметкам и оценочным мнениям. То, что у гуманитариев, в отличие от представителей технической отрасли, не возникает особая необходимость в детализации и конкретизации уже «устоявшихся» знаний и во многом «обтекаемых» понятий, объяснимо и вполне обосновано тем, что знания, как и Вселенная, бесконечны. Поэтому многие из них считают, что любое определение есть «гробик для мысли», а «мысль изречённая есть ложь». При этом стоит также отметить и тот факт, что пока отсутствует формальный механизм согласования интерпретаций на различных языках искусственно созданных и используемых терминов и понятий в разных предметных областях (ПрО).

Наполнение смыслом, содержанием и знаком (символом) тех или иных предметов, явлений и проч. – это всегда результат договорённостей, которые во многом основаны на устойчивости использования этих знаков и заменяющих их слов. В этом направлении активно ра-

[1] ***Оглезнев В.В., Суровцев В.А.*** В каком смысле определения могут быть истинными или ложными: о работе А. Папа «Теория определений». *Вестник Томского государственного университета*. Философия. Социология. Политология. 2017. №38. С.283-295. DOI: 10.17223/1998863X/38/30.

[2] ***Выхованец В.С.*** Концептуальный и понятийный анализы: общий подход. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.34-44. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-34-44.

ботают лингвисты, онтологи и специалисты ПрО, разрабатывая онтологии верхнего уровня[3] и онтологии ПрО.

Публикуя дискуссионный материал о содержании (наполнении смыслом) двух родственных анализов (концептуальный и понятийный), редакция журнала исходила из той насущной потребности инженерии, которая заключается в конкретизации используемых терминов и стоящих за ними понятий. Инженеру для проектирования и создания артефактов нужны вполне конкретные значения их параметров, характеристик и показателей, строгие формализмы выработанных адекватных знаний, которые превращаются в модели артефактов и алгоритмы действий, способных к их воплощению (материализации).

На первый взгляд у англоязычного термина «концепт», который вошёл в русскоязычный оборот, есть в некоторых случаях синоним на русском языке – «понятие».

КОНЦЕ́ПТ (от лат. conceptus – схватывание, **понятие**), структурно-содержательная единица сознания, отражающая совокупность знаний, представлений, мнений об объекте мысли. Термин «К.» активно используется в разных направлениях совр. языкознания с некоторыми отличиями в дефиниции и методах исследования[4].

КОНЦЕПТ (от лат. conceptus — собрание, восприятие, зачатие) — акт «схватывания» смыслов вещи (проблемы) в единстве речевого высказывания[5].

КОНЦЕПТ (от лат. conceptus), содержание **понятия**[6]. см. СМЫСЛ.

Эта схожесть и в то же время различие смысла и содержания этих терминов в привязке в форме прилагательных к анализу позволяет подойти к конкретизации концептуального и понятийного анализов. Автор, который обратился к обсуждению этой темы, возможно следовал ранее опубликованной статье в журнале[7], где был сделан подобный разбор других анализов.

Фрагменты иных точек зрения на опубликованный материал представлены далее.

К вопросу о концептуальном и понятийном анализах

А.М. Фаянс (ИПУ РАН), Москва

В статье [1] отмечается, что *концепт есть объективированое понятие*, то есть концепт всё же есть понятие. Термин «концепт», согласно статье, используется на теоретическом уровне рассмотрения, исключая ряд признаков, присущих ПрО. Отсюда и словосочетания «концептуальный анализ» (КА) – «выявление и представление концептов… ПрО», «понятийный анализ» (ПА) – обозримое, однозначное и непротиворечивое описание концептов, связанное с изменчивостью набора признаков у экземпляров.

Математическая основа анализа – в теории множеств. Вместе с тем в [1] отмечается, что для задач КА и ПА «классической теории множеств недостаточно...». Этот недостаток, согласно [1], может быть устранён использованием математического аппарата структур. В качестве альтернативы КА в [1] предлагается подход, именуемый «понятийным». «ПА заключается в выявлении понятий ПрО и определении способов их образования» [1, с.6]. Выделяются три вида понятий и порождающие их операции: идентификация (присвоение понятию имени), обобщение (объединение обобщаемых понятий) и ассоциация (формирование понятий путем сочетания признаков других понятий). Посредством этих операций ПрО могут быть построены все мыслимые понятия [1]. Однако в статье не указано, каким образом из сгенерированного множества следует отбирать нужные понятия.

Таким образом, с высказанной в [1] точки зрения понятийный подход с одной стороны привязывается к ПрО, а с другой – предлагаемые способы образования понятий ПрО с высокой степенью вероятности выводят новые понятия за пределы данной ПрО. Возникает вопрос, как именовать то, что выходит за пределы ПрО?

Согласно [1] термину «понятие» в английском языке отвечает термин «*notion*», а термину «концепт» – «*concept*» – абстрактная идея по отношению к рассматриваемому объекту. С лингвистической точки зрения слово «*notion*» по смыслу ближе к описанию, чем к пониманию. В русском языке исток слова «понятие» следует искать именно в понимании – результате осмысления, выражающегося в установлении совокупности при-

[3] ГОСТ Р 59798-2021. Информационные технологии. Онтологии высшего уровня (TLO). Часть 2. Базисная формальная онтология (BFO). Дата введения 2022-04-30.

[4] Большая российская энциклопедия 2004–2017. https://old.bigenc.ru/linguistics/text/2094246.

[5] КОНЦЕПТ. Философская энциклопедия. https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/4425/КОНЦЕПТ.

[6] Философский энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия. Гл. редакция: Л.Ф. Ильичёв, П.Н. Федосеев, С.М. Ковалёв, В.Г. Панов. 1983.

[7] ***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.

знаков, характеризующих рассматриваемый объект. Налицо терминологическая путаница, осложняющая понимание сути рассматриваемых проблем.

Приведённый в [1] пример ПА касается конфигурирования изделий, который отвечает отношению «часть-целое», а не «род-вид», который, согласно [1] присущ как КА, так и ПА.

Указанные замечания и представляют собой предмет дискуссии.

Альтернативный взгляд на КА и ПА можно рассмотреть с позиций трансдисциплинарного подхода (ТП) [2, 3]. В ТП процесс обобщения с последующим анализом характеристик Всеобщего и единичных на каждом уровне конечен, поскольку число рассматриваемых признаков уменьшается. Выявляемые в результате анализа виды единичных либо конкретизируются путем добавления новых, не вступающих в противоречие со старыми, признаков, либо формируются возможные комбинации ранее рассмотренных единичных. Из совокупности признаков, позволяющей однозначно выделить единичное во Всеобщем, можно выделить совокупность независимых и непротиворечиых признаков, *причинно обусловливающих* как появление и/или существование самого упомянутого единичного, так и наличие его иных признаков. Такая совокупность в логике[8] именуется совокупностью ***существенных признаков***.

В ТП требуется систематизация единичных на генетической основе, а не слепая генерация возможных видов единичных, из которых потом ещё предстоит выбрать приемлемые варианты. Выявляемые указанным образом единичные (в частности, признаки) после их *осмысления* (выявления и фиксации присущих им существенных характеристик) должны получить свои «имена», путём их ***присвоения*** (в разных языках по своим правилам).

Отсюда возникает ***словесно обозначенное единство мысли субъекта об определённом объекте и содержания этой мысли, фиксирующего характеристики (в частности свойства), позволяющие отделить этот объект от прочих.*** Это обозначенное единство в ТП именуется термином «**понятие**». Здесь объектом именуется любое целостное единичное, рассматриваемое субъектом.

В приведённом определении легко просматривается упомянутый в [1] треугольник Фреге (знак, объём, содержание), хотя нетрудно убедиться, что это определение сформировано исключительно путём логических рассуждений.

С позиций ТП ***научный подход всегда носит понятийный характер***, поскольку он опирается на понятия и операции с ними через их признаки и свойства. Форма представления результатов (графы, схемы, таблицы, математические выражения и т.п.) при этом не столь существенна. Главное, чтобы она была достаточно полна, удобна для понимания, объективна и логически строга.

С высказанной точки зрения подходы, обозначенные в [1] концептуальный (во всех возможных модификациях) и понятийный, суть один понятийный подход (но уже в изложенном здесь смысле), рассматриваемый на разных уровнях обобщения. Присвоение родственным подходам разных имён запутывает исследователя избыточной терминологией, тогда как принятие предложенного здесь толкования делает неактуальными исследования по выявлению у этих подходов общих моментов.

Высказанные суждения направлены на указание возможного пути устранения слабых мест в крайне интересной статье [1]. Этот путь, здесь обозначенный как ТП, позволяет выстроить и обосновать экономный тезаурус и аппарат оперирования понятиями, сформированными на уровнях их обобщения, конкретизации и комбинирования. Что открывает границы достижимых возможностей формализации рассматриваемых процедур.

[1] ***Выхованец В.С.*** Концептуальный и понятийный анализы: общий подход. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.34-44. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-34-44.

[2] ***Фаянс А.М., Кнеллер В.Ю.*** Об онтологии видов задач и методов их решения. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №3(37). С.273-295. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-273-295.

[3] ***Фаянс А.М.*** Построение онтологии фундаментальных понятий на основе трансдисциплинарного подхода. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №4(46). С.454-469. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-454-469.

Концептуальный и понятийный анализы, основанные на постулатах теории познания

С.В. Микони (СПИИРАН), Санкт-Петербург

Опубликованная в качестве дискуссионной статья [1] породила ряд вопросов и обострила противоречия между терминологией компьютерных моделей, создаваемых в англоязычной среде, и терминами фундаментальной науки. В качестве отправной точки онтологического анализа в статье предложено разделить его на концептуальный и понятийный анализы на основе различного толкования понятия и концепта. Ключевым словом статьи является понятие, анализ которого относится к этому разделу философии, однако в списке источни-

[8] *Войшвилло Е.К., Дегтярев М.Г.* Логика. М.: Владос-пресс, ИМПЭ им. Грибоедова, 2001.

ков обсуждаемой статьи отсутствуют ссылки на работы по теории познания, например [2-5]. Неразрывно связана с теорией познания и проблема понимания [6].

Во главу угла в теории познания К. Поппер ставит здравый смысл [2], существенной чертой которого является реализм. Важная роль в познании принадлежит языку [3]. Инициатором лингвистического поворота в теории познания был Г. Фреге – автор треугольника познавательного процесса [4]. Вершинами треугольника являются обозначаемая сущность (*denotat*), отражающее её понятие (*concept*) и его имя (*designat*), а дугами – отношения между ними. В онтологии Фреге язык становится инструментом исследования объектов мира «мысли», что сформировало философию языка, которую развил Б. Рассел [5]. Категориальный подход к формированию понятий рассмотрен в работе [7]. Исследования в области теории познания положили начало логико-лингвистическому анализу понятий для выявления отношений между отражаемыми ими сущностями [8]. Объектом этого анализа является определение понятия, как логическая операция, раскрывающая его смысл.

В связи с изложенным утверждение автора рассматриваемой статьи о том, что понятие является *частным* мнением, а концепт принимается за *объективированное* понятие, выработанное и закреплённое общественным опытом, не выдерживает критики. Обыденная категоризация сущностей в любом национальном языке не может считаться частным мнением. Это обобщённый опыт народа.

Что касается научных понятий, они обосновываются определениями. Определения понятий делятся на перечислительные (экстенсиональные), описательные (интенсиональные) и указательные (остенсивные). Первые два определения соответствуют двум способам представления множества. В перечислительном определении перечисляются сущности, объединённые некоторым набором свойств (отличительных признаков), а в описательном определении перечисляются сами признаки. Эти множества в теории понятий называются соответственно объёмом и содержанием понятия. Аналогичным способом через объём (экстенсионал) и содержание (интенсионал) определяется и англоязычный аналог понятия – *concept*. Различие значений терминов «понятие» и «*concept*» следует выявлять путём сопоставления содержаний обозначаемых ими сущностей.

Автор статьи [1] предлагает понимать под концептом (*concept*) *общее* понятие (абстрактную идею). Но что означает общее понятие? Обобщить понятие означает перейти от понятия с меньшим объёмом, но с бóльшим содержанием, к понятию с бóльшим объёмом, но с меньшим содержанием. Например, обобщая понятие «Министерство юстиции Российской Федерации», происходит переход к понятию «министерство юстиции». Объём нового (общего) понятия шире исходного понятия; первое относится ко второму как индивид к виду. Вместе с тем содержание понятия, образованного в результате обобщения, уменьшилось, так как были исключены его индивидуальные признаки.

Продолжая исключать индивидуальные признаки, можно прийти к философскому понятию «сущность», т.е. то, что существует в природе или в воображении. С позиции категоризации понятий пределом обобщения является получение однородных членов категории. А таким членом и является сущность, как наиболее общий вид понятий. Таким образом, при обобщении понятие не перестаёт быть таковым. Где же тогда та мера общности, которой следует присудить имя «концепт»? И нужно ли менять имя понятия в зависимости от его общности? Существует окружение каждого слова, влияющее на его понимание (контекст).

Автор утверждает, что «основной формой представления результатов известных методов концептуального анализа является семантическая сеть, в которой вершинами являются концепты, а дуги задают отношения между концептами». Отсюда следует так называемый концептуальный анализ концептов. Понятие автор переводит на английский язык как *notion*. Но это слово имеет у них именно бытовое (представление, сведения о чём-нибудь, иметь понятие о чём-нибудь), а не познавательное значение.

Семантической сети в [1] противопоставляется модель ПрО, имеющая структуру ациклического графа. В этой модели автор разрешает пользоваться понятиями и заниматься понятийным анализом. В действительности предлагаемое разделение анализа понятий по национальному признаку (*concept vs* понятие) подобно раскритикованному в [9] разграничению теории познания и эпистемологии.

Человеческое знание моделируется многоуровневой семантической сетью со счётным множеством узлов и уровней [10]. Более того, каждый узел раскрывается своей сетью понятий. Математической моделью многоуровневого поля знаний является многосортная алгебраическая система (структура) в языке предикатов первого порядка [11].

Знание само по себе нейтрально, как нейтрален его элемент – треугольник Фреге. Практическое отношение к понятию моделируется дополнением треугольника четвёртой вершиной со знаком «Прагматика» (четырёхугольник Д.А. Поспелова). Для решения поставленной задачи разработчик модели ПрО выделяет из общей сети нужные понятия. В задачу понятийного анализа ПрО входит установление, прежде всего, логических отношений между понятиями: вид-род, целое-часть, причина-следствие, элемент-класс, цель-средство. При создании семантической сети анализируются предметные отношения между понятиями.

На самом деле, за основу термина «концептуальный анализ» принято слово концепция (*conception*) [12], а не концепт, как считает автор рассматриваемой статьи. Одним из значений слова концепция является идея произведения, её теоретическое построение от цели [13]. Этому значению соответствует модель дерева целей, мо-

делируемого ациклическим графом. Он и представляет собой начальную структуру создаваемой иерархической модели ПрО. Дерево целей реализует отношение цель-средство.

Таким образом, при понятийном и концептуальном анализе носителями отношений являются понятия. Принципиальным различием между понятийным и концептуальным анализами ПрО являются отношения, устанавливаемые между понятиями в ПрО. Если понятийный анализ использует любые отношения между понятиями, то в основу концептуального анализа кладётся отношение цель-средство (инструментальная связь). Это определяет и различие в структурах соответствующих моделей ПрО. Понятийный анализ оперирует с моделями произвольной структуры, а концептуальный анализ ограничивается моделью ациклического ориентированного графа. Это, впрочем, не означает отсутствия обратных связей при построении дерева целей, но они не включаются в его структуру.

Статья [1] изобилует англицизмами, а русские научные термины даются в скобках, притом, что государство приняло законодательные акты по сохранению русского языка [14], в том числе и научного русского языка. Из работ, подобных [1], следует его вторичность по отношению к английскому языку, что подмечено в работе [9] – «эпистемологию связывают с *научным* познанием, а теорию познания пытаются истолковать каким-то более широким образом». Аналогичный подход в работе [1] – «понятие рассматривается как частное мнение, понимание чего-либо, в то время как концепт – общее, объективированное понятие». Другая проблема современной науки обозначена в [6], как «плавание по верхам». В своих умозаключениях авторы опираются не на первоисточники, а на текущие публикации, что не позволяет им выходить за пределы модного на данный момент направления. Эти факторы повлияли на представленный в [1] подход к разделению концептуального и понятийного анализов. Одним из способов исправления нынешней ситуации в научном языке можно предложить более строгое отношение к его терминологии.

P.S.

В русском языке слово *conception*, как производное от слова *concept*, давно присутствует, как концепция, которая имеет отношение к понятию, но имеет значение идеи произведения, её теоретического построения от цели. Именно в этом смысле видится термин «концептуальный анализ понятий», имеющий целью воплотить идею в действующую модель. И здесь всё становится на свои места и обосновывается как логически, так и математически.

[1] ***Выхованец В.С.*** Концептуальный и понятийный анализы: общий подход. *Онтология проектирования.* 2025. Т.15, №1(55). DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-34-44.

[2] ***Поппер К.Р.*** Объективное знание. Эволюционный подход. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 384 с.

[3] ***Кюнг Гвидо***. Онтология и логический анализ языка. Пер. А.Л. Никифорова. М.: Дом интеллектуал. кн., 1999. 237 с.

[4] ***Фреге Г***. Логика и логическая семантика. М.: Либроком. 2015.

[5] ***Рассел Б.*** Об обозначении. Пер. В.А. Суровцева. http://philosophystorm.ru/node/6923.

[6] ***Кузнецов О.П.*** О машинном обучении, мифах о сильном искусственном интеллекте и о том, что такое понимание. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.466-482. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-466-482.

[7] ***Лакофф Дж.*** Женщины, огонь и опасные вещи: что категории языка говорят нам о мышлении. М.: Гнозис, 2011. 512 с.

[8] ***Микони С.В.*** Структурирование предметной области на основе логико-лингвистического анализа и метрики понятий // Сборник научных трудов международного научно-практического семинара «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», Коломна, 17-18.05.2001. М.: Наука. Физматлит. 2001. С.162–167.

[9] ***Анкин Д.В.*** Теория познания: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 192 с.

[10] ***Микони С.В.*** Понятность онтологической модели как характеристика её качества. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №1(39). С.20-34. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-20-34.

[11] ***Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г.*** Введение в математическую логику. М.: Изд-во МГУ. 1962. 120 с.

[12] Большой толковый словарь русского языка. Gramota.ru.

[13] ***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.

[14] Постановление Правительства Российской Федерации о федеральной целевой программе «Русский язык» на 2016-2020 гг. № 481 от 20.05.2015 г.

Дискуссия продолжается

Ждём комментарии от гуманитариев, от всех, кто способен внести ясность!

А пока – частные мнения (без имён)

Языковеды:

«… у меня простые размышления, может быть они Вам и не пригодятся — они собственно языковедческие. Пока не удаётся впрячь в одну телегу коня и трепетную лань[9].

… ещё раз убедилась, что мы, гуманитарии и техники, говорим на разных языках и вообще не понимаем друг друга. С этим надо что-то делать, это уже предвестники гражданской войны между гуманитарным и техническим знанием[10]. Пока до согласия очень далеко…»

…

«Прочитала статью – и в некотором недоумении. Во-первых, я мало что поняла: статья не лингвистическая. Всё очень чётко и по сути, но стилистически…

Различие концептуального и понятийного анализов основано на различном толковании понятия и концепта. = Различие – на различном…

Не могу согласиться с такой трактовкой: понятия в работе рассматривается как частное мнение, понимание чего-либо, в то время как концепт – общее понятие, абстрактная идея.

Обычно так разводят значение и смысл».

Философские оценки:

«…бегло посмотрел текст! Я не могу проследить собственно математическую часть рассуждения, однако должен сказать, что исходная статья содержит грубейшую ошибку в интерпретации Фреге и формальной логики как таковой: «смысл» (*Sinn*) - это не понятие и не концепт, а способ задания значения, «понятие» (*Begriff*) - это функция, обладающая истинностным значением для каждой своей переменной... Понятие в оппозиции восприятия (вещи) и рассудка (языка) - это элемент языка, в оппозиции восприятия, рассудка и разума - структура интеллектуальной рефлексии, обеспечивающая связь между словом и вещью, в последней понятие конкурирует с литературным образом, технической идеей, психическим фантазмом...

Я не понимаю, зачем автору обращаться к сложнейшему аппарату логики и философии математики, если он не знает базовых первоисточников. Соотношение понятия и концепта - это темы средневековой философии, где «концепт» возникает как способ преодоления противоречия номинализма и реализма, по этому поводу написаны тысячи томов, обзоров и т.д., зачем делать вид, что история начинается прямо сейчас? «Концепт» нужен лингвистам, чтобы изучать семантические поля тех или иных слов, не обращаясь к формальной логике, зачем математикам слово «концепт», если не приводится какой-то вертикальной схемы познания??? Концептуальным анализом можно назвать что угодно, вопрос в границах задачи обратной расшифровки кодов, а под понятийным анализом обычно всё-таки понимают выявление содержания и объёма понятия в духе канонической аристотелевской логики, дополненной, например, историей понятий как методом исторического познания...

Я бы рекомендовал автору посмотреть монографии В.В. Целищева и его учеников, таких как А.В. Хлебалин, чтобы увидеть списки литературы по темам, в которых он высказывается...»

Спасибо всем за замечания и высказанные суждения.

Действительно, многое, казалось бы, уже устоявшееся, вновь подвергается переосмыслению, и стоит согласиться, что не всегда корректному. Попытки обобщения взглядов и оценок, находящихся на разных полюсах человеческого познания, не всегда плодотворны. Окончательной и однозначной точки зрения, скорее всего, не будет.

Онтология, тезаурус, понятия, термины, язык всегда предмет договорённости. Той договорённости, которая ПОНЯТНА и ПОЛЕЗНА всем участникам консенсуса!

[9] Языковедческие вопросы в информационных технологиях - важнейшие, особенно в эпоху больших языковых моделей. Поэтому потребность у «телеги, вытаскивающей цивилизацию на новый уровень», в совместных и согласованных усилиях «трепетной лани и коня» - очень высокая!.. *Комментарии ред.*

[10] Про мост между гуманитариями и инженерами см. статьи «От редакции» в этом номере и в №3 за 2017 год.

Индекс 29151

LVI exitus magazine

ONTOLOGISTS AND DESIGNERS OF ALL COUNTRIES AND SUBJECT AREAS, JOIN US!

https://www.ontology-of-designing.ru/