

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

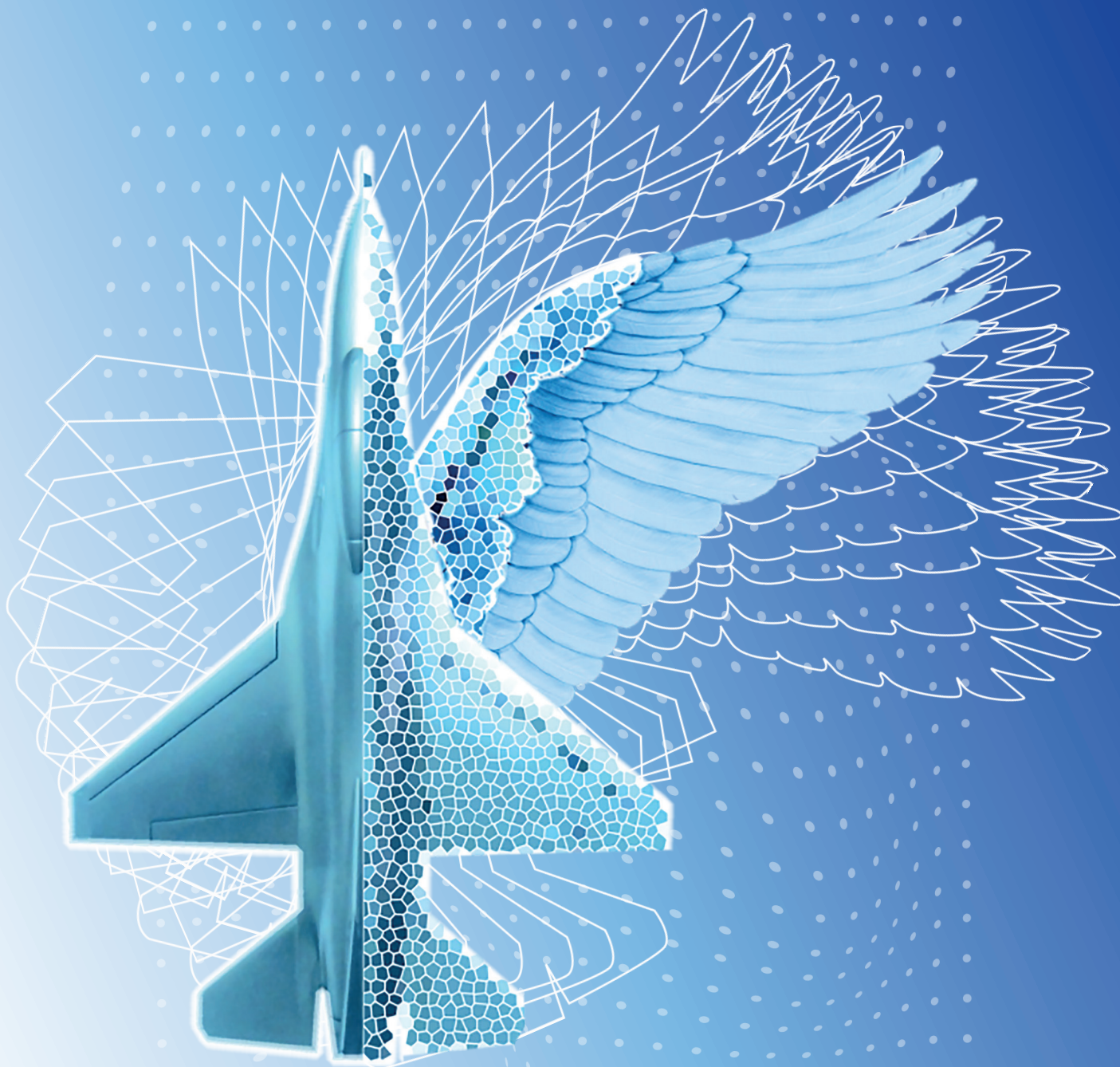
Vol 14

2024

№4

Научный журнал -
Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



300 лет
Российской
1724 - 2024 академии наук



Передовые
инженерные
школы

Scientific journal

Volume 14

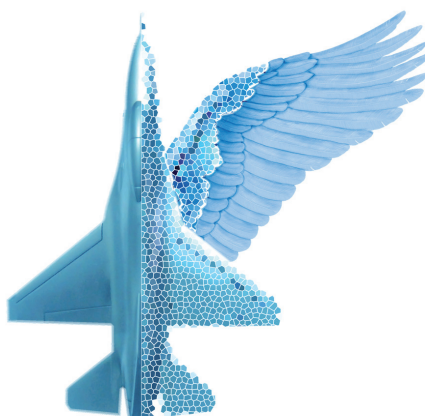
N 4

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 14

№ 4



Editorial Board - Редакционная коллегия

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

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

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

Executive Editorial Board - Исполнительная редакция

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

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

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

Журнал 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 с 01.12.2015) 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.

Журнал включен в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе **Web of Science**. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1.280** (2015), **1.083** (2016), **0.993** (2017), **1.205** (2018), **0.835** (2019), **1.060** (2020), **0.977** (2021), **0.895** (2022).

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

В плену дихотомии управления 461-465

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

О.П. Кузнецов 466-482

О машинном обучении, мифах о сильном искусственном интеллекте и о том, что такое понимание

С.В. Шалагин, Г.Э. Шалагина 483-492

Оценка антропологического воздействия интерфейсов на этапе проектирования программно-аппаратного обеспечения

В.В. Миронов, К.В. Миронов 493-503

Концептуально-онтологические аспекты множественности предка в информационных моделях «сущность-связь»

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.В. Грибова, Д.Б. Окунь, Е.А. Шалфеева 504-517

Применение графов знаний для клинического мониторинга процесса лечения

К.Л. Панчук, И.В. Крысова, Е.В. Любчинов, Т.М. Мясоедова 518-530

Конструктивные алгоритмы автоматизированного решения позиционных задач

М.В. Бобырь, Н.И. Храпова 531-541

Информационно-аналитическая система детектирования движения объектов на пешеходном переходе

А.Р. Гатиатуллин, Д.Р. Мухамедшин, Н.А. Прокопьев, Д.Ш. Сулейманов 542-554

Электронный корпус татарского языка на базе модели лингвистических графов знаний

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

Н.О. Дородных, А.Ю. Юрин 555-568

Разработка предметных графов знаний на основе семантического аннотирования табличных данных

И.О. Датъев, А.М. Фёдоров, А.А. Ревякин 569-581

Фокусированный сбор и обработка открытых данных социальных медиа

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

С.В. Смирнов 582-594

Интерактивное приложение, реализующее метод уверенных суждений на массовой программной платформе

В.Г. Мокрозуб, А.А.М. Альсаиди 595-606

Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника

В.Б. Чечнев 607-624

Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений

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: 443020, Самара, ул. Садовая, 61, тел./факс.: +7 (846) 333 27 70, Смирнов С.В., smirnov@iccs.ru.

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

Отпечатано в ООО «Новая техника» (типография), 443013, г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 07.11.2024. Тираж 200 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

Caught in a dichotomy of control 461-465

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

O.P. Kuznetsov 466-482

On machine learning, myths about General AI, and what understanding is

S.V. Shalagin, G.E. Shalagina 483-492

Assessing the anthropological impact of interfaces in the design stage of software and hardware

V.V. Mironov, K.V. Mironov 493-503

Conceptual and ontological aspects of the plurality of ancestors in «entity-relationship» information models

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

V.V. Gribova, D.B. Okun, E.A. Shalfeeva 504-517

Application of knowledge graphs for clinical monitoring of the treatment process

K.L. Panchuk, I.V. Krysova, E.V. Lyubchinov, T.M. Myasoedova 518-530

Constructive algorithms for automated solutions to positional problems

M.V. Bobyr, N.I. Khrapova 531-541

Information and analytical system for detecting the movement of objects on a pedestrian crossing

A.R. Gatiatullin, D.R. Mukhamedshin, N.A. Prokopyev, D.S. Suleymanov 542-554

Electronic corpus of the Tatar language based on the model of linguistic knowledge graphs

ONTOLOGY ENGINEERING

N.O. Dorodnykh, A.Yu. Yurin 555-568

Development of domain knowledge graph based on semantic annotation of tabular data

I.O. Datyev, A.M. Fedorov, A.A. Reviakin 569-581

Focused collection and processing of open social media data

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

S.V. Smirnov 582-594

An interactive application implementing the confident judgments method on a mass software platform

V.G. Mokrozub, A.A.M. Alsaïdi 595-606

Decision support system for selecting the type of shell-and-tube heat exchanger

V.B. Chechnev 607-624

Analysis and classification of the multi-criteria decision-making methods

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: 61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia. Tel.: +7 (846) 333 27 70, S.V. Smirnov, smirnov@iccs.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

В плену дихотомии¹ управления Caught in a dichotomy of control

«Разделяй и властвуй».
Гай Юлий Цезарь², «Записки триумфатора»

«Некоторые вещи в нашей власти, в то время как другие - нет.
В нашей власти находятся мнение, мотивация, желание, ..., т.е. всё,
что мы сами делаем; не в нашей власти ... всё, что не наших рук дело».
Эпиктет³, «Энхиридион»

«Делай, что должно, и свершится, чему суждено».
Марк Аврелий⁴

«В чём Галилей расходился с Церковью, так это в своём понимании
отношения между физической реальностью, с одной стороны, и чело-
веческими мыслями, наблюдениями и рассуждениями – с другой».
Дэвид Дойч⁵, «Структура реальности»

«Управлять можно тем, что есть, а проектируют то, чего нет»⁶

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

На прошедшем 29 мая 2024 года семинаре «Проблемы искусственного интеллекта», организованном Российской ассоциацией искусственного интеллекта совместно с Федеральным исследовательским центром «Информатика и управление» РАН⁷, обсуждались онтологии, как основания для создания информационных систем (ИС). Разработка онтологии в каждой предметной области (ПрО) основана на знаниях специалистов, привлекаемых для формализации их представлений о ПрО, о сущностях, атрибутах, отношениях и их наименованиях, о процессах и ролях сущностей, о критериях и оценках всего, что есть в ПрО. Именно специалисты или их агенты, как субъекты этой ПрО, мысленно или явно погружённые в неё, по определению находятся в «плену» дихотомии управления, опираясь на различные источники и собственное представление, свой опыт и контекст исследуемых ситуаций. Они, первоначально разделяя, декомпозируя пространство ПрО на сущности, выделяют их из него; изучая свойства этих сущностей, выделяют из них важные для рассматриваемых и исследуемых процессов в ПрО; выявляя отношения, в которых эти сущности пребывают в этой ПрО, вы-

¹ Дихотомия (иначе «Стадий») - одна из четырёх апорий древнегреческого философа Зенона (490–425 гг. до н. э.) известна как метод классификации путём деления на два вида объёма понятия (класса, множества), в котором члены деления логически несовместимы (см., например, Большая российская энциклопедия 2004–2017. <https://old.bigenc.ru/philosophy/text/1960890>). Про классы, множества и парадоксы Зенона см. также: Боргест Н.М. Понятие «множество» в теории и практике проектирования // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №3(49). С.306-332.

² Гай Юлий Цезарь (100-44 до н.э.) - древнеримский государственный и политический деятель, полководец, писатель.

³ Эпиктет (50-138 гг.) - древнегреческий философ-стоик; основал в Никополе философскую школу. Выдержки из его учения, известные под названиями «Беседы» и «Руководство» (Энхиридион), сохранились в записи его учеников.

⁴ Марк Аврелий (121-180 гг.) - римский император, философ - представитель позднего стоицизма, последователь Эпиктета.

⁵ Дэвид Дойч (David Deutsch; 1953) - британский физик-теоретик (Оксфордский университет), автор научно-популярных книг «The Fabric of Reality» и «The Beginning of Infinity». Сайт учёного: <https://www.daviddeutsch.org.uk/>.

⁶ Боргест Н.М. Ключевые термины онтологии проектирования: обзор, анализ, обобщения. *Онтология проектирования*. №(9). 2013. С.9-31. https://www.ontology-of-designing.ru/old/article/2013_3%289%29/3_Borgest.pdf.

Кажущаяся несовместимость приведённых многочисленных эпиграфов призвана вызвать интерес, а потом помочь читателю сформировать цельность, связность и глубину излагаемых в редакционной статье мыслей уже после её прочтения.

⁷ Боргест Н.М. Онтологии и информационные системы. 29.05.2024. <http://seminar.railab.ru/index.php?id=15>.

<https://ssau.ru/news/23014-professor-nikolay-borgest-vystupil-s-dokladom-na-seminare-v-moskve>.

бирают из них те, которые оказывают наибольшее влияние на происходящие процессы в ПрО; при этом пытаются для всех случаев моделирования ПрО найти разумные с их точки зрения критерии важности, отбора и приоритизации сущностей, свойств, отношений и процессов в этой ПрО. Объективная ограниченность знаний и компетенций специалистов (здесь можно вспомнить Сократа и его крылатую фразу «Я знаю, что я ничего не знаю») позволяет утверждать, что любая построенная людьми или машиной онтология ПрО, как модель ПрО, - это субъективная (полностью зависящая от сложившихся в ПрО теорий и используемых понятий) картина той части реального мира, которая сама по себе всегда богаче представлений, сформированных создателями этих онтологий ПрО. Тем не менее, именно созданные онтологии позволяют находить консенсус в коммуникациях между специалистами и машинами, в которые загружены онтологии ПрО, именно они позволяют за счёт релевантного и адекватного понимания акторами сути вещей в ПрО ускорить решение тех задач, которые стоят в этой ПрО.

В главе 52 «Энхиридиона» говорится о трёх областях философии⁸, где на первом месте принципы в форме наставлений (например, «не лгать»). Вторая область философии связана с внешними проявлениями принципов (например, почему нельзя лгать). Третья область разъясняет и анализирует две другие: т.е. учит, как распознавать ложь в текущем моменте, учит, что такое истинное и ложное и т.д. Третья область необходима для доступа ко второй, а вторая - для доступа к первой. Большинство задерживается на третьей области, посвящая ей все усилия и забывая о самой важной первой. Поэтому мы постоянно лжём, высказывая доводы в доказательство того, что лгать не надо⁸...

Эпиктет на примере факторов здоровья исследует понятие «некоторый контроль», отмечая важность этической ответственности за намерение быть здоровым (заниматься физическими упражнениями и правильно питаться на благо себя и общества). Предполагать, что у нас есть некоторый контроль над вещами вне этой сферы, значит впасть в сумбурное мышление, ведущее к «разочарованию, печали и беспокойству». Беспокоиться о том, что может быть в какой-то степени под вашим контролем, - это цепляться и надеяться на контроль там, где его нет (см. эпиграф Эпиктета о контроле). Спасение от нужды или страдания всегда в наших руках.

В наше бурное время растёт интерес к стоицизму и растёт число публикаций⁹, в которых обсуждаются принципы стоицизма. Практические руководства по полноценной и довольной жизни, черпающие вдохновение в древней философии стоиков, могут помочь людям ориентироваться в вызовах и неопределённости современной жизни.

Другой взгляд на природу бытия рассматривается в книге Д. Дойча «Начало бесконечности»¹⁰ (2011), в которой развиваются идеи его книги «Структура реальности»¹¹ (1997). Одним из важных утверждений автора является его объяснительная теория, согласно которой целью науки является **объяснение**¹², а не предсказание. Сбывшееся предсказание - лишь результат правильного объяснения, которое никогда не бывает полным, а одни объяснительные теории сменяют другие. При этом, благодаря совершенствованию этих теорий, мир понимается лучше¹³. На своём сайте⁵ Д. Дойч приводит глоссарий к книге, давая лаконичные, оригинальные и небесспорные определения ряду важных терминов. Вот некоторые из них.

Объяснение - утверждение о том, что существует, что оно делает, как и почему.

⁸ *Эпиктет. Энхиридион* (Краткое руководство к нравственной жизни); Симпликий. Комментарий на «Энхиридион» Эпиктета. СПб.: «Владимир Даль», 2012. 399 с.

⁹ William B. Irvine. A Guide to the Good Life: The Ancient Art of Stoic Joy. OUP USA. 2009. 336 p.
Donald Robertson. Stoicism and the Art of Happiness: A Teach Yourself Guide. McGraw-Hill Education, 2014. 224 p.
Steven Gambardella. Stoicism and Health. AUG 01, 2024. <https://substack.com/home/post/p-147229192>.

¹⁰ Дойч Д. Начало бесконечности: Объяснения, которые меняют мир / Пер. с англ. М.: Альпина нон-фикшн, 2014. 581 с.

¹¹ Дойч Д. Структура реальности. Наука параллельных вселенных / Пер. с англ. М.: «Альпина нон-фикшн», 2015. 451 с.

¹² См. также: Коммюнике онтологического саммита 2019: ОБЪЯСНЕНИЕ (Фрагмент проекта «*Ontology Summit 2019 Communiqué: Explanations*» в журнале *Онтология проектирования*, том 9, №2(32)/2019. С.299-300.) и статью Боргеста Н.М. Стратегии интеллекта и его онтологии: попытка разобраться // *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.407-428.

¹³ Дойч, Дэвид. https://ru.wikipedia.org/wiki/Дойч,_Дэвид.

Человек - сущность, способная создавать объяснительные знания.

Вычисления - физический процесс, который реализует свойства некоторой абстрактной сущности.

Доказательство - вычисление, которое, исходя из теории работы компьютера, на котором оно выполняется, устанавливает истинность некоторого абстрактного утверждения.

Наибольший интерес для читателя нашего журнала в книге Д. Дойча представляет глава «Искусственное творческое мышление», где автор рассуждает об искусственном интеллекте (ИИ), о способах его создания и оценки, включая тест Тьюринга.

Забегая вперёд и обращая внимание нашего читателя на статью профессора О.П. Кузнецова о мифах сильного ИИ и о понимании, опубликованную в этом номере журнала, стоит отметить, что Д. Дойч в заключение рекомендуемой главы пишет: «...в области универсального ИИ не достигнуто никакого прогресса из-за нерешённой философской проблемы, лежащей в её основе: мы не понимаем, как устроено творческое мышление...». Д. Дойч утверждает, что объяснения обладают способностью вызывать изменения, и стремление улучшить их является основным регулирующим принципом не только науки, но и всех успешных человеческих начинаний. Поток постоянно совершенствующихся объяснений потенциально имеет бесконечный охват, т.к. известные законы природы не накладывают предела на то, что можно понять, контролировать и достичь.

Научные теории - это объяснения, т.е. утверждения о том, какие процессы и явления существуют в мире и как они протекают. Теории - это догадки и гипотезы, возникающие в голове у человека, который играет идеями, комбинирует и видоизменяет их, сочетая с существующими идеями с целью усовершенствования бытия. Человек не начинает жизнь с «чистого листа», у него есть врождённые ожидания, намерения и способности совершенствовать их с помощью мышления и опыта. Опыт играет в науке важную роль, но главное его предназначение - помочь определиться с выбором одной из нескольких уже предложенных теорий. Дойч сравнивает науку с фокусом, который можно наблюдать и предсказать его результат. Но это не даёт возможности подойти к проблеме того, как устроен фокус, и уж тем более решить её. Для этого требуется объяснение того, что мы видим.

В некоторых областях науки (например, в статистическом анализе) слово «объяснение» стало означать «предсказание», и говорят, что математическая формула «объясняет» набор экспериментальных данных. Под «действительностью» понимаются данные наблюдений, которые формула должна аппроксимировать. Таким образом, для утверждений о реальности не остаётся места - можно лишь признать её «полезной фикцией».

Инструментализм - один из многих способов отрицания реализма, учения о том, что физический мир существует на самом деле и доступен рациональному изучению. Логическим следствием из такого отрицания является то, что все утверждения о реальности эквивалентны мифам, и ни одно из них не лучше другого в объективном смысле. Инструментализм не имеет смысла в своих же собственных терминах. Ведь чисто предсказательной теории, не использующей объяснений, не существует. Даже самое простое предсказание невозможно без опоры на достаточно сложную объяснительную базу. Суть экспериментальной проверки в том, что для рассматриваемого вопроса известно как минимум две жизнеспособные на вид теории, дающие противоречащие друг другу предсказания, которые можно разграничить путём эксперимента. Подобно противоречащим друг другу предсказаниям в случае с экспериментом и наблюдением, в более широком смысле противоречащие друг другу идеи имеют место в случае с рациональным мышлением и исследованием¹⁰.

В книге «Структура реальности»¹¹ Д. Дойч рассматривает критерии реальности.

Изменяются не только объяснения, изменяются наши критерии и представления о том, что должно считаться объяснением. Список приемлемых способов объяснения всегда будет оставаться открытым, а потому и список приемлемых критериев реальности также должен оставаться открытым. Дойч утверждает, что если в соответствии с простейшим объяснением какая-либо сущность является сложной и автономной, значит, эта сущность реальна. Существование общих объяснительных теорий подразумевает, что несравнимые объекты и события некоторым образом физически схожи. В физической реальности есть математические символы, в которых существуют образы этой реальности в целом, образы не только внешнего вида объектов, но и структуры реальности. Существуют описания и объяснения Большого взрыва и субъядерных частиц и процессов; существуют математические абстракции; художественная литература; искусство; этика; теньевые фотоны и параллельные вселенные. В той степени, в какой эти символы, образы и теории истинны, т.е. сходны в определённом отношении с конкретными или абстрактными вещами, к которым они относятся, их существование даёт реальности новый вид самоподобия. **Это самоподобие и есть знание** - заключает Дойч.

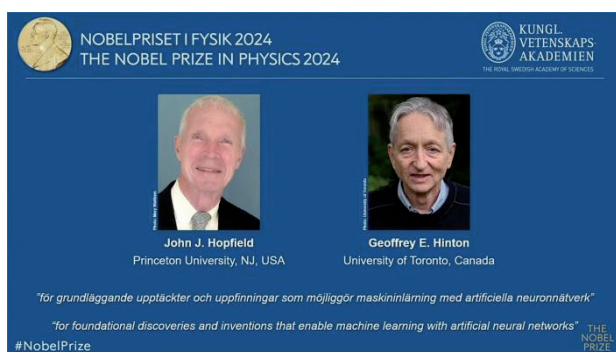
Модная тема интеллектуального анализа данных в социальных сетях не обошла и наш журнал. В этом номере журнала статья наших коллег из Кольского научного центра посвящена сбору и обработке данных в этих сетях. Однако разрабатываемые боты («хорошие» и «плохие») уже активно конкурируют с человеком, и ожидать релевантные результаты такого анализа становится всё труднее.

Плохие боты - это программные приложения, которые выполняют автоматизированные задачи со злым умыслом¹⁴. Они собирают данные с сайтов без разрешения, чтобы использовать их и получить конкурентное преимущество (например, цены, уровни запасов, фирменный контент). Они используются для создания распределённых атак, нацеленных на сеть или приложение. Особо опасные из них занимаются преступной деятельностью (мошенничество, воровство).

Из всего Интернет-трафика в 2022 году 47,4% был автоматизированным трафиком, т.е. созданным ботами, по сравнению с 42,3% в 2021 году. Из этого автоматизированного трафика 30,2% были плохими ботами, на 2,5% больше в 2021 году. Хорошие боты также растут, составляя 17,3% по сравнению с 14,6% в 2021 году. Процент человеческого трафика продолжает свою тенденцию к снижению, с 57,7% в 2021 году до 52,6% в 2022 году. Из всех атак, зафиксированных *Imperva* за последний год, 27% были плохими ботами. США остаются приоритетной целью атак ботов, т.к. 41,1% атак были направлены на веб-сайты, базирующиеся в США. Австралия стала второй страной, подвергшейся наибольшему количеству атак плохих ботов в 2022 году (16,4% атак ботов), на Великобританию было направлено 6,8% атак, Россия на 10-ом месте (1.5%).

Теория «мёртвого Интернета»¹⁵ утверждает, что активность и контент в Интернете, в т.ч. аккаунты в социальных сетях, в основном создаются и автоматизируются агентами ИИ. Уже сейчас есть убедительные доказательства того, что эти боты манипулируют социальными сетями, чтобы влиять на общественное мнение с помощью дезинформации. Теория о «мёртвом Интернете» — это напоминание о том, что нужно быть скептическим и критически относиться к социальным сетям и другим веб-сайтам. У «теории мёртвого Интернета» есть объяснение: контент, созданный ИИ и ботами, превысил контент, созданный людьми.

В этом году научную общественность удивило решение Нобелевского комитета¹⁶, которое подтвердило факт, что «информация правит миром». «Никто и подумать не мог, что лауреатами Нобелевской премии по физике станут нейробиологи и информатики»¹⁷, но лауреатами Нобелевской премии¹⁸ по физике стали американский учёный Джон Хопфилд (1933 г.р.) и британско-канадский учёный Джеффри Хинтон (1947 г.р.) за «основополагающие открытия и изобретения, которые сделали возможным машинное обучение с использованием искусственных нейросетей». Научные достижения лауреатов также применяются при моделировании климата, разработке солнечных батарей и анализе медицинских изображений. Взяв за основу фундаментальные принципы физики, Хинтон и Хопфилд разработали алгоритмы, позволяющие использовать структуру машинных сетей для обработки информации, что позволяет программе обучаться и совершенствоваться самостоятельно, уже без помощи человека. Вдохновившись одной из систем, обнаруженных в атомной физике, Джон Хопфилд в 1982 году придумал сеть Хопфилда - нейросеть, способную запоминать изображения (и любые шаблоны), а потом воссоздавать их. Джеффри Хинтона некоторые называют



«отцом ИИ», он главный среди тех, кто придумал первые «глубокие сети». Используя сеть Хопфилда и инструменты из статистической физики, Хинтон создал новый тип нейросетей - машину Больцмана, способную научиться распознавать в данных характерные элементы или признаки.

На пресс-конференции после сообщения о присуждении премии Хинтон назвал свою работу над нейронными сетями революционной,

¹⁴ 2023 Imperva Bad Bot Report. 2023. 44 p. <https://www.imperva.com/resources/reports/2023-Imperva-Bad-Bot-Report.pdf>

¹⁵ Renzella J., Rozova V. The 'dead internet theory' makes eerie claims about an AI-run web. The truth is more sinister. The Conversation. Academic rigour, journalistic flair. May 20, 2024. <https://theconversation.com/the-dead-internet-theory-makes-eerie-claims-about-an-ai-run-web-the-truth-is-more-sinister-229609>.

¹⁶ Press release. The Nobel Prize in Physics 2024. 8 October 2024. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2024/press-release/>.

¹⁷ iLushkеры. 10 окт в 13:03. Размышления о Нобелевской премии по физике 2024. <https://habr.com/ru/articles/849668/>.

¹⁸ Штайнер А. Нобелевская премия 2024. Granite of science. Научно-популярный журнал. 08.10.2024. <https://un-sci.com/ru/2024/10/08/nobelevskaya-premiya-2024-obnovlyaetsya/>.

но также выразил беспокойство по поводу её возможного применения в будущем. Он сказал, что не сожалеет о своих открытиях и готов сделать их снова. «Но меня беспокоит, что в результате этого могут появиться системы, более интеллектуальные, чем мы, которые в конечном итоге возьмут управление в свои руки», - отметил учёный, говоря «с некоторой долей сожаления» о проведённых исследованиях¹⁹.

Не обошли награды и членов редколлегии нашего журнала. Так, 4 октября 2024 г. на заседании Объединённого учёного совета СамНЦ РАН заместителю главного редактора С.В. Смирнову вручён знак «Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации», а 18 октября на заседании учёного совета Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королёва медали «За безупречный труд и отличие» Минобрнауки РФ был удостоен выпускающий редактор журнала Н.М. Боргест.



Виртуальных медалей «За бескорыстный труд на благо науки» удостоены все члены редколлегии и редакции журнала, т.к. считают поток позитивных откликов от читателей и авторов журнала. В нашем случае медаль, как знак, как символ, имеет своё материальное воплощение в виде печатных номеров журнала, где в каждом номере отмечаются имена тех, кто поддерживает журнал своим участием. Этих медалей удостоены и все авторы, которые делятся своими знаниями, добывая их в упорном труде. Все действующие лица, участвующие в создании и выпуске журнала, сеют «разумное, доброе, вечное», а призыв великого русского поэта Н.А. Некрасова актуален, как никогда, и сейчас «...Сейте! Спасибо вам скажет сердечное русский народ...».

В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» рассмотрены: мифы о сильном ИИ и что такое понимание (**Москва**); оценки антропологического воздействия интерфейсов на этапе проектирования программно-аппаратного обеспечения (**Казань**); концептуально-онтологические аспекты множественности предка в информационных моделях «сущность-связь» (**Уфа**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: графы знаний для клинического мониторинга при лечении пациентов (**Владивосток**); конструктивные алгоритмы автоматизированного 3D-решения позиционных задач (**Омск**); информационно-аналитическая система детектирования движения объектов на пешеходном переходе (**Курск**); электронный корпус татарского языка на базе модели лингвистических графов знаний тюркских языков (**Казань**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» рассмотрены: разработка предметных графов знаний на основе семантического аннотирования табличных данных (**Иркутск**); технология фокусированного сбора и обработки открытых данных социальных медиа (**Апатиты**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» рассмотрены: интерактивное приложение, реализующее метод уверенных суждений на массовой программной платформе (**Самара**); система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника (**Тамбов**); классификация основных многокритериальных методов принятия решений (**Москва**).

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！

¹⁹ Нобелевский лауреат по физике Хинтон заявил о рисках, связанных с нейросетями. 8 октября 2024. <https://www.interfax.ru/world/985807>.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.5

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-466-482



О машинном обучении, мифах о сильном искусственном интеллекте и о том, что такое понимание

© 2024, О.П. Кузнецов

Институт проблем управления РАН, Москва, Россия

Аннотация

В первой части статьи обсуждается книга американского учёного Э. Ларсона «Миф об искусственном интеллекте», которая посвящена разоблачению мифов об искусственном интеллекте. Эти мифы, история которых насчитывает более половины века, заключаются в том, что возникновение человекоподобного («сильного») искусственного интеллекта, а в дальнейшем и сверхинтеллекта якобы неизбежно, и оно произойдёт как бы само собой – в результате постепенной эволюции систем искусственного интеллекта. Критика этих мифов проводится в книге по двум направлениям: научному и социальному. Показано, что машинное обучение не ведёт к сильному искусственному интеллекту, а миф об искусственном интеллекте ослабляет веру в человеческий потенциал. Во второй части статьи рассматривается проблема понимания. Предлагается концепция когнитивной семантики, основанная на идеях Дж. Лакоффа, С. Пинкера, А. Дамасио и А. Сета. В частности отмечается, что: понимание – это интерпретация в терминах картины мира человека; картину мира строит наш мозг, и она структурируется через категоризацию опыта человека; значения (смыслы) формируются раньше, чем формируются понятийные структуры; в основе значений лежат биологические и социальные цели; в когнитивных процессах участвует не только мозг, но и тело, а понимание связано с действиями в среде, знания о которой содержатся в картине мира. В заключении статьи указываются тупики, трудности и опасности на пути к сильному искусственному интеллекту.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, индукция, абдукция, понимание, когнитивная семантика, картина мира.

Цитирование: 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.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Книга американского учёного и предпринимателя Э. Ларсона «Миф об искусственном интеллекте» [1] – хороший повод для обсуждения современного состояния искусственного интеллекта (ИИ) и его перспектив. Эта книга посвящена разоблачению мифов об ИИ, которые возникли ещё в середине прошлого века и активно обсуждаются в последнее десятилетие в научном (и не только) сообществе в связи с несомненными успехами нейросетевых технологий и машинного обучения (МО).

Прежде, чем начать рассказ об этой книге, следует договориться о словах.

Слова «искусственный интеллект» как в книге Ларсона, так и во всех обсуждениях проблем, связанных с ИИ, понимаются в двух смыслах: как компьютерная наука, разрабатыва-

ющая методы решения интеллектуальных задач, и как продукты этой науки, т.е. машинные реализации её методов. Иногда эти слова употребляются в обоих смыслах в пределах одного абзаца, и всякий раз понятно, что имеется в виду. Такова языковая реальность. Попытки многих профессионалов удерживать только первое значение этих слов не устояли под напором огромного количества текстов, в которых «ИИ» понимается во втором смысле, и число которых постоянно увеличивается в связи с растущим интересом общества к проблемам ИИ.

Основной предмет обсуждения книги – ИИ во втором смысле, точнее, перспективы создания человекоподобного ИИ. Для этого понятия в английском и русском языках существует несколько синонимов. В книге Ларсона и в других англоязычных текстах человекоподобный ИИ фигурирует как *artificial general intelligence* (с соответствующей аббревиатурой *AGI*) или просто *general intelligence*. Из существующих русскоязычных синонимов (сильный, общий, универсальный, настоящий) можно использовать термин «сильный» как наиболее устоявшийся. Однако его естественный антоним «слабый» уместен лишь в качестве общей характеристики состояния интеллектуальных технологий. Неправильно называть конкретные интеллектуальные системы (ИС) «слабыми» только потому, что они решают (притом успешно) только одну задачу. Поэтому вместо «слабого ИИ» лучше использовать термин «ограниченный ИИ» (у Ларсона *narrow*), «узкий» или «узкоспециальный» ИИ.

1 О книге Э. Ларсона

1.1 История мифов об ИИ

Суть мифа об ИИ: возникновение человекоподобного ИИ, а в дальнейшем и сверхинтеллекта неизбежно, и оно произойдёт как бы само собой в результате постепенной эволюции систем ИИ.

Мифы об ИИ постоянно возникали, начиная с 1950-х гг. Впервые роковое слово «сингулярность» произнес Джон фон Нейман (1950-е гг., свидетельство Улама, приведённое в [2]): *«Постоянное ускорение технологического прогресса... свидетельствует о приближении некоей существенной сингулярности в истории человеческого рода, после наступления которой человеческая деятельность, какой мы её знаем, продолжаться уже не сможет»*.

Джон Гуд, криптограф, работавший с Тьюрингом во время Второй мировой войны над расшифровкой немецких радиogramм, в 60-е годы утверждал, что, если машина способна развить интеллект человеческого уровня, то она сможет и превзойти обычное человеческое мышление, т.е. возникнет «ультраинтеллектуальная машина», которая *«сможет проектировать всё более совершенные машины, после чего непременно произойдет интеллектуальный взрыв, и человеческий интеллект останется далеко позади. Поэтому первая ультраинтеллектуальная машина станет последним изобретением, которое придётся создавать человеку»* [3].

В 1960-е годы многие ведущие специалисты по ИИ высказывались о скором создании ИИ, сравнимого с человеческим. Герберт Саймон в 1965 году предсказывал, что в ближайшие двадцать лет *«машины научатся выполнять любую работу, которая под силу человеку»*. В 1967 году Марвин Мински объявил, что *«проблема создания ИИ будет по большей части решена в рамках одного поколения»*¹.

Начиная с 80-х гг. XX-го века, прогнозы развития ИИ стали приобретать апокалиптический характер: возникли предсказания о неизбежном создании сверхчеловеческого интеллекта, с появлением которого наступит «сингулярность». Типичным высказыванием в этом духе было заявление Вернора Винджа (Калифорнийский университет): *«В ближайшие трид-*

¹ Несколько позже (в 1975 г.) лидер советской кибернетики В.М. Глушков в интервью «Литературной газете» [4] заявил, что человекоподобный ИИ может быть создан до 2000 года.

цать лет у нас появятся технические возможности для создания сверхчеловеческого интеллекта. Вскоре после этого эра человечества подойдёт к концу... Я думаю, правильно будет назвать данное событие сингулярностью. Это та самая точка, где наши прежние модели перестают работать, и наступает новая реальность» [5].

Интересно, что примерно это же время характеризуется серией серьёзных неудач в сфере ИИ. Провалились проекты создания высококачественного машинного перевода, разработки диалоговых систем, способных пройти тест Тьюринга, проект «ЭВМ пятого поколения» и др. Интерес общества к проблемам ИИ и объёмы финансирования проектов, связанных с ИИ, сильно поубавились. И только появление Интернета, ставшего генератором больших массивов данных, и успехи МО, которые во многом основаны на работе с большими данными, дали новую жизнь этим пророчествам.

Одним из наиболее активных пропагандистов сингулярности стал неоднократно цитируемый в книге Ларсона Рэймонд Курцвейл — технический директор *Google* в области МО. В серии книг, опубликованных в 1990-2000-е годы [6-8], он развил концепцию, согласно которой технологии развиваются по экспоненциальному закону в соответствии со сформулированным им «законом ускорения отдачи». По его мнению, в 2029 году должен появиться полноценный человеческий ИИ, после чего к 2045 году возникнет сверхинтеллект [8]. Его рождение обозначит точку невозврата — сингулярность, с наступлением которой прогресс пойдёт по неизвестному пути. Это будет переломный момент, когда самыми разумными существами на планете станут машины.

Говорить о происходящей эволюции ИИ-систем в том же смысле, в каком говорят об эволюции в живой природе или об эволюции человечества, по крайней мере, некорректно. Эволюция некоторого сообщества агентов в строгом смысле слова предполагает способность этого сообщества к самовоспроизводству, т.е. к постоянной генерации агентами новых поколений, в ходе которой они наследуют свойства агентов прежних поколений, приобретают новые свойства и становятся всё более сложными. Никакого самовоспроизводства ИИ-систем не наблюдается. Более сложные ИИ-системы производятся не их предыдущими поколениями, а людьми. Самые совершенные на текущий момент системы являются всего лишь инструментами в руках человека. Поэтому так называемая «эволюция ИС» — это в действительности эволюция человеческих идей.

Впрочем, у фон Неймана (в отличие от Гуда, Курцвейла и их последователей) были основания размышлять об эволюции машин, поскольку он всерьёз рассматривал возможности создания самовоспроизводящихся автоматов и их эволюции в указанном выше строгом смысле [9]. Его идеи имели продолжение (см., например, [10]), но в процессе развития ИС реализация этих идей практически отсутствует. Решится ли когда-нибудь человечество заняться созданием самовоспроизводящихся машин в промышленном масштабе и тем самым выпустить очередного (вслед за атомной бомбой и генетическим редактированием) джина из бутылки — вопрос будущего.

Типичным представителем более умеренной позиции при обсуждении проблем создания сильного ИИ является известный специалист в области ИИ Стюарт Рассел, который *«стремится различать серьёзную работу в области разработки сильного ИИ и его изображение в массовой культуре»*. Он и его сторонники не сомневаются в скором появлении сильного ИИ. Предвидя серьёзные проблемы в отношениях сильного ИИ и человека, Рассел предлагает *«действовать на опережение и встраивать в сверхинтеллектуальные машины будущего определённые принципы»*, которые должны исключить возможность апокалиптических сценариев. Эти принципы подробно изложены в его книге [11].

Заметим, что эти принципы своей декларативностью и внутренними противоречиями напоминают знаменитые «три закона робототехники» Айзека Азимова.

Популярность мифов об ИИ в обществе Ларсон объясняет тем, что они имеют признаки китча — продукта массовой культуры. *«Во-первых, китч подразумевает упрощение сложных идей. Необходима простая и понятная история. Во-вторых, китч предлагает лёгкие решения, избавляющие людей от волнений по поводу жизненных проблем, вместо того чтобы решать их при помощи серьёзного, тщательного обсуждения. Отличный тому пример — мечтательное представление о том, что когда-нибудь появится невероятный андроид, обладающий сверхинтеллектом, который*

перестроит человеческое общество с его устаревшими традициями и взглядами, и люди вступят в новую эру, где, по счастью, не будет места былым спорам о Боге, природе сознания, свободе воли, праведной жизни и тому подобном» [1].

Критика мифов об ИИ ведётся в книге по двум направлениям: научному и социальному. По мнению Ларсона, с научной точки зрения прогноз о неизбежности появления сверхразума не имеет под собой оснований: современные тренды и методы построения ИС не ведут не только к возникновению сверхчеловеческого интеллекта, но даже и к созданию сильного ИИ, т.е. ИИ, сравнимого с человеческим. С социальной точки зрения эти мифы небезобидны и ведут к серьёзным негативным последствиям для развития науки и для общества в целом.

1.2 ИИ: логический вывод, представление знаний и машинное обучение

Обоснование недостижимости сильного ИИ методами МО Ларсон строит на подробном обсуждении проблем, связанных с логическим выводом и его использованием в ИС.

Важнейшим аспектом интеллекта – как естественного, так и искусственного – является умение рассуждать, т.е. делать умозаключения. *«Если ИС совершенно не способна строить умозаключения, то она не заслуживает того, чтобы называться интеллектуальной»* [1]. В логике известны три основных вида умозаключений (логических выводов): дедукция, индукция и абдукция.

Дедукция – вывод от общего к частному: *если A , то B ; A истинно; следовательно, B истинно.*

Индукция – вывод от частного к общему: *все известные объекты класса A обладают свойством B ; следовательно, все объекты класса A обладают свойством B .* Важным частным случаем индукции является статистический вывод. Пример: *в некоторой выборке элементов класса A x процентов обладают свойством B ; следовательно, во всем классе A x процентов его элементов обладают свойством B .*

Абдукция – вывод от следствия к причине: *если A , то B ; B истинно; следовательно, A истинно, т.е. A – причина B .*

Каждый из этих видов имеет свои достоинства и недостатки. Дедуктивный вывод является достоверным: если обе его посылки истинны, то заключение гарантированно истинно. Поэтому он служит хорошим средством для обоснования высказанных утверждений и проверки возможных ошибок в рассуждениях. Однако он не создаёт новых знаний в том смысле, что не порождает новых общих утверждений. Кроме того, формальная дедукция не гарантирует релевантности, так как истинная посылка вида «если...то» не всегда описывает причинно-следственную связь. Индукция даёт новые знания, т.е. порождает общие утверждения, но не гарантирует их достоверность. Никакое число положительных примеров не гарантирует, что следующий пример не окажется отрицательным. *«Наши наблюдения и тесты всегда неполны. Корреляции могут указывать на достоверную реальную причину (как на некоторое знание), но мы могли что-то упустить при наблюдении и проверке того, что случилось. Корреляция может быть мнимой или случайной. Возможно, мы ищем не то. Выборка может быть слишком мала или нерепрезентативна по причинам, которые выяснятся лишь позднее»* [1].

Индуктивный вывод о будущем характере процесса, развивающегося во времени, – это экстраполяция, предполагающая, что закономерность развития, наблюдаемая в прошлом и настоящем, сохранится и в будущем. Без дополнительных аргументов такой вывод не является обоснованным: например, известно немало процессов с длительным степенным или экспоненциальным ростом, которые со временем выходят на плато. Именно такой необоснованной экстраполяцией является «закон ускорения отдачи» Курцвейла.

Первые успехи в автоматизации дедуктивного вывода были достигнуты на заре ИИ. Уже в конце 50-х гг. XX-го века была создана программа «Логик-теоретик» А. Ньюэлла, К. Шоу и Г. Саймона, которая могла доказывать многие логические теоремы. Но для того, чтобы делать содержательные выводы, нужно иметь обширную базу знаний (иначе откуда брать истинные

посылки для вывода?). Поэтому в 60-70-е годы в ИИ одно из первых мест по числу исследований заняла инженерия знаний - методы извлечения, представления, хранения знаний, доступа к ним и работы с ними. Довольно быстро стало ясно, что главная проблема заключается не столько в разработке методов, сколько в необъятности тех обыденных знаний, которые хранятся в голове у человека и которые следовало бы хранить в любой ИС, претендующей на человекоподобное поведение.

«Министерство обороны США в своё время вкладывало огромные суммы в создание крупных баз обыденных знаний. Эксперты, компетентные в логике и вычислениях, по капле скармливали этим системам тривиальные утверждения, например, «у живого человека есть голова», или «поливалки брызгаются водой», или «от воды вещи мокнули» и так далее» [1].

Это занятие превратилось в *«проблему бездонного ведра: задача наполнения вычислительной базы знаний утверждениями, выраженными в виде логических высказываний, оказывается бесконечной. Не удаётся решить даже простейшие задачи, основанные на здравом смысле, — например, рассуждать о происшествиях, возникающих в городском квартале или районе, — если не будут реально кодифицированы огромные объёмы, казалось бы, нерелевантных знаний» [1].*

Уже более 30 лет существует проект Сус Дугласа Лената. Система Сус содержит множество логических утверждений о фактах и общих понятиях типа «Объект не может находиться более чем в одном месте в одно время», а также алгоритмы вывода из этих утверждений. «На лекции в 2015 году Ленат сказал, что в настоящий момент в Сус содержится 15 миллионов утверждений и предположил, что, вероятно, это около пяти процентов от необходимого» [12]. Тем не менее, этот проект не оказал существенного влияния на основные направления исследований в сфере ИИ.

МО индуктивно; проблемы, характерные для индуктивного вывода, относятся и к МО. Главная из них — недостоверность индукции. *«Границы мира системы МО строго ограничены тем набором данных, на котором она тренируется. В реальном мире наборы данных генерируются круглосуточно, семь дней в неделю. Следовательно, любой конкретный набор данных охватывает лишь очень небольшой период и лишь частично отражает свойства, присущие системам в реальном мире» [1].*

Взрослый человек в некотором смысле «обучен всему». В огромном множестве разнообразных ситуаций, не выходящих за рамки «обычного», т.е. согласующихся с накопленным опытом, разные люди ведут себя по-разному, но, как правило, адекватно — отклонения от нормы довольно быстро отмечаются окружением. В любой необычной ситуации какие-то частицы накопленного опыта (начиная с базовых знаний типа упомянутых выше: «объект не может находиться более чем в одном месте в одно время» и т.д.) всё равно оказываются полезными; с их помощью (и — что крайне важно! — с помощью неразгаданного пока наукой «здравого смысла») человек постепенно начинает в этой ситуации как-то ориентироваться.

Обученные системы не таковы. *«Если будущее представляется неопределённым, а изменения желательны, системы приходится переобучать. Машинное обучение может двигаться лишь за потоком нашего опыта, имитируя полезные (остаётся на это надеяться) регулярности. При этом нас ведёт именно разум, а не машина» [1].* Другими словами, не система решает, что ей надо переобучиться, а человек, который её обучает.

А что же с абдукцией? В книге [1] абдуктивному выводу и его первооткрывателю Чарльзу Сандерсу Пирсу уделяется значительное место. Абдукция — это рассуждение от события к его причинам. Недостоверность абдукции ещё более очевидна, чем недостоверность индукции. То, что из A следует B и событие B произошло, вовсе не означает, что причиной B является именно A : возможных причин события B может быть много. Иначе говоря, могут быть истинными посылки «если A_1 , то B », ..., «если A_n , то B », причём n неопределённо велико, A_1 , ..., A_n — возможные гипотезы о причине, и только некоторые из них, быть может, верны. При этом в случае, когда верны A_i , B и «если A_i , то B », то A_i может оказаться не причиной B , а корреляцией, т.е. A_i и B могут быть следствиями одной и той же причины A_j .

Именно с множественностью возможных причин связаны проблемы врача, ищущего причины боли в желудке, проблемы инженера, выясняющего, почему прибор не работает, и проблемы детектива, занятого поиском преступника и мотивов преступления. Для успеха этого поиска нужно, во-первых, иметь знания о возможных гипотезах, причём, если врач эти знания либо черпает из своего опыта, либо получает из медицинской литературы, то для детектива в каждом преступлении много уникального, и соответствующие знания (улики, сведения о подозреваемых и т.д.) надо ещё добывать. Во-вторых, гипотезы надо проверять; при этом многие гипотезы человеком отбрасываются практически сразу, как не имеющие отношения к делу. Умение отличать существенное от несущественного, релевантное от нерелевантного – важная черта человеческого интеллекта.

Выводы, которые мы совершаем, зачастую являются догадками, которые кажутся нам релевантными или правдоподобными, — а не дедукцией или индукцией. Если дедукция и индукция не подходят, то у нас обязательно должна быть теория абдукции. Поскольку у нас её (ещё) нет, можно сделать вывод, что пока мы не вышли на путь к сильному ИИ [1].

На абдукцию Ларсон возлагает особые надежды. Однако вряд ли они оправданы. Как видно из аргументов, изложенных в книге, решение проблемы абдукции неразрывно связано с формализацией названных выше свойств интеллекта, которые обобщённо называют здравым смыслом. А до этой формализации ещё далеко, и, как считает Ларсон, МО, весь датацентричный ИИ, к ней не приближает. **Путь к сильному ИИ через машинное обучение – это тупик.**

Ещё одно направление в современном ИИ, рассматриваемое сторонниками мифов как путь к сильному ИИ – это обработка естественного языка. Этот путь в книге [1] также подвергается серьёзному анализу и критике. Главным аргументом здесь является отсутствие понимания.

За последнее десятилетие машинное обучение и большие данные позволили добиться существенного прогресса при решении некоторых задач, но, как правило, при помощи путей, которые позволяют обойтись без фактических знаний и понимания [1].

Основное внимание в этой части книги уделяется вопросно-ответным системам – в частности, потому, что с ними связаны многочисленные попытки пройти тест Тьюринга. Обсуждаются предложения по его усовершенствованию: в частности, ужесточение требований к участникам теста с целью исключить различные трюки (приёмы, известные со времен «Элизы»: повтор вопроса в качестве ответа, общие фразы, не отвечающие на вопрос, попытки уклонения от ответа и т.д.), а также методы разработки вопросов, имеющих целью поймать систему на непонимании смысла. Особый интерес представляют предложенные Г. Левеском и его коллегами [13, 14] «схемы Винограда» – вопросы, содержащие неоднозначность, разрешить которую можно, только используя либо контекст, либо некоторые знания о предметах, упомянутых в вопросе.

На момент выхода книги [1] лучшие результаты вопросно-ответных систем по ответам на схемы Винограда не превышали 62% [1]. Вот как объясняет Ларсон причины этих неудач. *«...любые два слова или фразы, заключённые в одном вопросе, резко снижают ожидаемую частоту встречаемости такого сочетания. Следовательно, в больших данных все эти примеры относительно редки, хотя и просты. А в случаях, когда два имени или именных словосочетания все-таки могут встречаться в сети, достаточно просто изменить отношение между этими существительными, переставив их местами. Этот способ позволяет сбить частотность и победить современные методы, ориентированные на большие данные. Поэтому вопросы из схем Винограда во всех отношениях не поддаются машинной имитации — именно этим и объясняются слабые результаты тех систем, что применялись для автоматизации прохождения этого теста» [1].*

Ещё один плохо формализуемый аспект здравого смысла — прагматика, т.е. понимание целей и намерений говорящего, которые передаются через контекст, жесты и интонации.

Например, вопрос за столом «Можешь передать мне соль?» — это вовсе не вопрос, а просьба, которая ожидает не ответ «Могу», а действие, т.е. передачу соли.

Подводя итог обсуждению успехов и неудач машинного обучения, Ларсон подробно рассказывает о том, как создавалась система *Watson*, которая на момент выхода книги была наиболее успешной вопросно-ответной системой. Отдавая должное изобретательности команды её разработчиков, он заключает, что «*Watson также не был шагом в развитии ИИ, а только лишний раз подтвердил, что поиск сильного ИИ по-прежнему вязнет в путанице и тайнах. Хотя команда IBM действительно добилась впечатляющей победы, воспользовавшись мощной гибридной системой, но эта работа не помогла подобрать ключ к пониманию языка*» [1].

Справедливости ради заметим, что в 2021 году, когда вышла книга Ларсона, ещё не были в центре общественного внимания большие языковые модели (LLM; наиболее известна модель *BERT* и серия моделей *GPT*). В книге [1] они не обсуждаются. Их возможности ещё предстоит выяснять, хотя уже ясно, что они гораздо выше возможностей предыдущих систем обработки языка. Однако они тоже основаны на обучении и больших данных, т.е. имеют индуктивную (точнее, статистическую) природу, а потому вся критика, связанная с недостатками индукции и отсутствием понимания, относится и к ним.

1.3 Социальные аспекты мифов об ИИ: наука и общество

Мифы об ИИ небезобидны и имеют нежелательные социальные последствия. Вера в миф о саморазвивающейся эволюции ИС, по мнению Ларсона, ослабляет веру в человеческий потенциал. «*В нынешней мифологии человеческий разум начинает восприниматься как устаревающая модель грядущих машин*» [1]. В основе этой мифологии лежат растущие вычислительные мощности, генерируемые Интернетом Большие данные и ИИ, понимаемый как машинное обучение на этих данных.

На заре Интернета, предоставившего невиданные ранее возможности для общения и обмена информацией миллионам людей, преобладали пророчества о всплеске человеческого потенциала. «*Веб не только сулил сделать нас умнее и осведомлённее, но и должен был помочь нам эффективнее сотрудничать, чтобы мы выстраивали современные цифровые пирамиды, преобразовывали науку и культуру*». Эти иллюзии довольно быстро сменились «*мировоззрением, в котором люди рассматриваются как винтики в гигантской машине*» [1].

В 2008 г. редактор журнала *Wired* Крис Андерсон заявил, что в связи с появлением Больших данных приходит конец теоретической науке [15]. В 2015 году Шон Хилл (один из руководителей проекта *Human Brain Project - HBP*) указывал, что будущее науки связано с крупными коллаборативными проектами, а отдельных учёных лучше всего расценивать как единицы «роя» [16]. Инициатор этого проекта Генри Маркрам утверждал, что такие гении, как А. Эйнштейн, теперь уже не нужны. «*Нас тормозит всеобщее мнение, что нужен новый Эйнштейн, который объяснил бы, как работает мозг. На самом же деле нам требуется отодвинуть в сторону собственное эго и создать новый вид коллективной нейронауки*» [17]. Ларсон отмечает, что эти взгляды приводят «к компьютеро-центричному мировосприятию, где человеческий потенциал принижается в пользу господства машин. Наука движется вслед за онлайн-культурой, от человеческих идей до мегатехнологий, к консолидации власти в крупных технологических компаниях и к общей стагнации и замедлению инноваций» [1].

Проект *HBP* первоначально предполагал построение цифровой копии мозга на основе данных обо всех нейронах и синапсах мозга. Его целью по мысли Маркрама было движение «от генетического, молекулярного уровня к нейронам и синапсам, далее к цепям нейронов, макроцепям, мезоцепям, долям мозга — до тех пор, пока не возникнет понимание того, как связаны между собой все эти уровни и как они определяют поведение и формируют сознание». Предполагалось, что по мере накопления данных о мозге понимание его работы возникнет как бы само собой. При этом исследования «верхнего уровня» (когнитивные архитектуры, мышление и поведение) оттеснялись на второй план. Эта политика вызвала серьёзную критику, в результате ко-

торой содержание проекта свелось к разработке инструментов и методов моделирования мозга. Проект просуществовал 10 лет и был завершён в 2023 г., не достигнув объявленной цели.

Вот как описала достижения HBP экспертная комиссия, которая оценивала итоги проекта, в своём пресс-релизе: «Уже сегодня инфраструктура EBRAINS открывает возможности для новых приложений в области здоровья мозга и технологий, производных от мозга. HBP установила новую парадигму цифровой нейробиологии и новую междисциплинарную культуру сотрудничества. Среди особо важных достижений - ведущие цифровые атласы мозга, передовые платформы для моделирования мозга во всех масштабах, применение когнитивного моделирования и персонализированной медицины, а также выдающиеся достижения в области нейроморфных вычислений, нейро-вдохновлённой робототехники и ИИ».

Неплохо, но всё же это очень далеко от обещанной «точной модели мозга».

В качестве примера успешного проекта, основанного на современных технологиях, Ларсон приводит открытие бозона Хиггса. «Случай Хиггса особенно впечатляет в плоскости теории, а не только в плоскости больших данных... Питер Хиггс превзошёл открытие этой частицы в 1964 году; БАК (Большой Адронный Коллайдер) впоследствии лишь подтвердил её существование. Это пример правильного использования технологий, дополняющих человеческие озарения» [1].

В итоге: «порочная привычка продвигать ИИ больших данных в качестве панацеи угрожает прогрессу в фундаментальных дисциплинах, таких как нейронауки, — несмотря на смелые заявления Маркрама и других энтузиастов. В данном случае вывод таков: миф самым реальным образом скатывается на человеческом будущем и на реальной науке» [1].

Ещё один аспект социальных последствий мифов об ИИ - индустриализация науки. «Технологические стартапы, ещё недавно будоражившие инвесторов, теперь сводятся к идее «пусть их купит технический гигант вроде Google...» Эти гиганты ... монополизировали доступ к инновациям, так как ИИ больших данных всегда лучше работает у тех, у кого в наличии больше данных» [1]. Ещё Норберта Винера беспокоила эта тенденция, которую он в своей опубликованной только после его смерти статье [18] назвал «мегабаксовый наукой». Опасность заключается, во-первых, в том, что новые идеи в своей начальной стадии не гарантируют прибыли, и потому инвестировать в них рискованно. Во-вторых (и здесь он предвидел современные мысли о «роевом разуме»), «расчёт на генерацию по-настоящему значительных новых идей путём умножения низкокачественной человеческой деятельности и случайной перестановки имеющихся идей без участия первоклассного разума, который руководил бы отбором этих идей — очередная версия истории о печатающих обезьянах» [18].

Кратким итогом обсуждения в книге [1] перспектив развития ИИ при сохранении современных трендов можно считать следующую цитату: «Мы фактически наблюдаем эволюцию подвидов индуктивного ИИ, хорошо функционирующего в узких основанных на больших данных окружениях, но однозначно неспособного усваивать здравый смысл и достигать подлинного понимания. Этот подход не имеет ничего общего с сильным ИИ» [1].

В заключение раздела отметим ещё одно препятствие на пути к сильному ИИ, которое до сих пор сравнительно мало обсуждается. В книге Ларсона о нём не говорится. Речь идёт о непомерном росте вычислительных мощностей (и соответственно, оборудования), энергопотребления и экологических последствий (выбросы CO₂, расход воды для охлаждения и т.д.) при эксплуатации больших ИС. Например, в обзоре [19] отмечается, что «вычисления, требуемые для обучения, должны расти, по крайней мере, как полином четвёртого порядка от качества... Из-за сложности глубокого обучения качество может быть значительно хуже». А ведь речь идёт об ограниченных системах, решающих какую-то одну задачу. И в этом отношении ИИ проигрывает мозгу, который весит около 1 кг и потребляет мощность примерно 20-30 Вт.

Несмотря на успехи ИИ, базовые преимущества мозга перед компьютером сохраняются. Следующие прорывы в ИИ невозможны без прорывов в изучении информационных процессов мозга. И среди главных проблем на этом пути – проблема понимания.

2 О понимании

Люблю обычные слова,
Как неизведанные страны.
Они понятны лишь сперва,
Потом значенья их туманны.
Их протирают, как стекло,
И в этом наше ремесло.

Давид Самойлов «Слова» (1961)

«Понимание» – одно из ключевых слов при обсуждении перспектив и проблем развития ИИ, а «отсутствие понимания» – один из главных аргументов в критике мифов о скором появлении человекоподобного ИИ. Об этом много говорится в книге Ларсона. Мелани Митчелл посвятила несколько глав своей книги [12] «барьеру понимания» как важному препятствию на пути к сильному ИИ. А Генри Маркрам в проекте *HBP* рассчитывал на то, что создание цифровой копии мозга автоматически приведёт к пониманию того, как он работает. О том, что её построение не привело бы к пониманию работы мозга, говорит эксперимент, описанный в статье [20], который имеет непосредственное отношение к проблеме понимания.

Нейробиологи, вооружившись методами, обычно применяемыми для изучения живых нейроструктур, попытались использовать их, чтобы понять, как функционирует простейшая микропроцессорная система. Объектом исследования стал чип (*MOS 6502*), использованный во множестве персональных компьютеров и игровых приставок. Об этом чипе известно всё, но исследователи сделали вид, что не знают ничего, и попытались понять его работу, изучая теми же методами, которыми изучают живой мозг.

Была удалена крышка, под оптическим микроскопом изучена схема с точностью до отдельного транзистора. Чип был подвергнут тысячам измерений одновременно: во время его работы измерены напряжения на каждом проводке и определено состояние каждого транзистора. Это породило поток данных в полтора гигабайта в секунду, который анализировался. Строились графики всплесков от отдельных транзисторов, выявлялись ритмы, отыскивались элементы схемы, отключение которых делало её неработоспособной, находились взаимные зависимости элементов и блоков и т.п. Однако *понять*, что делает этот микропроцессор, т.е. какова его функция, исследователям так и не удалось.

В статье [20] сформулирован следующий критерий понимания: *«Понимание части системы возникает, когда можно описать её входы, выходы и преобразования от входов к выходам настолько точно, что эту часть можно заменить искусственным компонентом»*.

Этот критерий можно истолковать в двух вариантах: сильном и слабом. Сильный вариант означает, что для понимания нужна математическая модель этой части системы – именно математическая, а не квадратики со стрелками, – поскольку только математика умеет точно описывать преобразования. Слабый вариант предполагает, что для ограниченного числа входных воздействий известно, какие выходные реакции последуют. С этим вариантом имеет дело обычный пользователь бытового прибора, который внимательно прочёл инструкцию и знает, какие кнопки надо нажимать, чтобы получить нужные действия. Он понял, *как* прибор работает, и даже – как заменять некоторые компоненты (например, батарейки); но не понимает, *почему*: полное описание преобразований (т.е. как прибор устроен внутри и каковы причины, по которым происходят те или иные его действия), он не знает – да ему это и не нужно.

Описанный в [20] эксперимент иллюстрирует важный методологический принцип: *интерпретация данных не может проводиться в терминах самих данных*. Для неё нужен язык более высокого уровня с другой системой понятий. Для науки это язык теории. Как сказал А. Эйнштейн, *«Лишь теория решает, что мы ухитряемся наблюдать»*. Ключевое слово – *интерпретация*, иначе говоря, осмысление, придание значения. В науке интерпретация фактов, т.е.

их понимание происходит в терминах теории. В обыденном мышлении человека понимание происходит в терминах его *картины мира*.

Понятие картины мира возникло давно. В обширном обзоре истории этого понятия, содержащемся в книге [21], отмечается, что впервые оно появилось ещё в XVIII веке, а систематически стало употребляться во второй половине XIX века для описания состояния объективного, т.е. общенаучного знания о мире. Идея субъективной картины мира («*Umwelt*»), присущей каждому живому существу, впервые была высказана немецким биологом Якобом фон Иксюлем в 1909 г. [22]². Интерес представляют субъективные, когнитивные аспекты картины мира человека, которые следовало бы назвать когнитивной семантикой. В настоящее время под когнитивной семантикой, как правило, подразумевается раздел лингвистики, который исследует языковые средства передачи различных смыслов. Следуя подходу Дж. Лакоффа [25], будем считать когнитивной семантикой исследование всех (не только языковых) средств извлечения, хранения смыслов и выражения их в языке, жестах, поведении и т.д.

В наше время «хайпов», когда на каждую перспективную идею набрасываются сотни исследователей, а публикации более чем пятилетней давности считаются устаревшими, при этом существуют концепции, которые ждут своего часа десятилетиями. Такова замечательная книга Лакоффа «Женщины, огонь и опасные вещи» [25], которую цитировали такие известные специалисты, как нейропсихолог Антонио Дамасио и нейролингвист Стивен Пинкер. Однако её идеи по-прежнему остаются (незаслуженно!) в стороне от мирового тренда.

Концепция когнитивной семантики, которая излагается ниже, основана на работах Дж. Лакоффа [25], С. Пинкера [26]³, А. Дамасио [27], А. Сета [28] и заключается в следующем.

1. Понимание – это интерпретация в терминах картины мира человека⁴.
2. Картину мира строит наш мозг, и эта картина (например, интуитивная физика: то, как человек представляет себе внешний мир) может сильно отличаться от того, каким мир является на самом деле, т.е. каким его представляет научное знание.
3. Картина мира структурируется через категоризацию опыта человека, в ходе которой формируются понятия и связывающие их образно-схематические структуры.
4. Значения (смыслы) формируются раньше, чем формируются понятийные структуры: они возникают из нашего допонятийного телесного опыта. Смыслы первичны, их языковое оформление вторично.
5. В основе значений лежат биологические и социальные цели, в первую очередь, выживание.
6. В когнитивных процессах участвует не только мозг, но и тело.
7. Понимание связано с действиями в среде, знания о которой содержатся в картине мира.

Краткие комментарии к этим тезисам.

1. Следует отличать отсутствие понимания от неправильного понимания. Отсутствие понимания означает, что воспринимаемое не удаётся вписать в имеющуюся картину мира: у человека нет нужных понятий (и, соответственно, слов), чтобы его описать или задать разумные вопросы. В этом случае картину мира приходится достраивать, т.е. приобретать новые знания.

Неправильное понимание означает, что нужные понятия нашлись и интерпретация произошла, но она не соответствует реальному миру. Здесь возможны два варианта. Первый: противоречие с картиной мира слишком явно; возникает когнитивный диссонанс и желание его устранить [31]: либо интерпретация отвергается («Этого не может быть!», «Я не могу этого представить!» и даже «Я этого не понимаю!» - хотя на самом деле «Понимаю, но не принимаю»), либо картину мира приходится перестраивать (например, изменять своё мнение

² Подробнее о взглядах фон Иксюля см. [23, 24].

³ Обзоры книг Лакоффа и Пинкера содержатся в статьях [29] и [30], соответственно.

⁴ Указанные авторы, если и употребляют понятие «картина мира», то как метафору, а не как термин. Здесь это понятие является ключевым.

о каком-то знакомом человеке). Второй: явное противоречие сразу не обнаруживается, и человек долгое время (может быть, всю жизнь) с ним живёт; например, считает, что Солнце вращается вокруг Земли или что все лебеди белые. Известно, что обыденное мышление склонно сохранять существующую картину мира и сопротивляться её перестройке. В [31] отмечается, что при наличии двух альтернатив, одна из которых соответствует картине мира, а другая противоречит ей, человек предпочитает искать дополнительные аргументы в пользу первой альтернативы. *«Человек будет искать такие источники информации, которые способствовали бы добавлению консонантных элементов, и будет избегать источников, увеличивающих диссонанс»* [31]. Поскольку перестройка картины мира требует значительных когнитивных (а иногда и эмоциональных) усилий, стремление к её сохранению вполне соответствует концепции «когнитивной лени» Д. Канемана [32], т.е. минимизации когнитивных усилий.

О стремлении к устойчивости картины мира, различиях между критическим, обыденным и догматическим типами мышления, а также о том, чем явное противоречие отличается от неявного, подробно говорится в [33].

2. Базовая картина физического мира строится мозгом на основе перцептивного опыта, который, как указывает А. Сет [28], *«определяется содержанием нисходящих предсказаний, а не восходящих сенсорных сигналов»*. Иначе говоря, мозг постоянно предсказывает свои ощущения и проверяет свои предсказания опытным путём, обучаясь на ошибках. *«Мы воспринимаем окружающий мир, чтобы эффективно в нём действовать, добиваться своих целей и в конечном итоге повышать свои шансы на выживание. Мы воспринимаем мир не таким, какой он есть, а таким, каким он нам полезен»* [28]. Поэтому «интуитивная физика», т.е. система представлений обычного человека о физическом мире, сильно отличается от научных физических знаний. Уже *«классическая ньютоновская физика глубоко контринтуитивна»* [26], не говоря о квантовой механике и теории относительности. Тем не менее в стандартных ситуациях этой интуитивной физики оказывается достаточно.

Типичный пример – слесарь-электрик, который не знает ни уравнений Максвелла, ни теории цепей Кирхгофа и представляет электричество как поток некой жидкости. Тем не менее он прекрасно справляется с ремонтом бытовых электроприборов и домашних электрических сетей. Это случай «слабого» понимания, о котором говорилось при обсуждении статьи [20]. Он хорошо иллюстрирует тезис о том, что обыденному мышлению нужна не истина, а польза.

Истина и польза не являются альтернативами. Но истина не входит в число неотъемлемых жизненных целей человека. На неё, как правило, нужно тратить когнитивные усилия, размышлять, а действовать, чаще всего, нужно здесь и сейчас. Поэтому в стандартных ситуациях, которые составляют большую часть жизни человека, действует быстрая Система 1 Канемана [32], основанная на схемах. Но и медленная, рациональная Система 2 не всегда добивается до истины: либо по объективным причинам (если получение истины слишком сложно), либо из-за недостаточных знаний, либо по причине когнитивной лени [32, 34]. Если приходится выбирать между истиной и пользой, человек, как правило, выбирает (иногда вынужденно) пользу – можно вспомнить историю Галлея, которому пришлось выбирать между истиной и выживанием.

Сказанное относится только к обыденному мышлению. Целью научного мышления является получение истины. В промежуточном положении находятся различные формы профессионального мышления: не случайно доказательная медицина – это лишь часть медицины.

3. Структура картины мира описана в книге Лакоффа [25]. Она имеет два уровня: а) базовый, допонятийный, определяемый гештальтным восприятием и сенсорно-двигательным опытом; б) абстрактные понятийные структуры. Категории базового уровня – гештальты (целостно воспринимаемые образы); отношения между ними строятся на основе образных схем⁵

⁵ Важную роль схем в организации знаний и рассуждений отмечают многие исследователи когнитивных процессов человека. Наряду с упомянутыми книгами [25, 26, 32] следует назвать книги [35, 36]. Важность схем отмечал М. Минский, назвав их фреймами [37]. Помимо указанных базовых схем человек обладает огромным количеством схем, сформированных в личном опыте (профессиональные схемы, схемы типичных ситуаций и т.д.).

типа *вместилище, путь, связь, сила, равновесие, верх-низ, спереди-сзади, часть-целое, центр-периферия*, которые часто встречаются в нашем телесном опыте. Именно со структур базового уровня, воспринимаемых непосредственно, начинается формирование картины мира у детей. Абстрактные понятийные структуры возникают либо в результате операций обобщения-конкретизации, либо с помощью метафорического переноса структур базового уровня на абстрактный уровень. Например, категория времени характеризуется схемой *спереди-сзади* (будущее впереди, прошлое позади). При этом категории базового уровня находятся в середине иерархии общего-конкретного. Обобщение происходит вверх от базового уровня, конкретизация – вниз. Пример: собака – базовая категория, хищник – обобщение, овчарка – конкретизация. Эту структуру категорий впервые описала Элеонора Рош в своей теории прототипов [38].

В рабочей (оперативной) памяти человека всегда присутствует только незначительная часть картины мира, и только к этой части предъявляются требования согласованности и непротиворечивости. В этом – одна из главных причин типичной для обыденного мышления фрагментарности и слабой чувствительности к противоречиям. Часто фрагмент картины мира, находящийся в рабочей памяти, называют репрезентацией (например, в [36]).

Репрезентации – это конструкции, зависящие от обстоятельств. Они построены в конкретном индивидуальном контексте для специфических целей: для осведомлённости в данной ситуации, для того, чтобы быть готовым к требованиям текущей ситуации и понимать текст, инструкцию, проблему. Репрезентации учитывают всю совокупность элементов ситуации или задачи. Они очень специфичны, детализированы и непрочны. Репрезентация модифицируется, если изменилась вся ситуация или незаметный элемент вдруг стал заметным.

Знания – это конструкции, обладающие постоянством и существенно не зависящие от выполняемой задачи. Знания хранятся в долговременной памяти [36].

4. Значения (смыслы) для человека первичны и возникают раньше понятий и языка. Например, годовалые дети, ещё не владеющие языком, уже имеют некоторый набор базовых значений, который они получают из своего телесного опыта. Картина мира содержит только значимые понятия, и люди оперируют только теми понятиями, которые включены в их картину мира. *Сами понятия хранятся в форме, гораздо более абстрактной, чем предложения. ... люди плохо помнят конкретные предложения, из которых они почерпнули свои знания. Однако это не мешает людям запоминать суть того, что они услышали или прочитали [26].* При этом *«суть»* воспринятого у разных людей может отличаться, поскольку у них разные картины мира и, соответственно, разные интерпретации.

Часто можно наблюдать, как человек ищет слова, чтобы выразить свою мысль. Вот что говорит А. Эйнштейн о том, как он думает: *«Слова, написанные или произнесённые, не играют, видимо, ни малейшей роли в механизме моего мышления. Психическими элементами мышления являются более или менее ясные знаки или образы, которые могут быть «по желанию» воспроизведены или скомбинированы. ... Элементы, о которых я только что говорил, у меня бывают обычно визуального или изредка двигательного типа. Слова или другие условные знаки приходится подыскивать (с трудом) только во вторичной стадии, когда эта игра ассоциаций дала некоторый результат и может быть при желании воспроизведена» [39].*

5. Значимость воспринимаемых фактов и событий определяется их возможным влиянием на достижение тех или иных целей. Человек – это прежде всего биологический организм, и одна из его фундаментальных целей – выживание, т.е. пребывание в одном из состояний, совместимых с жизнью. Поскольку человек ещё и социальный организм, то под выживанием имеется в виду не только поддержание физиологических параметров, совместимых с жизнью, но и таких социальных параметров, как качество жизни, «выживание в обществе», т.е. занятие в нём определённого места, обеспечивающего это качество, и т.д. *«Последствия достижения или недостижения сложной социальной цели способствуют (или воспринимаются как способствующие), хотя и косвенно, выживанию и качеству выживания» [27].*

6. В когнитивных процессах участвует не только мозг, но и тело. *Эмоции, чувства и биологическая регуляция – все они играют роль в рассуждениях человека. Низшие слои нашего организма включены в цикл высших рассуждений* [27]. Об этом говорят все авторы книг [25-28]. Дж. Лаккофф называет наше мышление воплощённым (*embedded*), т.е. непосредственно связанным с телом. Книга известного нейropsychолога А. Дамасио [27] целиком посвящена обоснованию этого тезиса. Характерно её название: «Ошибка Декарта» (известно, что Декарт резко отделял разум от тела). Телесные состояния и механизмы напрямую влияют на когнитивные процессы. «*Мозг, отделённый от тела, не может иметь нормальный разум*» [27].

7. Картина мира нужна для того, чтобы действовать в мире, опираясь на знания о нём. На это указывал ещё Иксюль [22]. Действия нужны не только для достижения своих целей, но и для проверки (и, возможно, коррекции) картины мира. Мозг постоянно предсказывает свои ощущения и проверяет эти предсказания опытным путём. «*Основопологающее занятие мозга – порождение действий и постоянная их калибровка с учётом сенсорных сигналов. С этой точки зрения мозг предстаёт динамичной, активной системой, непрерывно прощупывающей среду и изучающей последствия*» [28]. При этом действие не обязательно должно быть физическим. В социальной среде действие – это и коммуникация: задавание вопросов, способствующих пониманию, навязывание своей картины мира собеседнику или обществу и т.д.

Из изложенных тезисов вырисовывается примерный образ понимающей системы: это автономный активный агент, действующий в среде, умеющий ставить цели, стремиться к их достижению и способный формировать и корректировать свою картину мира. Читатель скажет: ведь это робот! Да, современные роботы автономны, активны, умеют достигать своих целей и даже создавать свою картину мира (например, пространства, в котором они передвигаются). Более того, у них уже есть нечто, что можно интерпретировать как эмоции и темперамент [40]. Но цели им ставит человек, и только под эти ограниченные цели устроена их картина мира и средства её корректировки.

Получается, что понимающему роботу нужны свои собственные неотъемлемые цели, то же выживание, т.е. самосохранение. Но не появятся ли тогда у него свои «три закона робототехники», где на первом месте будет он сам, а не человек? И будет ли возникшее у него понимание похоже на человеческое? Парадокс – стремясь получить человекоподобный интеллект, мы рискуем получить нечто принципиально «человекоподобное». Нам это надо?

Заключение

На пути к сильному ИИ есть тупики, трудности и опасности. Как показано в разделе 1, МО – тупик. Это касается не только тех систем, которые обсуждаются в книге Ларсона, но и больших языковых моделей, появившихся позже. Более того, обсуждение понимания наводит на мысль, что тест Тьюринга не является тестом на способность мыслить: если, конечно, считать, что «мыслить» – это не только рассуждать, но и понимать, о чём ты рассуждаешь. Именно в формализации здравого смысла заключаются основные трудности на пути к сильному ИИ.

Невольно возникает вопрос: а может быть, любой цифровой путь к человекоподобному интеллекту – это тупик? Ведь мозг не вычисляет! Его механизмы хранения и обработки информации совсем не похожи на компьютерные механизмы. Уже неоднократно было замечено: то, что сложно человеку, просто компьютеру, и наоборот, то, что сложно компьютеру, просто человеку. Серьёзные прорывы в ИИ невозможны без прорывов в изучении информационных процессов мозга. При этом важно исследовать не только механизмы, управляющие этими процессами, но и их поразительную энергоэффективность.

Что касается опасностей, их можно разделить на две группы. Первая группа – это опасности, которые возникают из злоупотребления уже существующими возможностями ИИ. Вто-

рая группа опасностей носит экзистенциальный характер. После резкой критики (вместе с Ларсоном) мифов об ИИ, т.е. прогнозов Гуда-Курцвейла и их сторонников о грядущей сингулярности, размышления о понимании приводят к чему-то на первый взгляд похожему. Внешнее сходство действительно есть: в обоих случаях речь идёт о риске получить ИИ, не контролируемый человеком. Однако есть и принципиальная разница. Мифы об ИИ предполагают, что движение к сильному ИИ не контролируется уже сейчас, и что сильный ИИ неизбежно возникнет как бы сам собой в естественном ходе развития ИС; но современные тренды ИИ к сильному ИИ не ведут. Риски возможны на двух путях: самовоспроизводящиеся машины в смысле фон Неймана [9] и попытки наделить активные ИС пониманием в смысле, описанном в разделе 2, причём риски первого пути ничтожны и напоминают упоминавшуюся историю о печатающих обезьянах. Что же касается второго пути, то не исключено, что со временем придётся вводить ограничения и запреты, подобно тем, которые уже вводятся человечеством по отношению к экспериментам с человеческими эмбрионами и генетическим редактированием. Стоит прислушаться к предостережению Сета: «Нам не стоит слепо и бездумно добиваться стандартной цели ИИ – воспроизвести, а затем превзойти человеческий интеллект. Мы создаём разумные инструменты, а не коллег. Если мы действительно внедрим в мир новые разновидности субъективного опыта, нам придётся иметь дело с нравственно-этическим кризисом беспрецедентных масштабов» [28].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Erik J. Larson.** The Myth of Artificial Intelligence. Why Computers Can't Think the Way We Do // The Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, Massachusetts • London, England. 2021. 288 p.
- [2] **Shanahan Murray.** The Technological Singularity. Cambridge, MA: MIT Press, 2015, 233 p.
- [3] **Good Irving John.** Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine. *Advances in Computers* 6 (1965) 6: 31–88.
- [4] **Глушков В.М.** Интервью «Литературной газете». Литературная газета, 1975, №1.
- [5] **Vinge Vernor.** The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-Human Era // in Vision-21: Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace, ed. G. A. Landis, NASA Publication CP-10129, 1993, 11–22.
- [6] **Kurzweil Ray.** The Age of Intelligent Machines. The MIT Press. 1992. 565 p.
- [7] **Kurzweil Ray.** The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence. Penguin Books, 2000. 404 p.
- [8] **Kurzweil Ray.** The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology. NY: Penguin Group, 2005. 652 p.
- [9] **Neumann John von.** Theory of Self-Reproducing Automata. Edited and completed by Arthur W. Burks. University of Illinois Press, 1966. 403 p. Русский перевод: Дж. Фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов. Закончено и отредактировано А. Берксом. М.: Мир, 1971. 382 с.
- [10] **Mange D., Stauffer A., Peparaolo L., Tempesti G.** A Macroscopic View of Self-replication. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92 (12): 1929–1945.
- [11] **Russell Stuart.** Human Compatible: Artificial Intelligence and the Problem of Control. New York: Viking, 2019. 352 p. Русский перевод: Стюарт Рассел. Совместимость. Как контролировать искусственный интеллект. М.: Альпина нон-фикшн, 2021. 438 с.
- [12] **Mitchell Melanie.** Artificial Intelligence: A Guide for Thinking Humans/ New York: Farrar, Straus, and Giroux, 2019. 336 p. Русский перевод: Митчелл Мелани. Идиот или гений? Как работает и на что способен искусственный интеллект. М.: АСТ, 2022. 384 с.
- [13] **Levesque H.J., E. Davis, Morgenstern L.** The Winograd Schema Challenge // *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 2012. P.552-561.
- [14] **Davis E., Morgenstern L., Ortiz C.** The Winograd Schema Challenge, <https://cs.nyu.edu/~davis/papers/WinogradSchemas/WS.html>.
- [15] **Anderson Chris.** The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete. *Wired*, June 23, 2008.
- [16] **Hill Sean.** Simulating the Brain/ in Gary Marcus and Jeremy Freeman, eds., *The Future of the Brain: Essays by the World's Leading Neuroscientists*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2015, 123–124.

- [17] **Markram Henry**. Seven Challenges for Neuroscience. *Functional Neurology* 28 (2013): 145–151.
- [18] **Wiener Norbert**. *Invention: The Care and Feeding of Ideas*. Cambridge, MA: MIT Press, 1994. 159 p.
- [19] **Thompson N.C., Greenewald K., Lee K., Manso G.F.**. The Computational Limits of Deep Learning. arXiv:2007.05558v2 [cs.LG] 27 Jul 2022.
- [20] **Jonas E., Kording K.P.** Could a Neuroscientist Understand a Microprocessor? / *PLoS Comput Biol.* 2017, 13(1): e1005268. DOI:10.1371/journal.pcbi.1005268.
- [21] **Осипов Г.С., Чудова Н.В., Панов А.И., Кузнецова Ю.М.** Знаковая картина мира субъекта поведения. М.: Физматлит, 2018. 264 с.
- [22] **Uexküll J. von**. *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1909. 276 p.
- [23] **Uexküll J. von**. *A Stroll through the Worlds of Animals and Men // Instinctive Behavior: The Development of a Modern Concept*. N.Y.: International Universities Press, 1957. 328 p.
- [24] **Князева Е.Н.** Понятие "Umwelt" Якоба фон Иксюля и его значимость для современной эпистемологии // *Вопросы философии*, 2015, № 5, 30-44.
- [25] **Lakoff G.** *Women, fire, and dangerous things: What categories reveal about the mind*. Chicago: University of Chicago Press, 1987. 632 p. Русский перевод: *Лакофф Дж. Женщины, огонь и опасные вещи: что категории языка говорят нам о мышлении*. М.: Гнозис, 2011. 512 с.
- [26] **Pinker S.** *The Stuff of Thought: Language as a Window into Human Nature*. NY: Viking, 2008. 512 p. Русский перевод: *Пинкер С. Субстанция мышления: Язык как окно в человеческую природу*. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 557 с.
- [27] **Damasio A.R.** *Descartes' error: emotion, reason, and the human brain* / Putnam Publishing, 1994. 312 p.
- [28] **Seth A.** *Being You: A New Science of Consciousness*. Faber and Faber. 2021. 352 p. Русский перевод: *Анил Сет. Быть собой. Новая теория сознания*. М.: Альпина нон-фикшн, 2024. 400 с.
- [29] **Кузнецов О.П.** О концептуальной семантике // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2014, №3, с.32-39.
- [30] **Кузнецов О.П.** Когнитивная семантика и искусственный интеллект // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2012, № 4, с.32-42.
- [31] **Festinger Leon**. *A Theory of Cognitive Dissonance*. Stanford University Press, 1962. 291 p. Русский перевод: *Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса*. Москва: Эксмо, 2018. 251 с.
- [32] **Kahneman D.** *Thinking, fast and slow*. Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 p. Русский перевод: *Канеман Д. Думай медленно ... решай быстро*. М.: АСТ, 2013. 653 с.
- [33] **Кузнецов О.П.** Формальный подход к понятию «знание» и проблема моделирования различных типов знания // *Когнитивные исследования*. Сб. науч. тр. Вып. 2, М.: Институт психологии. 2008, с.265-275.
- [34] **Кузнецов О.П.** Ограниченная рациональность и принятие решений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019, № 1, с.3-15.
- [35] **Sowa J.F.** *Conceptual Structures - Information Processing in Mind and Machines*. Addison-Wesley Publ.Comp., 1984. 481 p.
- [36] **Richard J.F.** *Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions/ Armand Colin*, 1990. 446 p. Русский перевод: *Ж.Ф. Ришар. Ментальная активность. Понимание, рассуждение, нахождение решений*. М.: Институт психологии РАН, 1998.
- [37] **Minsky M.** *A Framework for Representing Knowledge* / in: Winston P. (ed.), *The Psychology of Computer Vision*. N.Y., Mc Graw Hill, 1975, pp. 211-277. Русский перевод: М. Минский. Фреймы для представления знаний. – М.: Энергия, 1979.
- [38] **Rosch E.** Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology*, 1975. 104, P.192-233.
- [39] **Адамар Ж.** Исследование психологии процесса изобретения в области математики. Пер. с фр. М. А. Шаталовой и О. П. Шаталова; Под ред. И. Б. Погребыского. М.: Сов. радио, 1970. 150 с.
- [40] **Карпов В.Э.** Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 5. С.126–145.

Сведения об авторе

Кузнецов Олег Петрович 1936 г. рождения. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова философский факультет (1958), механико-математический факультет (1966). Доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник Института проблем управления РАН. Автор более 170 публикаций, в том числе 4 монографий. SPIN-код: 4017-3236, AuthorID: 24. ORCID 0000-0002-5061-3855. olpkuz@yandex.ru.



Поступила в редакцию 14.09.2024, после рецензирования 3.10.2024. Принята к публикации 5.10.2024.



On machine learning, myths about General AI, and what understanding is

© 2024, O.P. Kuznetsov

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

Abstract

The first part of the article discusses the book *The Myth of Artificial Intelligence* by American scientist and entrepreneur E. Larson, which focuses on debunking some myths about artificial intelligence. These myths, which have persisted for over half a century, suggest that the emergence of human-like ("general") AI and eventually superintelligence is inevitable, occurring naturally as AI systems evolve. The book criticizes these myths in two ways: scientific and social. It is shown that machine learning does not lead to general AI, and the myth of AI makes human potential look weaker. The second part of the article considers the problem of understanding. The concept of cognitive semantics is proposed, based on the ideas of J. Lakoff, S. Pinker, A. Damasio and A. Seth. In particular, it is noted that: understanding is an interpretation in terms of a person's picture of the world; the picture of the world is constructed by our brain, and it is structured through the categorization of human experience; meanings (senses) are formed earlier than conceptual structures are formed; biological goals underlie meanings; not only the brain but also the body participates in cognitive processes, and understanding is associated with actions in the environment, knowledge of which is contained in the picture of the world. The article concludes by pointing out dead ends, difficulties and dangers on the path to general AI.

Keywords: *artificial intelligence, machine learning, induction, abduction, understanding, cognitive semantics, picture of the world.*

For citation: Kuznetsov O.P. On machine learning, myths about General AI, and what understanding is [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 466-482. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-466-482.

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

References

- [1] **Larson E.J.** The Myth of Artificial Intelligence. Why Computers Can't Think the Way We Do // The Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, Massachusetts • London, England 2021. 288 p.
- [2] **Murray S.** The Technological Singularity. Cambridge, MA: MIT Press, 2015, 233 p.
- [3] **Good I.J.** Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine. *Advances in Computers* 6 (1965) 6: 31–88.
- [4] **Glushkov V.M.** Interview with Literary newspaper [In Russian]. *Literaturnaya gazeta*, 1975, №1.
- [5] **Vernor V.** The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-Human Era // in *Vision-21: Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace*, ed. G.A. Landis, NASA Publication CP-10129, 1993, 11–22.
- [6] **Kurzweil R.** The Age of Intelligent Machines. The MIT Press. 1992. 565 p.
- [7] **Kurzweil R.** The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence. Penguin Books, 2000. 404 p.
- [8] **Kurzweil R.** The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology. NY: Penguin Group, 2005. 652 p.
- [9] **Neumann J.V.N.** Theory of Self-Reproducing Automata. Edited and completed by Arthur W. Burks. University of Illinois Press, 1966. 403 p.
- [10] **Mange D, Stauffer A, Peparaolo L, Tempesti G.** A Macroscopic View of Self-replication. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92 (12): 1929–1945.
- [11] **Russell S.** Human Compatible: Artificial Intelligence and the Problem of Control. New York: Viking, 2019. 352 p.
- [12] **Melanie M.** Artificial Intelligence: A Guide for Thinking Humans / NY: Farrar, Straus, and Giroux, 2019. 336 p.
- [13] **Levesque H.J, Davis E, Morgenstern L.** The Winograd Schema Challenge // *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 2012. P.552-561.
- [14] **Davis E, Morgenstern L, Ortiz C.** The Winograd Schema Challenge, <https://cs.nyu.edu/~davis/papers/WinogradSchemas/WS.html>.
- [15] **Anderson C.** The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete. *Wired*, June 23, 2008.

- [16] **Hill S.** Simulating the Brain/ in Gary Marcus and Jeremy Freeman, eds., *The Future of the Brain: Essays by the World's Leading Neuroscientists*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2015, 123–124.
- [17] **Markram H.** Seven Challenges for Neuroscience. *Functional Neurology* 28 (2013): 145–151.
- [18] **Wiener N.** *Invention: The Care and Feeding of Ideas*. Cambridge, MA: MIT Press, 1994. 159 p.
- [19] **Thompson NC, Greenewald K, Lee K, Manso GF.** The Computational Limits of Deep Learning. arXiv:2007.05558v2 [cs.LG] 27 Jul 2022.
- [20] **Jonas E, Kording KP.** Could a Neuroscientist Understand a Microprocessor? *PLoS Comput Biol.* 2017, 13(1): e1005268. DOI:10.1371/journal.pcbi.1005268.
- [21] **Osipov GS, Chudova NV, Panov AI, Kuznetsova YuM.** The Symbolic Picture of the World of the Subject of Behavior. [In Russian]. Moscow: Fizmatlit, 2018. 264 p.
- [22] **Uexküll J. von.** *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1909. 276 p.
- [23] **Uexküll J. von.** *A Stroll through the Worlds of Animals and Men // Instinctive Behavior: The Development of a Modern Concept*. N.Y.: International Universities Press, 1957. 328 p.
- [24] **Knyazeva EN.** Jakob von Uexküll's Concept of "Umwelt" and its Relevance for Modern Epistemology [In Russian]. *Voprosy filosofii*, 2015; 5: 30-44.
- [25] **Lakoff G.** *Women, fire, and dangerous things: What categories reveal about the mind*. Chicago: University of Chicago Press, 1987. 632 p.
- [26] **Pinker S.** *The Stuff of Thought: Language as a Window in to Human Nature*. NY: Viking, 2008. 512 p.
- [27] **Damasio AR.** *Descartes' error: emotion, reason, and the human brain*. Putnam Publishing, 1994. 312 p.
- [28] **Seth AI.** *Being You: A New Science of Consciousness*. Faber and Faber. 2021. 352 p.
- [29] **Kuznetsov OP.** Conceptual semantics [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2015; 42(5): 307-312.
- [30] **Kuznetsov OP.** Cognitive semantics and artificial intelligence [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2013. T. 40, № 5. C. 269-276.
- [31] **Festinger L.** *A Theory of Cognitive Dissonance*. Stanford University Press, 1962. 291 p.
- [32] **Kahneman D.** *Thinking, fast and slow* / Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 p.
- [33] **Kuznetsov OP.** Formal approach to the concept of "knowledge" and the problem of modeling different types of knowledge [In Russian]. *Cognitive Studies*. V. 2, Moscow: Institute of Psychology. 2008. P.265-275.
- [34] **Kuznetsov OP.** Bounded rationality and decision making [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2019; 1: 3-15.
- [35] **Sowa JF.** *Conceptual Structures - Information Processing in Mind and Machines*. Addison-Wesley Publ.Comp., 1984. 481 p.
- [36] **Richard JF.** *Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions/ Armand Colin*, 1990. 446 p.
- [37] **Minsky M.** *A Framework for Representing Knowledge* / in. Winston P. (ed.). *The Psychology of Computer Vision*. N.Y., Mc Graw Hill, 1975. P.211-277.
- [38] **Rosch E.** Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology*, 1975; 104: 192-233.
- [39] **Hadamard J.** *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*. Paris, 1959. 134 p.
- [40] **Karpov VE.** Emotions and temperament of robots. Behavioural aspects [In Russian]. *Izvestiya RAS. Theory and control systems*. 2014; 5: 126–145.

About the author

Oleg Petrovich Kuznetsov (b.1936) graduated from the Lomonosov Moscow State University, Faculty of Philosophy (1958), Faculty of Mechanics and Mathematics (1966). He is a Doctor of Technical Sciences, a Professor, and a Chief Researcher at the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. He is the author of more than 170 publications, including 4 monographs. SPIN-код: 4017-3236, AuthorID: 24. ORCID 0000-0002-5061-3855. olpkuz@yandex.ru

Received September 14, 2024. Revised October 3, 2024. Accepted October 5, 2024.



Оценка антропологического воздействия интерфейсов на этапе проектирования программно-аппаратного обеспечения

© 2024, С.В. Шалагин¹ ✉, Г.Э. Шалагина²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.

Аннотация

В информационном обществе по мере расширения и углубления предметной области человеческой деятельности происходит её непрерывная формализация, которая основана на онтологических моделях технических и естественных систем. Полнота информации о сложной предметной области, воспринимаемая пользователем, влечёт его информационную перегрузку. Данное обстоятельство способствует применению алгоритмов, представляющих информацию о предметной области в сжатом виде. В работе вводятся модифицированные показатели и качественные критерии, которые позволяют оценить возможность появления ошибок при сжатии информации о предметной области и оценить антропомерность интерфейса при использовании задаваемых экспертами пороговых значений показателей, как для алгоритмов искусственного интеллекта, так и для пользователей. Предложен метод количественной оценки антропологического воздействия интерфейсов прикладного уровня на этапе проектирования программно-аппаратного обеспечения. Метод включает восемь этапов, на которых оценивается понятность интерфейса программно-аппаратного обеспечения для адресатов: алгоритмов искусственного интеллекта и пользователей. Предложенный метод позволяет уменьшить вероятность создания деструктивного программно-аппаратного обеспечения.

Ключевые слова: интерфейс, информационное воздействие, онтологическая модель, актор, пользователь, антропомерность, программно-аппаратное обеспечение, проектирование.

Цитирование: Шалагин С.В., Шалагина Г.Э. Оценка антропологического воздействия интерфейсов на этапе проектирования программно-аппаратного обеспечения. *Онтология проектирования*. 2024. Т. 14, №4(54). С. 483-492. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-483-492.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

По мере распространения и внедрения киберфизических систем (КФС) в деятельность общества всё большее значение приобретают интерфейсы прикладного уровня. При использовании указанных интерфейсов организуется взаимодействие программно-аппаратного обеспечения (ПАО), включённого в состав КФС, с различными акторами, как естественными (пользователи), так и искусственными (алгоритмы искусственного интеллекта, ИИ) [1]. От параметров интерфейса зависит качество взаимодействия акторов с ПАО различного назначения (см., например, [2, 3]). В контексте перехода от индустриального Общества 3.0 к постиндустриальному Обществу 4.0 акцент делался в большей степени на физическое воздействие и в меньшей степени на информационное воздействие ПАО на пользователя [2]. С переходом к Обществу 5.0 акцент постепенно смещается в сторону информационного воздействия на актора. В связи с увеличением сложности и комплексности цифровых образов объектов информационное воздействие производится не только на пользователей, но и на ИИ. Это воздействие может носить латентный характер.

Технический объект и связанная с его созданием предметная область (ПрО) имеют искусственное происхождение и основаны на информационных моделях, описываемых формальными выражениями [4–10]. Данные выражения могут быть преобразованы ПАО в визуальные или аудио-визуальные отображения, понятные пользователю [9–11]. Развитие КФС сопровождается расширением и углублением внедрения вычислительной техники в естественные системы [12, 13]. Становится актуальным вопрос обеспечения относительно полноты отображения естественной ПрО через формальные выражения [14]. Если цифровой образ ПрО будет отображён в полном объёме, то на пользователя будет обрушена лавина информации, ведущая к его информационной перегрузке. Если цифровой образ будет отображён для пользователя в сжатом виде, используя алгоритмы ИИ, то повышается вероятность порождения у пользователя искажённого или неполного представления о ПрО, вызванного тем, что при сжатии может быть утеряна информация о характеристиках ПрО, важных для пользователя [15].

Информационное воздействие на пользователя ПАО заключается в том, что он составляет своё представление о ПрО на основе её онтологических моделей (ОМ). Оценка антропологического воздействия интерфейса на этапе проектирования ПАО может быть получена при использовании ОМ ПрО [16–20].

1 Количественные показатели для оценки ОМ ПрО

В период информационного Общества 4.0 стала возможной передача больших объёмов формализованной информации, что способствовало применению ИИ в качестве посредника между ПАО и пользователем.

В концепции Общества 5.0 адресатом может быть не только пользователь, но и ИИ. В данной связи актуализируются формализация информации о ПрО и антропомерность представления информации при проектировании интерфейса между ПАО и пользователем [15]. Понятие антропомерности интерфейса предполагает комплексный учёт трёхуровневой структуры антропологического знания: физического уровня (удобство технических устройств), социокультурного уровня (учёт норм, обычаев, социальных ритмов) и философского уровня (воодушевлённость техническими возможностями для свободы творчества). Функция антропомерности – величина качественная. В [16] введены количественные показатели таких характеристик ОМ ПрО, как её вербальная и системная понятность, в т.ч. среднее время понимания актором терминов ПрО и связей между ними. В данной работе предложена модификация указанных параметров применительно к возникающим в ОМ ПрО ошибкам первого и второго рода [21].

ОМ ПрО можно представить в виде помеченного графа $G = (V, E, C)$, где V , E и C есть множества вершин графа, дуг, а также меток вершин C_V и дуг C_E , соответственно; $C = C_V \cup C_E$; $|V| = n$, $|E| = m$, $|C_V| = n$ (если нет повторений понятий), $|C_E| \in [1, m]$. Число терминов в ОМ формально определено как сумма $N = |C_V| + |C_E|$: $N \in [n+1, n+m]$. В случае, когда в графе G не все термины и/или связи между ними понятны актору, на него производится деструктивное информационное воздействие. Т.е. воздействие, связанное с оперированием на основе неверного представления о ПрО, возникающего ввиду неполного или недостоверного понимания её ОМ. Вербальная понятность ОМ определена коэффициентом [16]:

$$k_W = \frac{N - N_{us}}{N}, \quad (1)$$

где N_{us} – множество терминов, допустимых в ОМ, но непонятных адресату. Для разъяснения этих терминов требуется сформировать N_{us} матриц вида $A_S = (a_{ijs})$, где $a_{ijs} = 1$, если j -я опера-

ция применяется для трактовки i -го термина, иначе $a_{ijs} = 0$. Среднее время понимания адресатом N_{us} терминов определяется согласно формуле [16]:

$$T = \left(\sum_{s=1}^{N_{us}} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l a_{ijs} \cdot \tau_j \right) \leq T_{\max}. \quad (2)$$

При этом значение T не должно превышать заданного допустимого граничного значения $T_{\max}$. Системная понятность ОМ (а также истинность или ложность связей между понятиями) определяется в [16] по аналогии с (1):

$$k_{SW} = \frac{m - m_{us}}{m}, \quad (3)$$

где m_{us} – множество связей в ОМ, непонятных адресату или неверно понятых адресатом. Для оценки времени выяснения значений связей, непонятных адресату, можно воспользоваться формулой подобной (2).

Согласно [21] выделяют ошибки первого и второго рода. Ошибка первого рода – когда нулевая гипотеза верна, но по статистическому критерию отвергнута, признана ошибочной, произошло ложное срабатывание. Ошибка второго рода – когда нулевая гипотеза не верна, но согласно статистическому критерию ошибочно признана правильной.

В качестве нулевой гипотезы принимается отсутствие внутри ПрО события, значимого для пользователя (далее – События). Ошибкой первого рода будет то, что ОМ сигнализирует актору о наличии в ПрО События, которое на самом деле отсутствует. Ошибка второго рода – когда ОМ не идентифицирует в ПрО наличие События, которое в ней на самом деле присутствует. Можно модифицировать критерии (1) и (3) под данное определение События и ОМ ПрО и определить на основе критерия (1) вербальную понятность ОМ для адресата относительно ошибок первого и второго рода согласно двум критериям:

$$k_W^{(1)} = \frac{N - N_{us}^{(1)}}{N}, \quad (4)$$

$$k_W^{(2)} = \frac{N - N_{us}^{(2)}}{N}, \quad (5)$$

где N – то же, что и в (1), $N_{us}^{(1)}$ и $N_{us}^{(2)}$ – множества терминов, допустимых в ОМ, но (4) – неверно понятых и (5) – непонятных адресату, соответственно.

Системную понятность ОМ относительно ошибок первого и второго рода на основе критерия (3) можно определить так:

$$k_{SW}^{(1)} = \frac{m - m_{us}^{(1)}}{m}, \quad (6)$$

$$k_{SW}^{(2)} = \frac{m - m_{us}^{(2)}}{m}, \quad (7)$$

где переменная m определена по аналогии с (3), $m_{us}^{(1)}$ – множество связей в ОМ неверно понятых адресатом, $m_{us}^{(2)}$ – множество связей в ОМ, которые адресат не понял или не воспринял. Для оценки времени уточнения значения $m_{us}^{(1)}$ в (6) формула (2) модифицируется в следующий вид:

$$T^{(1)} = \left(\sum_{s=1}^{N_{us}^{(1)}} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l a_{ijs}^{(1)} \cdot \tau_j^{(1)} \right) \leq T_{\max}^{(1)}, \quad (8)$$

а для оценки времени выяснения $m_{us}^{(2)}$ в (7) формула (2) представима как:

$$T^{(2)} = \left(\sum_{s=1}^{N_{us}^{(2)}} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l a_{ijs}^{(2)} \cdot \tau_j^{(2)} \right) \leq T_{\max}^{(2)}, \quad (9)$$

В (8) параметр $N_{us}^{(1)}$ определён как в (4), $a_{ijs}^{(1)} = 1$, если j -я операция применяется для коррекции неверной трактовки i -го термина, иначе $a_{ijs}^{(1)} = 0$, $\tau_j^{(1)}$ – время, отведённое на применение j -й операции; в (9) параметр $N_{us}^{(2)}$ определён как в (5), $a_{ijs}^{(2)} = 1$, если j -я операция применяется для объяснения адресату i -го термина, иначе $a_{ijs}^{(2)} = 0$, $\tau_j^{(2)}$ – время, отведённое на применение j -й операции.

В результате можно получить количественные показатели, которые позволяют оценить характеристики ОМ ПрО относительно ошибок адресата первого и второго рода:

- вербальную понятность - показатели (4) и (5);
- системную понятность - показатели (6) и (7);
- время выяснения множества связей в ОМ - показатели (8) и (9).

В качестве адресатов могут быть пользователь и ИИ. Предполагается, что адресат формирует собственный образ ПрО как ОМ. Получаются две ОМ ПрО: для ИИ, которая представлена как помеченный граф G_{AI} ; для пользователя, представленная в виде помеченного графа G_u . Указанные графы G_{AI} и G_u представимы по аналогии с описанным графом G .

2 Метод оценки антропомерности интерфейса ПАО

Использование показателей (4) – (7) позволяет количественно оценить возможность ошибок адресата первого и второго рода при идентификации наличия События в ПрО путём взаимодействия с интерфейсом ПАО.

В ситуации, когда адресатом является ИИ, требуется, чтобы внутри ИИ была сформирована формальная ОМ (ФормОМ) ПрО в виде помеченного графа G_{AI} . Для указанной модели оценка антропомерности заключается в вычислении показателей, количественно характеризующих возможность совершения и/или коррекции ошибок первого и второго рода.

Пусть для (4) – (9) экспертами заданы пороговые значения: $\bar{k}_W^{(1)}$, $\bar{k}_W^{(2)}$, $\bar{k}_{SW}^{(1)}$, $\bar{k}_{SW}^{(2)}$, $\bar{T}_{\max}^{(1)}$ и $\bar{T}_{\max}^{(2)}$, соответственно. Смысл их введения заключается в формализации процесса валидации интерфейса ПАО. Можно определить два множества показателей. Первое включает параметры (4), (6), (8), характеризующие наличие в терминах и связях G_{AI} ошибок первого рода, идентификация и коррекция которых требует времени $T^{(1)}$. Второе множество включает параметры (5), (7), (9). Они характеризуют наличие в терминах и связях G_{AI} ошибок второго рода, исправление которых требует времени $T^{(2)}$. Если хотя бы один показатель из заданного множества превышает пороговое значение, то интерфейс ПАО считается не антропомерным. В противном случае интерфейс ПАО считается антропомерным. Формально указанное правило задаётся при использовании пороговых функций вида:

$$\psi(a, b) = \begin{cases} 0: & a < b \\ 1: & a \geq b \end{cases},$$

где a – значение одного из показателей (4) – (9), b – его пороговое значение. Если функция $\psi(a, b)$ равна 0, то показатель, тестируемый при её использовании, не превышает порогового значения; иначе – превышает. Можно ввести критерии:

$$p_1(G_{AI}, \bar{k}_W^{(1)}, \bar{k}_{SW}^{(1)}, \bar{T}_{\max}^{(1)}) = \max(\psi(k_W^{(1)}, \bar{k}_W^{(1)}), \psi(k_{SW}^{(1)}, \bar{k}_{SW}^{(1)}), \psi(T^{(1)}, \bar{T}_{\max}^{(1)})), \quad (10)$$

$$p_2(G_{AI}, \bar{k}_W^{(2)}, \bar{k}_{SW}^{(2)}, \bar{T}_{\max}^{(2)}) = \max(\psi(k_W^{(2)}, \bar{k}_W^{(2)}), \psi(k_{SW}^{(2)}, \bar{k}_{SW}^{(2)}), \psi(T^{(2)}, \bar{T}_{\max}^{(2)})), \quad (11)$$

где $k_W^{(1)}$, $k_{SW}^{(1)}$ и $T^{(1)}$ вычислены на основе параметров графа G_{AI} согласно (4), (6) и (8), соответственно; $k_W^{(2)}$, $k_{SW}^{(2)}$ и $T^{(2)}$ вычислены на основе параметров графа G_{AI} согласно (5), (7), (9).

Имеет место утверждение: для идентификации критического количества ошибок первого рода в терминах и связях графа G_{AI} , время коррекции которых не превышает $\bar{T}_{\max}^{(1)}$, требуется, чтобы значение критерия (10) было равно единице; для идентификации критического количества ошибок второго рода в терминах и связях графа G_{AI} , время коррекции которых не превышает $\bar{T}_{\max}^{(2)}$, требуется, чтобы значение критерия (11) было равно единице.

Критерии, аналогичные (10) и (11), вводятся для случая, когда адресатом при взаимодействии с интерфейсом ПАО является пользователь. При этом интерфейсная часть ПАО формируется при использовании ИИ, для которого выполняются следующие условия:

$$p_1\left(G_{AI}, \bar{k}_W^{(1)}, \bar{k}_{SW}^{(1)}, \bar{T}_{\max}^{(1)}\right) = 0 \text{ и } p_2\left(G_{AI}, \bar{k}_W^{(2)}, \bar{k}_{SW}^{(2)}, \bar{T}_{\max}^{(2)}\right) = 0. \quad (12)$$

Т.е. ПрО для пользователя является ОМ, отображаемая при использовании графа G_{AI} , а пользователь строит свою ОМ, заданную графом G_u . На основе указанного графа вычисляются показатели (4) – (9), для которых эксперты определяют свои пороговые значения $k_W^{(1)}$, $k_W^{(2)}$, $k_{SW}^{(1)}$, $k_{SW}^{(2)}$, $\tilde{T}_{\max}^{(1)}$ и $\tilde{T}_{\max}^{(2)}$, соответственно, а также критерии (10) и (11): $p_1\left(G_u, \tilde{k}_W^{(1)}, \tilde{k}_{SW}^{(1)}, \tilde{T}_{\max}^{(1)}\right)$ и $p_2\left(G_u, \tilde{k}_W^{(2)}, \tilde{k}_{SW}^{(2)}, \tilde{T}_{\max}^{(2)}\right)$.

На основе приведённого утверждения, показателей (4) – (9) и критериев (10) и (11) предложен метод оценки антропомерности интерфейса ПАО (далее – Метод), который включает восемь этапов.

Этап 1. Синтез размеченного графа G_{AI} , соответствующего заданной ПрО.

Этап 2. Вычисление показателей (4) – (9) для G_{AI} .

Этап 3. Задание экспертами пороговых значений показателей (4) – (9), $\bar{k}_W^{(1)}$, $\bar{k}_W^{(2)}$, $\bar{k}_{SW}^{(1)}$, $\bar{k}_{SW}^{(2)}$, $\bar{T}_{\max}^{(1)}$ и $\bar{T}_{\max}^{(2)}$, соответственно, для графа G_{AI} .

Этап 4. Вычисление критериев (10) и (11) на основе графа G_{AI} и пороговых значений, заданных на этапе 3, для которых проверяется условие (12); в случае не выполнения данного условия осуществляются переход к этапу 1 и редукция количества вершин и/или дуг G_{AI} пока условие (12) не будет выполнено.

Этап 5. Синтез размеченного графа G_u на основе полученного графа G_{AI} .

Этап 6. Вычисление показателей (4) – (9) для G_u .

Этап 7. Задание экспертами пороговых значений показателей (4) – (9), $\tilde{k}_W^{(1)}$, $\tilde{k}_W^{(2)}$, $\tilde{k}_{SW}^{(1)}$, $\tilde{k}_{SW}^{(2)}$, $\tilde{T}_{\max}^{(1)}$ и $\tilde{T}_{\max}^{(2)}$ для графа G_u .

Этап 8. Вычисление критериев (10) и (11) на основе графа G_u и пороговых значений, заданных на этапе 7.

Замечание 1. В случае, когда на этапе 8 критерии $p_1\left(G_u, \tilde{k}_W^{(1)}, \tilde{k}_{SW}^{(1)}, \tilde{T}_{\max}^{(1)}\right) = 0$ и $p_2\left(G_u, \tilde{k}_W^{(2)}, \tilde{k}_{SW}^{(2)}, \tilde{T}_{\max}^{(2)}\right) = 0$, интерфейс ПАО считается антропомерным для пользователя.

Замечание 2. Интерфейс ПАО считается не антропомерным в случае, когда на этапе 4 не выполняется условие (12) либо не выполняется условие, указанное в замечании 1.

3 Анализ результатов

Метод позволяет оценить антропомерность интерфейса ПАО, составной частью которого является ИИ. Ведущая роль при оценке антропомерности интерфейса принадлежит экспер-

там, которые задают пороговые значения для показателей (4) – (9). Указанные показатели позволяют оценить наличие или отсутствие в интерфейсе ПАО предпосылок для возникновения ошибок первого и второго рода, которые приводят к негативному информационному воздействию на пользователя.

На *этапе 1* происходит формирование ФормОМ ПрО для ИИ. Граф G_{AI} может быть сформирован в соответствии с методом, изложенным в [1]. Важным является то, что в G_{AI} понятия и связи между ними выражены, как правило, в терминах формальных грамматик. Такая форма представления ОМ ПрО больше адаптирована под алгоритмы ИИ, чем под пользователя-человека.

На *этапе 2* осуществляется количественная оценка того, насколько адекватно граф G_{AI} отображает заданную ПрО. Показатели (4) – (9) позволяют экспертам выявить слабые места ФормОМ ПрО, представленной в виде графа G_{AI} . Во-первых, какого рода ошибки могут быть потенциально допущены ИИ; во-вторых, где кроется источник ошибок - в вербальной или системной понятности ФормОМ, либо во времени, которое требуется для уточнения и/или выявления тех или иных понятий.

На *этапе 3* эксперты принимают решение: какие значения показателей (4) – (9) считать допустимыми для ФормОМ ПрО, представленной в виде графа G_{AI} .

На *этапе 4* предполагается, что ПрО относительно консервативна: в противном случае потребуется обновление графа G_{AI} с целью отслеживания его соответствия ПрО и, как следствие, обновление показателей (4) – (9). При увеличении множества вершин и дуг G_{AI} возрастает вероятность превышения показателями пороговых значений, заданных экспертами, т.е. не выполнения условия (12). В случае такого превышения возможны два варианта. Первый – редукция множества состояний и/или множества дуг G_{AI} . Второй – увеличение экспертами пороговых значений показателей (4) – (9), вычисленных для G_{AI} . Первый вариант влечёт за собой переложение на пользователя труда по идентификации понятий ПрО и связей между ними; второй - увеличение вероятности неверной идентификации указанных понятий и связей между ними и вероятности аберрированного представления пользователя о ПрО.

На *этапе 5* ПрО представлена графом G_{AI} , который создан и оценён экспертами на этапах 1 – 4. На основе G_{AI} создаётся размеченный граф G_u , множество состояний которого и связи между ними адаптированы для пользователя. Граф G_{AI} называется ПрО, формализованной для пользователя. Степень формализации может зависеть от того, насколько пользователь является специалистом в заданной ПрО.

На *этапе 6* производится количественная оценка того, насколько граф G_u отображает понятия и связи между ними, которые применяются ИИ для отображения ПрО. Количественно оценивается возможность совершения пользователем ошибок первого и второго рода при восприятии понятий формализованной ПрО и связей между ними.

Этап 7 предполагает оценку экспертами порогового уровня значений показателей (4) – (9), вычисленных для G_u . Экспертами выявляются слабые места при оценке пользователем ФормОМ ПрО: какого рода ошибки он может совершить и какова вероятная природа данных ошибок – непонятность ФормОМ или недопустимое время, требуемое для уточнения и/или выявления понятий ФормОМ.

На *этапе 8* производится качественная оценка антропомерности интерфейса ПАО для ПрО, формализованной для пользователя.

Разработка предложенного метода актуальна в информационном обществе в силу того, что доля населения, вовлечённого в процессы обработки компьютерной информации, продолжает расти. Производители и заказчики заинтересованы в антропомерном качестве интерфейсов ПАО.

Примеры неантропомерности интерфейсов.

Негативные для пользователя информационные эффекты наблюдались в работе систем и приложений социального мониторинга режима самоизоляции во время пандемии COVID-19. Иногда заболевшим людям тре-

бывалось отвечать на запросы систем в неантропомерное с биологических позиций время: ночью, без учётов природных биоритмов и самочувствия пользователя, а за несоблюдение правил в отношении пользователей ПАО предусматривались различные санкции (штрафы, визиты полиции).

Негативные информационные воздействия на пользователя через интерфейсы ПАО могут наблюдаться в бизнесе. Создатели делового ПАО порой не учитывают и не задают в качестве значимых для его работы такие параметры, как служебное время подразделения либо отдельных должностных лиц, ограничиваясь только системным временем. Указанные недостатки ПАО являются причинами неисполнения задач в срок, ведут к штрафным санкциям, к потере деловой репутации и др.

Негативное информационное воздействие можно найти в интерфейсах электронных издательских систем. Универсальный и транснациональный характер ПАО не учитывает национальные и языковые различия. В то время как стандарты оформления текста, действующие в той или иной культуре или сфере, в различных языках отличаются. Пользователи сталкиваются с негативным информационным воздействием от несоблюдения социокультурной антропомерности, связанной с учётом языковых особенностей.

Предлагается различать *вредоносное* ПАО, препятствующее нормальному использованию программного обеспечения, в т.ч. несущее физический и информационный вред другому ПАО, и *деструктивное* ПАО, деморализующее естественного актора, способное привести человека к мысли о тщетности творческих усилий, невозможности полностью воплотить свой замысел. Введение критериев антропомерности в систему оценки нового ПАО может способствовать повышению качества процессов цифровизации в Обществе 5.0.

Заключение

В работе предложен метод, позволяющий оценить степень антропомерности интерфейса ПАО для ИИ и для пользователя. Определены количественные показатели и качественные критерии, позволяющие формализовать отдельные этапы процесса проектирования интерфейсов, антропомерных для пользователя и основанных на ФормОМ. Данный метод позволяет оценить антропомерность спроектированного для пользователя интерфейса ПАО. Модифицированные показатели позволяют снизить вероятность совершения ошибок первого и второго рода при взаимодействии с интерфейсом ПАО, а также оценить время, требуемое для выяснения связей между понятиями ПрО для ИИ и для пользователей.

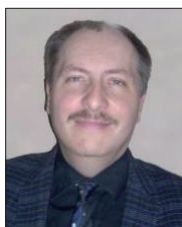
Использование предложенных в работе характеристик антропомерности ПАО как критериев качества цифровизации может применяться в ходе проектирования современного ПАО. Изложенные результаты позволяют определить некоторые направления и перспективы совершенствования процесса проектирования интерфейсов, оценить и разграничить роли человека и алгоритмов ИИ как адресатов в процессе проектирования интерфейсов ПАО для заданной ПрО.

Список источников

- [1] *Shalagin S.V., Shalagina G.E.* Concept Formalization in Designing: Roles of Natural and Artificial Actors. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023, Vol.44, No.2. P.751–757. DOI: 10.1134/S1995080223020336.
- [2] *Назаренко Н.А., Падерно П.И.* Влияние интерфейса на состояние и здоровье оператора. *Биотехносфера*. 2009. №6. С.45–52.
- [3] *Card Stuart K., Moran Thomas P., Newell, Allen.* The psychology of human-computer interaction. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press. 1983. 488 p. DOI: 10.1201/9780203736166.
- [4] *Негода В.Н., Куликова А.А.* Сквозное проектирование автоматизированных систем на основе онтологий. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №4(42). С.450–463. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-450-463.
- [5] *Gizatullin Z., Nuriev M.* Modeling the Electromagnetic Compatibility of Electronic Means under the Influence of Interference Through the Power Supply Network (2022) Proceedings-2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, P.321-326. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787186.
- [6] *Raikhlin V.A., Vershinin I.S., Gibadullin R.F.* On the condition of covering completeness in associative steganography (2021) Journal of Physics: Conference Series, 2096 (1), art. no. 012160. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012160.

- [7] **Vershinin I.S., Gibadullin R.F., Pystogov S.V., Raikhlin V.A.** Associative Steganography. Durability of Associative Protection of Information. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2020. 41(3). P.440-450. DOI: 10.1134/S1995080220030191.
- [8] **Курейчик В.М.** Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. М.: Радио и связь, 1990. 352 с.
- [9] **Царев М.В., Андреев Ю.С.** Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2021. Т.64, №7. С.517-531. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
- [10] **Бабушкин В.М., Шарафеев И.Ш., Трутнев В.В., Галямов Р.А., Бузов А.Л., Бузова Е.А.** Интеграция программно-аппаратных комплексов планирования и мониторинга производительности в условиях развития инфокоммуникационных мультисервисных технологий промышленного предприятия // *Радиотехника*. 2019. Т.83, №6(7). С.12-17. DOI 10.18127/j00338486-201906(7)-03.
- [11] **Шарнин Л.М., Аун С., Альбитар Х.** Комплексная информационно-измерительная система местоположения беспилотных летательных аппаратов // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2010. №4. С.69-77.
- [12] **Щелкунов М.Д., Каримов А.Р.** Общество 5.0 в технологическом, социальном и антропологическом измерениях // *Вестник экономики, права и социологии*, 2019, № 3. С.158-164.
- [13] **Сойфер В.А.** Human fActor. Онтология проектирования. 2021. Т.11, №1(39). С.8-19. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-8-19.
- [14] **Шалагина Г.Э., Шалагин С.В.** Гуманитаризация в естествознании и технических науках: опыт междисциплинарного исследования. *Математические методы в технике и технологиях - ММТТ*. 2020. Т.1. С.103-106.
- [15] **Шалагин С.В., Шалагина Г.Э.** Когнитивные проблемы проектирования на основе компьютерных моделей: технический и социо-гуманитарный аспекты. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №3(21). С.368-376. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-368-376.
- [16] **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.
- [17] **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.
- [18] **Боргест Н.М.** Социально-экономический эффект онтологического анализа при создании информационных систем. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №1(39). С.35-50. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-35-50.
- [19] **Редозубов А.Д.** Формализация смысла. Часть 3. Формирование контекстов. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №4(42). С.437-449. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-437-449.
- [20] **Гвоздев В.Е., Бежаева О.Я., Насырова Р.А.** Модели возникновения ошибок на предпроектной стадии разработки компонент информационно-вычислительных систем. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1. С.73-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-73-86.
- [21] ГОСТ Р 50779.10-2000 Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. Введён впервые 01.07.2001.

Сведения об авторах



Шалагин Сергей Викторович, 1975 г. рождения. Окончил Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева в 1998 г., д.т.н. (2013). Профессор кафедры компьютерных систем Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ. В списке научных трудов более 170 работ в области компьютерного моделирования и САПР. sshalagin@mail.ru. ✉.

Шалагина Гульнара Эдуардовна, 1974 г. рождения. Окончила Казанскую государственную консерваторию им. Н.Г. Жиганова в 1998 г., к.ф.н. (2001).



Доцент кафедры философии науки и социальной работы Казанского национального исследовательского технологического университета. В списке научных трудов более 100 работ в области социальной философии, этики, философии науки и философии образования. galanova@rambler.ru.

Поступила в редакцию 24.01.2024, после рецензирования 29.07.2024. Принята к публикации 14.09.2024.



Assessing the anthropological impact of interfaces in the design stage of software and hardware

© 2024, S.V. Shalagin¹✉, G.E. Shalagina²

¹ Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

² Kazan national research technological university, Kazan, Russia

Abstract

In the information society, as the scope of human activity expands and deepens, continuous formalisation occurs, underpinned by ontological models of technical and natural systems. The user's perception of comprehensive information about a complex subject area leads to information overload. This situation encourages the use of algorithms that present information in a compressed form. The paper introduces modified indicators and qualitative criteria to estimate the potential for errors in compressing subject area information, as well as evaluate the anthropometric nature of the interface using threshold values set by experts, both for artificial intelligence algorithms and users. A method is proposed for quantitatively assessing the anthropological impact of application-level interfaces during the design stage of hardware and software. The method consists of eight stages, which assess the comprehensibility of the hardware and software interface for both artificial intelligence algorithms and users. This approach reduces the likelihood of developing destructive hardware and software systems.

Keywords: interface, information impact, ontological model, actor, user, anthropomericity, software and hardware, designing.

For citation: Shalagin S.V., Shalagina G.E. Assessing the anthropological impact of interfaces in the design stage of software and hardware [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 483-492. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-483-492.

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

References

- [1] Shalagin SV, Shalagina GE. Concept Formalization in Designing: Roles of Natural and Artificial Actors. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023; 44(2): 751–757. DOI: 10.1134/S1995080223020336.
- [2] Nazarenko NA, Paderno PI. The influence of the interface on a condition and health of the operator [In Russian]. *Biotechnosphere*. 2009; 6: 45 – 52.
- [3] Card Stuart K, Moran Thomas P, Newell A. The psychology of human-computer interaction. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press. 1983. 488 p. DOI: 10.1201/9780203736166.
- [4] Negoda VN, Kulikova AA. End-to-end design of automated systems based on ontologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(4): 450-463. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-450-463.
- [5] Gizatullin Z, Nuriev M. Modeling the Electromagnetic Compatibility of Electronic Means under the Influence of Interference Through the Power Supply Network (2022) Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, pp. 321 - 326. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787186.
- [6] Raikhlin VA, Vershinin IS, Gibadullin RF. On the condition of covering completeness in associative steganography (2021) *Journal of Physics: Conference Series*, 2096 (1), art. no. 012160. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012160.
- [7] Vershinin IS, Gibadullin RF, Pystogov SV, Raikhlin VA. Associative Steganography. Durability of Associative Protection of Information. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2020; 41(3): 440-450. DOI: 10.1134/S1995080220030191.
- [8] Kureichik VM. Mathematical support for design and technological engineering using CAD [In Russian]. Moscow: Radio i sviaz; 1990. 352 p.
- [9] Tsarev MV, Andreev YS. Digital twins in industry: development history, classification, technologies, and use cases [In Russian]. *News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2021; 64 (7): 517-531. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.

- [10] **Babushkin VM, Sharafiev ISh, Trutnev VV, Galiamov RA, Buzov AL, Buzova EA.** Integration of software and hardware systems for planning and performance monitoring in the context of the development of infocommunication multiservice technologies of an industrial enterprise [In Russian]. *Radio engineering*. 2019; 83 (6/7): 12-17. – DOI 10.18127/j00338486-201906(7)-03.
 - [11] **Sharnin LM, Aun S, Albitar H.** Integrated information and measurement system for the location of unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2010; 4: 69-77.
 - [12] **Schelkunov MD, Karimov AR.** Society 5.0 in technological, social and anthropological dimensions [In Russian] *Bulletin of Economics, Law and Sociology*. 2019; 3: 158-164.
 - [13] **Soifer VA.** Human fActor [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 11(1): 8-19. DOI 10.18287/2223-9537-2021-11-1-8-19.
 - [14] **Shalagina GE, Shalagin SV.** Humanitarianization in natural and technical sciences: the experience of interdisciplinary research [In Russian]. *Mathematical methods in engineering and technology - MMTT*. 2020; 1: 103-106.
 - [15] **Shalagin SV, Salagina GE.** Cognitive problems of designing based on computer models: technical and socio-humanitarian aspects [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(21): 368-376. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-368-376.
 - [16] **Mikoni SV.** Comprehensibility of an ontological model as a characteristic of its quality [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(1): 20-34. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-20-34.
 - [17] **Fayans AM.** Looking at the formalization of the meaning from the position of a transdisciplinary approach [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(3): 294-308. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-294-308.
 - [18] **Borgest NM.** Socio-economic effect of ontological analysis when creating information systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(1): 35-50. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-35-50.
 - [19] **Redozubov AD.** Formalization of the meaning. Part 3. Formation of contexts [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(4): 437-449. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-437-449.
 - [20] **Gvozdev VE, Bezhaeva OY, Nasyrova RA.** Models of errors at the pre-design stage of the development of information and computing systems components [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 73-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-73-86.
 - [21] Statistical methods. Probability and the basics of statistics. Terms and definitions: GOST R 50779.10-2000. Introduced for the first time; introduced. 01.07.2001.
-

About the authors

Sergey Victorovich Shalagin (b. 1975) graduated from the Kazan State Technical University named after A.N.Tupolev in 1998, Doctor of Technical Science degree holder (2013). He is a Professor at Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev – KAI (Computer Systems department). He is the author of about 170 scientific articles and abstracts in the field of Computer simulation and CAD. sshalagin@mail.ru. ✉.

Gulnara Eduardovna Shalagina (b. 1974) graduated from the Kazan State Conservatoire named after N. Zhiganov in 1998, candidate of philosophical sciences. She is an associate professor at the Kazan National Research Technological University (Department of Philosophy of Science and Social Work). She is the author of more than 100 publications in the field of social philosophy, ethics, philosophy of science and philosophy of education. galanova@rambler.ru

Received January 24, 2024. Revised July 29, 2024. Accepted September 14, 2024.



Концептуально-онтологические аспекты множественности предка в информационных моделях «сущность-связь»

© 2024, В.В. Миронов ✉, К.В. Миронов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация

Проектирование информационных моделей при разработке автоматизированных систем включает построение моделей «сущность-связь», задающих классы сущностей и межклассовых отношений типа «предок-потомок», которые служат концептуально-онтологической основой для последующего создания баз данных. Рассматриваются аспекты отражения в моделях «сущность-связь» семантических ограничений предметной области, накладываемых на отношения между сущностями. Выделяются особые отношения между классами сущностей, названные отношениями множественного предка (МП), в которых для одного экземпляра сущности-потомка возможно несколько экземпляров сущности-предка. Анализируются возможные семантические ограничения, возникающие в этих условиях, и порождаемые ими аномалии. На основе введенных понятий линии восходящего родства и МП-предиката строится формализация МП-целостности. Приводятся примеры задания формальных МП-ограничений: положительных (требующих совпадения экземпляров предка), отрицательных (требующих несовпадения экземпляров предка), смешанных. Исследуется взаимное влияние нескольких МП-ограничений с частично пересекающимися линиями восходящего родства. Оценивается возможность реализации МП-ограничений в реляционных моделях баз данных.

Ключевые слова: информационная модель, модель «сущность-связь», классы и экземпляры, онтологии в информатике, концептуальная схема, иерархия «предок-потомок».

Цитирование: Миронов В.В., Миронов К.В. Концептуально-онтологические аспекты множественности предка в информационных моделях «сущность-связь». *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.493-503. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-493-503.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В проектировании автоматизированных систем важное место занимают информационные модели (ИМ), характеризующие используемые данные в создаваемой системе. ИМ разрабатываются на различных уровнях абстракции: концептуальные модели ориентированы на выявление информационных потребностей системы; логические (внутренние) – на реализацию баз данных (БД), обслуживающих эти потребности. ИМ концептуального уровня абстракции отражают онтологические аспекты создаваемой системы и должны позволять разработчикам представлять знания о предметной области (ПрО) в виде концептуальной схемы: классы сущностей, их атрибуты, связи, правила и ограничения [1, 2].

Распространение получил класс ИМ «сущность-связь» (*Entity-Relationship Model* – *ER-модель*), как концептуальная основа логических моделей БД [3], ориентированных на реляционные и объектно-ориентированные БД. Эти модели положены в основу промышленных стандартов (*IDEFIx*, *UML* и др.) и широко применяются в настоящее время [4–7].

ER-модели наглядно задают классы сущностей и связи между ними, т.е. структурные ограничения целостности данных. Вместе с тем они не отражают некоторые важные особенности ПрО, в отличие от онтологических моделей [7, 8]. Ввиду высокой понятности, лако-

ничности и лёгкой реализуемости *ER*-моделей замена их на онтологическую модель применительно к БД считается нецелесообразной [9]. *ER*-модели являются неотъемлемым средством проектирования БД [10, 11].

Целью данной работы является исследование отношений между классами сущностей и обусловленных ими ограничений целостности в *ER*-моделях при проектировании БД. Указанные отношения связаны с межклассовыми отношениями типа «предок-потомок» [12], названными здесь отношениями множественного предка (МП).

1 Отношения множественного предка

Предметом исследования являются межклассовые отношения типа «предок-потомок», которые непосредственно не отражаются в *ER*-моделях.



Рисунок 1 – Простой пример МП-отношения

Простейший случай подобных отношений может возникать в моделях, содержащих два класса сущностей с двумя связями между ними (см., например, рисунок 1). Здесь класс Организация задаёт множество экземпляров – конкретных организаций, а класс Проект – множество конкретных проектов. Две связи типа «один-ко-многим» – Зак (заказывает) и Исп (исполняет) – задают отношения «предок-потомок» между сущностями. Конкретная организация может быть заказчиком и исполнителем нескольких проектов,

но каждый проект имеет одну организацию-заказчика и одну организацию-исполнителя. Пусть при этом имеет место ограничение: одна и та же организация не может быть одновременно заказчиком и исполнителем одного и того же проекта. Данное ограничение никак не отражается традиционными средствами в рассматриваемой модели, т.е. ничто не препятствует, чтобы некоторый экземпляр Проекта ссылался на один и тот же экземпляр Организации и как на заказчика, и как на исполнителя. Налицо «нарушение целостности» – аномалия, потенциально допускающая несогласованность и требующая введения дополнительных семантических пояснений к *ER*-модели. Это обстоятельство отражено на схеме с помощью пунктирной линии, концевой кружок которой задаёт направление от класса-предка к классу-потомку. Это ограничение целостности можно назвать МП-ограничением, которое может возникать в *ER*-моделях, имеющих следующие структурные особенности (МП-отношения):

- имеется два класса сущностей, находящихся в отношении «предок-потомок»;
- имеется две или более восходящих связей, ведущих от потомка к предку.

Опыт проектирования *ER*-моделей БД свидетельствует, что МП-отношения, сопровождаемые МП-ограничениями, часто возникают в ходе построения глобальной *ER*-модели путём композиции локальных моделей.

На рисунке 2 эта ситуация иллюстрируется на простом примере. Здесь локальная модель «а» задаёт отношение «один-ко-многим» между сущностями Спец (специальность) и Студент: на каждой конкретной специальности может обучаться несколько студентов, но каждый конкретный студент обучается на одной специальности. Аналогичным образом локальная модель «б» утверждает: каждая специальность может включать несколько предметов, но каждый предмет относится к одной специальности. Локальная модель «в» задаёт отношение «многие-ко-многим» между сущностями Студент и Предмет с помощью сущности-пересечения Сдача: каждый конкретный студент может сдать несколько конкретных предметов, а каждый конкретный предмет может быть сдан несколькими конкретными студентами. Экземпляр сущности Сдача соответствует паре «конкретный студент – конкретный предмет». Модель «г» на рисунке 2 представляет собой композицию моделей «а», «б» и «в», содержащую все отношения между сущностями Спец, Студент, Предмет, Сдача.

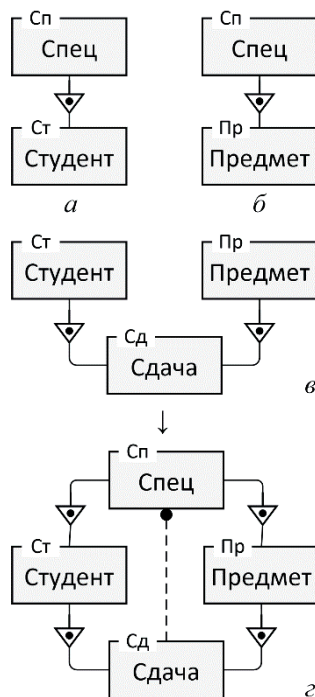


Рисунок 2 – Возникновение МП-отношения в результате композиции моделей

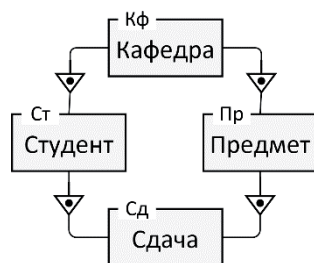


Рисунок 3 – МП-отношение без МП-ограничения

Модель «2» не может учесть те отношения, которые выходят за пределы локальных моделей и относятся к композиции в целом (целое не есть простое объединение частей). Здесь никак не отражено то естественное ограничение, что студент должен сдавать предметы только своей специальности. Если взять конкретный экземпляр сущности Сдача, то для него, согласно модели, существует единственный экземпляр-предок в сущности Студент, для которого существует единственный экземпляр-предок в сущности Спец. Для того же самого экземпляра сущности Сдача существует единственный экземпляр-предок в сущности Предмет, для которого существует единственный экземпляр-предок в сущности Спец. При этом ничто в модели не гарантирует, что в обоих случаях это будет один и тот же экземпляр сущности Спец. Т.е. складывается аномалия, потенциально допускающая несогласованность и требующая введения соответствующих семантических ограничений. На рисунке она отмечена пунктирной линией с концевым кружком. Тёмная заливка кружка (в отличие от светлой на рисунке 1) указывает на то, что экземпляры предка, соответствующие одному потомку, должны совпадать.

Необходимость различать МП-отношение и МП-ограничение обусловлена тем, что не всегда первое влечёт за собой второе. На рисунке 3 приведена иллюстрация МП-отношения, не сопровождающегося МП-аномалией. Здесь класс Кафедра включает множество экземпляров-кафедр, за каждой кафедрой может быть закреплено много студентов и много предметов. При этом студенты изучают и сдают предметы, которые закреплены за разными кафедрами. Таким образом, здесь не накладываются ограничения на экземпляры предков одного потомка, т.е. в отличие от примера на рисунке 2 не требуется, чтобы для одной сдачи кафедры сдавшего студента всегда совпадала (или, наоборот, не совпадала) с кафедрой сданного предмета.

Таким образом, МП-целостность характеризуется наличием МП-отношения и МП-ограничения. МП-ограничение – это

некоторое требование, предъявляемое со стороны ПрО к множеству экземпляров предков каждого экземпляра потомка в МП-отношении. В простых случаях – это требование совпадения или несовпадения экземпляров предков. Возможны и более сложные требования.

2 Формализация

Пусть ER -модель $ERM = \{E, R\}$ – множество сущностей E и бинарных связей R типа «предок-потомок». Другие виды связей («многие-ко-многим»; n -арные, $n > 2$; и др.) могут быть представлены с помощью бинарных связей.

Линия восходящего родства (ЛВР)

$$L = E_D \text{ —• } E_1 \text{ —• } \dots \text{ —• } E_m \text{ —• } E_A \quad (1)$$

представляет собой последовательность сущностей $E_D, E_1, \dots, E_m, E_A$, где $m \geq 0$, в которой сущность E_1 является предком сущности E_D , а последующая сущность E_{i+1} является предком

предшествующей сущности E_i (обозначается как $E_i \rightarrow E_{i+1}$). Для $m = 0$ выражение (1) имеет вид $L = E_D \bullet E_A$. Сущности E_D и E_A , соответственно сущность-потомок и сущность-предок в ЛВР L , можно записать так:

$$E_D = _L, \quad E_A = \wedge L, \quad (2)$$

где символы « $_$ » и « $\wedge$ » обозначают операции извлечения из ЛВР потомка и предка.

Если сущность E_{i+1} является «множественным» предком сущности E_i (через несколько параллельных связей типа «предок-потомок»), то в записи $E_i \bullet E_{i+1}$ требуется уточнение:

$$E_i \bullet^{R_i} E_{i+1}, \quad (3)$$

где R_i – идентификатор используемой в ЛВР связи «предок-потомок».

ЛВР как функция экземпляров потомка. Если все связи, образующие ЛВР L , не допускают «сирот», то каждому экземпляру e_D сущности-потомка E_D всегда соответствует один и только один экземпляр e_A сущности-предка E_A , т.е. имеет место функциональная зависимость

$$\wedge L(e_D) = e_A, \quad e_D \in E_D, \quad e_A \in E_A. \quad (4)$$

«Сиротабельные» связи. Пусть на ЛВР присутствуют связи, допускающие «сиротство», т.е. такие экземпляры сущностей потомков, у которых нет соответствующих экземпляров сущностей предков. В этом случае выражение (1) будет записано так:

$$L = E_D \bullet E_1 \bullet \dots E_k \bullet E_{k+1} \bullet \dots \bullet E_m \bullet E_A, \quad (5)$$

где $E_k \bullet E_{k+1}$ соответствует «сиротабельной» связи, которая находится ближе всего к сущности-потомку E_D . На экземпляре-сироте происходит «обрыв» экземпляра ЛВР. Это означает отсутствие экземпляра e_A сущности-предка E_A . В таких случаях можно дополнить множества экземпляров сущностей $E_{k+1}, \dots, E_m, E_A$ фиктивными null-экземплярами, полагая, что в случае «обрыва» экземпляра ЛВР он продолжается цепочкой null-экземпляров, т.е. в этом случае

$$\wedge L(e_D) = \text{null}. \quad (6)$$

Для учёта подобных случаев вводятся функции-предикаты $\text{ifnull}(e)$ и $\text{ifnotnull}(e)$, у которых результат «истина», если e соответственно является или не является null-экземпляром, и «ложь» в противном случае.

МП-отношение – это совокупность двух или более различных ЛВР $L_1, L_2, \dots$, имеющих одинаковых потомков и одинаковых предков, т.е. ведущих разными путями от общего потомка к общему предку:

$$M = \{ L_1, L_2, \dots \}, \quad _L_1 = _L_2 = \dots, \quad \wedge L_1 = \wedge L_2 = \dots. \quad (7)$$

МП-ограничение – это ограничение, заданное на МП-отношении M в виде

$$\forall e_D, e_D \in E_D, \text{Pr}(M) = f(\wedge L_1(e_D), \wedge L_2(e_D), \dots), \quad (8)$$

где $\forall$ – квантор всеобщности; $\text{Pr}(M)$ – предикат МП-целостности (МП-предикат), т.е. некоторая логическая функция f , задающая условие, которое должно выполняться для обеспечения целостности. Таким образом, МП-ограничение накладывается на совместные значения экземпляров предка, полученные для одного экземпляра потомка через различные ЛВР.

МП⁺ / МП⁻-ограничение (положительное / отрицательное МП-ограничения) – частные случаи, когда МП-предикат $\text{Pr}(M)$ задан соответственно в виде равенства или в виде неравенства экземпляров предка:

$$\text{Pr}(M)^+ : \forall (L_i \in M, L_j \in M, i \neq j) \wedge L_i = \wedge L_j, \quad (9)$$

$$\text{Pr}(M)^- : \forall (L_i \in M, L_j \in M, i \neq j) \wedge L_i \neq \wedge L_j, \quad (10)$$

т.е. МП⁺-ограничение для каждого экземпляра потомка требует одних и тех же экземпляров предка по всем ЛВР, а МП⁻-ограничение – различных. В реальных ситуациях могут требоваться более сложные логические условия (смешанные МП-ограничения).

Чтобы формализовать МП-целостность, нужно задать: множество ЛВР (7), составляющих МП-отношение; МП-предикат (8), определяющий МП-ограничение для МП-отношения.

3 Примеры

3.1 Положительные МП-ограничения в отсутствие сирот

На рисунке 4 представлен пример задания положительного МП-ограничения, основанного на двух четырёхзвенных ЛВР. Модель отражает результаты сдачи студентами предметов. Каждая сдача соответствует одному студенту, который прикреплен к одной студенческой группе одной специальности. С другой стороны, каждая сдача соответствует одному предмету, который соответствует одному циклу, также одной специальности. Представленные в модели связи «один-ко-многим» не допускают сирот (тёмные кружки в символах связи). Отношение МП-целостности задано штриховой линией, идущей от потомка к предку. Тёмный кружок, указывающий на предка, означает положительную МП-целостность. Таким образом, МП⁺-целостность $Сд^{\wedge}Сп$ обеспечивается по двум ЛВР:

$$Сд^{\wedge}Сп = \{ L_1 = Сд - \bullet Ст - \bullet Гр - \bullet Сп, L_2 = Сд - \bullet Пр - \bullet Цк - \bullet Сп \}, Pr(Сд^{\wedge}Сп): \wedge L_1 = \wedge L_2, \quad (11)$$

т.е. требуется, чтобы для каждой сдачи совпадали специальности сдавшего студента и сданного предмета. В данном случае задание МП-целостности на графической модели (рисунок 4) исчерпывающе характеризует МП-ограничение: в модели имеется всего две ЛВР, и формальное представление (11) не несёт новой информации по сравнению со схемой. В более сложных случаях графическая нотация бывает недостаточна для задания деталей МП-целостности и требуется дополнительная формальная спецификация.

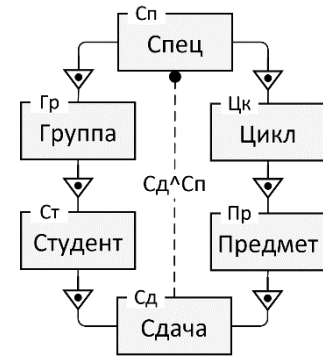


Рисунок 4 – Пример МП⁺-целостности

3.2 Положительные МП-ограничения в случае допустимости сирот

На рисунке 5 представлен пример задания МП⁺-целостности при наличии связи, допускающей сирот (светлый кружок в символе связи). В отличие от модели на рисунке 4 здесь допустимы студенты, которые (времененно) не прикреплены к студенческой группе (например, находятся в академическом отпуске). При этом каждый студент относится только к одной специальности (дополнительная связь от сущности Спец к сущности Студент). В этой модели присутствуют два перекрывающихся отношения положительной МП-целостности: $Ст^{\wedge}Сп$ и $Сд^{\wedge}Сп$. МП-целостность $Ст^{\wedge}Сп$ задаёт согласованность специальности обучения студента и специальности группы, к которой прикреплен студент. Она базируется на двух ЛВР:

$$Ст^{\wedge}Сп = \{ L_1 = Ст - \bullet Сп, L_2 = Ст - \circ Гр - \bullet Сп \}. \quad (12)$$

Предикат $Pr(Ст^{\wedge}Сп)$ должен быть истинным только в двух случаях:

- если студент $ст_0$ не прикреплен ни к какой к группе;
- если студент $ст_0$ прикреплен к группе, у которой специальность группы $\wedge L_2(ст_0)$ совпадает со специальностью студента $\wedge L_1(ст_0)$.

Таким образом, предикат имеет вид

$$Pr(Ст^{\wedge}Сп): \text{ifnotnull}(\wedge L_{гр}) \Rightarrow (\wedge L_1 = \wedge L_2), \quad (13)$$

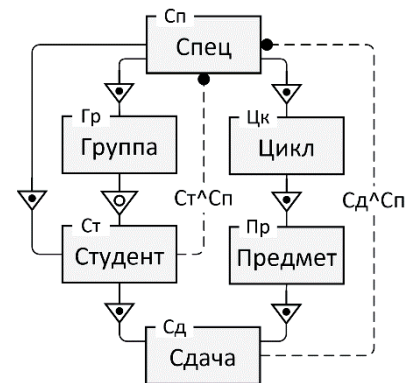


Рисунок 5 – Пример сложной МП⁺-целостности

где $L_{гр} = Ст \text{—} \circ Гр$, а « $\Rightarrow$ » обозначает операцию импликации, или в эквивалентной записи:

$$Pr(Ст \wedge Сп): \text{ifnull}(\wedge L_{гр}) \mid (\wedge L_1 = \wedge L_2), \quad (14)$$

где « $\mid$ » обозначает операцию дизъюнкции («или»).

3.3 Пересекающиеся МП-отношения

МП-целостность $Сд \wedge Сп$ (рисунок 5) задаёт согласованность специальностей по различным ЛВР от потомка Сдача к предку Спец. В модели содержится три ЛВР, относящихся к этому МП-отношению:

$$L_3 = Сд \text{—} \bullet Пр \text{—} \bullet Цк \text{—} \bullet Сп, \quad L_4 = Сд \text{—} \bullet Ст \text{—} \bullet Сп, \quad L_5 = Сд \text{—} \bullet Ст \text{—} \circ Гр \text{—} \circ Сп. \quad (15)$$

Таким образом, рассматриваемая МП-целостность базируется на трёх ЛВР:

$$Сд \wedge Сп = \{L_3, L_4, L_5\}. \quad (16)$$

МП-предикат $Pr(Сд \wedge Сп)$ должен проверять равенство экземпляров предков, полученных вдоль этих трёх ЛВР, и должен быть истинным в следующих случаях:

- если в сдаче $сд$ сдавший студент не прикреплен к группе и при этом обучается на специальности $\wedge L_4(сд)$, совпадающей со специальностью сданного предмета $\wedge L_3(сд)$;
- если в сдаче $сд$ сдавший студент прикреплен к группе, при этом его специальность $\wedge L_4(сд)$ совпадает со специальностями группы $\wedge L_5(сд)$ и сданного предмета $\wedge L_3(сд)$.

Следует учесть, что ЛВР L_4 включает ЛВР L_1 , ЛВР L_5 включает ЛВР L_2 и при этом соблюдается МП-целостность $Ст \wedge Сп$, основанная на ЛВР L_1 и L_2 . В этих условиях для достижения целостности $Сд \wedge Сп$ достаточно потребовать, чтобы в сдаче $сд$ специальность сдавшего студента совпадала со специальностью сданного предмета, т.е. достаточно контролировать две ЛВР – L_3 и L_4 :

$$Сд \wedge Сп = \{L_3, L_4\}, \quad Pr(Сд \wedge Сп): \wedge L_3 = \wedge L_4. \quad (17)$$

Таким образом, наличие пересекающихся ЛВР в положительных МП-отношениях может упростить МП-предикаты.

В примере на рисунке 5 ЛВР (17), относящиеся к $Сд \wedge Сп$, полностью включают ЛВР (12), относящиеся к $Ст \wedge Сп$. В этих условиях может показаться, что МП-целостность $Сд \wedge Сп$, основанная на (17), автоматически влечёт за собой МП-целостность $Ст \wedge Сп$, что неверно. Это было бы так, если бы у каждого студента обязательно была хотя бы одна сдача (связь Студент–Сдача не допускала бы предков без потомков, т.е. была бы тёмная заливка у треугольника в символе связи). Однако в этой модели допустимы студенты, не имеющие сдач (светлая заливка в треугольнике связи), поэтому такие студенты выпадают из-под контроля со стороны МП-целостности $Сд \wedge Сп$.

3.4 Отрицательные МП-ограничения

Особенности обеспечения отрицательной МП-целостности, требующей различных экземпляров МП-предков для одного МП-потомка по различным ЛВР, представлены примером, показанном на рисунке 6. Модель отражает две роли участия людей (сущность Персона) в диссертации на соискание учёной степени кандидата наук (сущность Диссертация), а именно: автор-диссертант (сущность Автор) и научный руководитель (сущность Научрук). У конкретной диссертации должен быть единственный автор и единственный научный руководитель. Конкретная персона может быть автором или научным руководителем. Бинарная связь типа «может быть», или «условная», является частным случаем связи типа «один-ко-многим»: одному экземпляру сущности-предка может соответствовать ноль или один экземпляр сущности-потомка.

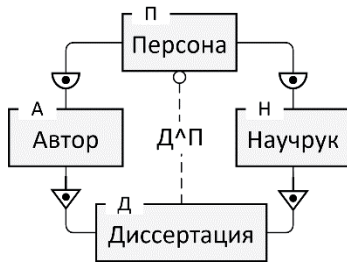


Рисунок 6 – Пример отрицательной МР-целостности

В используемой графической нотации эта связь изображена в виде полукруга, направленного к потомку. МП-целостность $Д^П$ является отрицательной, о чём свидетельствует светлый кружок, указывающий направление к МП-предку. Эта целостность требует, чтобы для каждой диссертации её автор и научный руководитель были разными персонами:

$$Д^П = \{L_1 = Д - \bullet А - \bullet П, L_2 = Д - \bullet Н - \bullet П\}, \Pr(Д^П): \wedge L_1 \neq \wedge L_2. (18)$$

Если предположить, что у диссертации не обязательно должен быть научный руководитель, т.е. связь от Н к Д является «сиротабельной», допускающей сирот ($L_H = Д - \circ Н$), то МП-целостность будет выглядеть так:

$$Д^П = \{L_1 = Д - \bullet А - \bullet П, L_2 = Д - \circ Н - \bullet П\}, \Pr(Д^П): \text{ifnull}(\wedge L_H) \mid \wedge L_1 \neq \wedge L_2. (19)$$

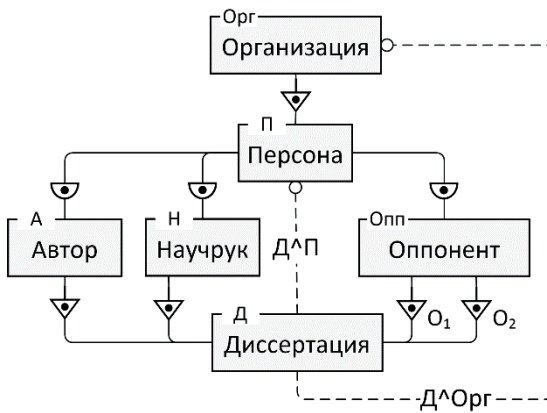


Рисунок 7 – Пример сложной отрицательной МР-целостности

На рисунке 7 представлен более сложный пример, содержащий два взаимосвязанных ограничения отрицательной МП-целостности. В отличие от модели на рисунке 6 здесь дополнительно присутствует Оппонент, как класс Персоны, а также сущность Организация, как предок Персоны. У диссертации должно быть два оппонента, что обеспечивается связями O_1 и O_2 . Каждая Организация может содержать несколько аффилированных Персон, каждая Персона должна быть аффилирована с одной Организацией.

МП-ограничение $Д^П$ в данном случае требует, чтобы для одной и той же диссертации её автор, научный руководитель и оба оппонента были разными персонами:

$$Д^П = \left\{ \begin{array}{l} L_1 = Д - \bullet А - \bullet П \\ L_2 = Д - \bullet Н - \bullet П \\ L_3 = Д - \bullet^{O_1} \text{ Опп} - \bullet П \\ L_4 = Д - \bullet^{O_2} \text{ Опп} - \bullet П \end{array} \right\}, \Pr(Д^П): \forall (L_i, L_j, i, j = \overline{1,4}, i \neq j) \wedge L_i \neq \wedge L_j. (20)$$

Для предиката $\Pr(Д^П)$ требуется выполнение следующих условий:

$$\Pr(Д^П): \wedge L_1 \neq (\wedge L_2, \wedge L_3, \wedge L_4), \wedge L_2 \neq (\wedge L_3, \wedge L_4), \wedge L_3 \neq \wedge L_4. (21)$$

Для МП-ограничения $Д^Орг$ требуется, чтобы оппоненты диссертации были из разных организаций, не совпадающих с организациями автора и научного руководителя (при этом автор и руководитель могут быть из одной организации). Формально это требование можно записать так:

$$Д^Орг = \left\{ \begin{array}{l} L_5 = Д - \bullet А - \bullet П - \bullet Орг \\ L_6 = Д - \bullet Н - \bullet П - \bullet Орг \\ L_7 = Д - \bullet^{O_1} \text{ Опп} - \bullet П - \bullet Орг \\ L_8 = Д - \bullet^{O_2} \text{ Опп} - \bullet П - \bullet Орг \end{array} \right\}, \Pr(Д^Орг): \wedge L_7 \neq \wedge L_8, \forall (L_i, L_j)_{j=(7,8)}^{i=(5,6)} \wedge L_i \neq \wedge L_j. (22)$$

Для предиката $\Pr(Д^Орг)$ требуется выполнение следующих условий:

$$\Pr(Д^Орг): \wedge L_7 \neq \wedge L_8, \wedge L_5 \neq (\wedge L_7, \wedge L_8), \wedge L_6 \neq (\wedge L_7, \wedge L_8). (23)$$

Следует учесть взаимодействие ограничений $Д^{\wedge}П$ и $Д^{\wedge}Орг$, а именно, что ЛВР, входящие в $Д^{\wedge}П$, являются частью ЛВР $Д^{\wedge}Орг$. Любые экземпляры персоны заведомо различны, если они аффилированы с разными экземплярами организации. Поэтому выполнение требования различной аффилиации оппонентов $\wedge L_7 \neq \wedge L_8$ в (23) автоматически влечёт за собой выполнение требования различных персон оппонентов $\wedge L_3 \neq \wedge L_4$ в (21). Аналогичным образом выполнение требований $\wedge L_5 \neq (\wedge L_7, \wedge L_8)$ и $\wedge L_6 \neq (\wedge L_7, \wedge L_8)$ автоматически влечёт за собой выполнение требований $\wedge L_1 \neq (\wedge L_3, \wedge L_4)$ и $\wedge L_2 \neq (\wedge L_3, \wedge L_4)$.

Эти обстоятельства упрощают предикат $Pr(Д^{\wedge}П)$:

$$Pr(Д^{\wedge}П): \wedge L_1 \neq \wedge L_2, \quad (24)$$

т.е. при наличии предиката $Pr(Д^{\wedge}Орг)$ предикат $Pr(Д^{\wedge}П)$ должен контролировать лишь то, что экземпляры автора и научного руководителя одной диссертации соответствуют различным экземплярам персоны.

Таким образом, наличие пересекающихся ЛВР в МП-отношениях может упростить ограничения. Например, если дополнительно предположить, что автор и руководитель одной диссертации обязательно должны быть из разных организаций, то ограничения $Д^{\wedge}Орг$ автоматически обеспечат все ограничения $Д^{\wedge}П$ и надобность в $Д^{\wedge}П$ отпала бы вовсе.

3.5 Расщепление МП-ограничений

Если некоторая МП-целостность M имеет предикат в виде конъюнкции двух или более логических выражений $Pr(M) = (P_1, P_2, \dots)$, то её можно представить в виде эквивалентной совокупности двух или более МП-целостностей, заданных на том же МП-отношении.

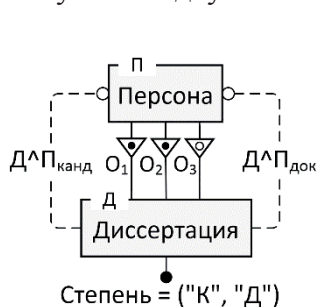


Рисунок 8 – Пример расщеплённого МП-ограничения

На рисунке 8 представлен пример *ER*-модели, отражающей участие персон в качестве оппонентов диссертации, для чего класс Персона связан с классом Диссертация тремя связями – O_1, O_2, O_3 . Отрицательная МП-целостность $Д^{\wedge}П$ (не показана на рисунке) призвана обеспечить требование: оппоненты одной диссертации должны быть разными персонами. При этом (в отличие от примера на рисунке 7) учитывается, что для кандидатской диссертации требуется два оппонента, а для докторской – три. Для этого связь O_3 «третий оппонент» допускает сирот (светлый кружок). Вид конкретной диссертации («кандидатская» или «докторская») задаётся значением атрибута Степень.

МП-ограничение $Д^{\wedge}П$ расщеплено на два МП-ограничения для случаев кандидатской и докторской диссертаций соответственно:

$Д^{\wedge}П_{канд}$ контролирует кандидатские диссертации, проверяя несовпадение первого и второго оппонентов и отсутствие третьего:

$$\begin{aligned} Д^{\wedge}П_{канд} &= \{L_1 = Д \text{---} \bullet^{O_1} П, L_2 = Д \text{---} \bullet^{O_2} П, L_3 = Д \text{---} \circ^{O_3} П\}, \\ Pr(Д^{\wedge}П_{канд}): (_L1.Степень = "К") &\Rightarrow (\wedge L_1 \neq \wedge L_2, isnull(\wedge L_3)). \end{aligned} \quad (24)$$

$Д^{\wedge}П_{док}$ контролирует докторские диссертации, проверяя присутствие третьего и несовпадение первого, второго и третьего оппонентов:

$$\begin{aligned} Д^{\wedge}П_{док} &= \{L_1 = Д \text{---} \bullet^{O_1} П, L_2 = Д \text{---} \bullet^{O_2} П, L_3 = Д \text{---} \bullet^{O_3} П\}, \\ Pr(Д^{\wedge}П_{док}): (_L1.Степень = "Д") &\Rightarrow (isnotnull(\wedge L_3), \wedge L_1 \neq \wedge L_2, \wedge L_1 \neq \wedge L_3, \wedge L_2 \neq \wedge L_3). \end{aligned} \quad (25)$$

Таким образом, расщепление МП-ограничений в некоторых случаях может сделать представление МП-целостности в *ER*-модели более понятным.

Заключение

Введено понятие МР-целостности, возникающее при наличии в *ER*-модели определённых структурных особенностей – МП-отношений, – когда имеется несколько цепочек связей от некоторого класса-потомка к некоторому классу-предку. На МП-отношениях могут задаваться МП-ограничения, отражающие особенности ПрО, которые накладываются на множество экземпляров предков каждого экземпляра потомка. Введена графическая нотация для обозначения МП-целостности на *ER*-диаграмме.

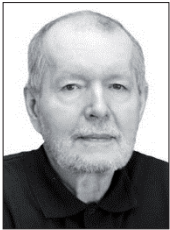
Выполнено формальное описание МП-целостности в символьной нотации на основе введённой системы взаимоувязанных определений: ЛВР; «сиротабельная» связь; МП-отношение; МП-ограничение (в т.ч. частные случаи – положительное и отрицательное МП-ограничения); МП-предикат. Это позволяет задавать формальные концептуально-онтологические спецификации правил обеспечения МП-целостности, дополняющие и уточняющие графическую нотацию.

На примерах *ER*-моделей продемонстрированы особенности задания МП-целостности в графической и в символьной нотациях. Рассмотрены примеры положительных и отрицательных МП-ограничений. Показано взаимное влияние нескольких МП-ограничений с пересекающимися ЛВР, учёт которого позволяет в ряде случаев упростить МП-предикаты. Показано, что расщепление МП-ограничений со сложными МП-предикатами даёт возможность сделать представление МП-целостности более понятным.

Список источников

- [1] *Jardine D.A.* The ANSI/SPARC DBMS Model. North-Holland Pub. Co., 1977. 225 p.
- [2] *Мартин Дж.* Организация баз данных в вычислительных системах. Пер. с англ. под ред. А.Л. Щерса. М.: Мир, 1978. 616 с.
- [3] *Peter Pin-Shan Chen.* The Entity-Relationship Model — toward a unified view of data // ACM Transactions on Database Systems. 1976, vol.1. P.9–36. DOI 10.1145/320434.320440.
- [4] *Storey V.C. et al.* An ontology-based expert system for database design // Data and Knowledge Engineering, vol.28, no.1. P.31-46, 1998. DOI 10.1016/S0169-023X(98)00012-3.
- [5] *Sugumaran V., Storey V.* Supporting database designers in entity-relationship modeling: An ontology-based approach. ICIS 2003 Proceedings. 2003. P.59-71. <https://aisel.aisnet.org/icis2003/6>.
- [6] *Chujai P., Kerdprasop N., Kerdprasop K.* On transforming the ER model to ontology using Protégé OWL tool. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2014. Т.6. №6. С.484.
- [7] *Семенова В.А., Смирнов С.В.* Механизм нормализации эмпирического контекста в онтологическом анализе данных. *СИИТ*. 2021. Т.3, №3(7). С.45-52. DOI:10.54708/26585014_2021_33745. EDN QXRTXB.
- [8] *Боргест Н.М.* Системный и онтологический анализы: схожесть и различие понятий // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.9-28. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28. EDN KRGWSR.
- [9] *Perakath C. Benjamin et al.* IDEF5 Method Report. Prepared for Armstrong Laboratory AL/HRGA. Knowledge Based Systems Inc. Sept. 21, 1994. 187 p. <https://online-pmo.com/wp-content/Education/Idef5.pdf>.
- [10] *Антонов А.А., Быков А.Н., Чернышев С.А.* Обзор существующих способов формирования онтологии предметной области при моделировании // *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2021. Т.6, №4(22). С.12-17. EDN WMBSEO.
- [11] *Богданова Д.Р., Шахматова Г.Р., Ниязгулов А.М.* Структура информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.270-278. DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278. EDN CAYCVK.
- [12] *Миронов В.В., Гусаренко А.С., Тузубаев Г.А.* Персонализированные шаблоны конструкторских документов в учебном проектировании: онтологические аспекты и ситуационно-ориентированная реализация. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №3(49). С.333-351. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-3-333-351.

Сведения об авторах



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

Миронов Константин Валерьевич, 1991 г.р., доцент кафедры вычислительной техники и защиты информации Уфимского университета науки и технологий. Диплом специалиста по защите информации (Уфимский государственный авиационный технический университет, 2012). Степень PhD Технического университета Вены (2015). Труды в области робототехники и искусственного интеллекта, обработки и защиты информации. ORCID: 0000-0002-4828-1345. AuthorID (РИНЦ): 939814. Author ID (Scopus): 56732791500. Researcher ID (WoS): ABC-3576-2020. mironovconst@gmail.com



Поступила в редакцию 30.07.2024, после рецензирования 16.09.2024. Принята к публикации 8.10.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-493-503

Conceptual and ontological aspects of the plurality of ancestors in "entity-relationship" information models

© 2024, V.V. Mironov ✉, K.V. Mironov

Ufa University of Science and Technologies, Ufa, Russia

Abstract

The design of information models in the development of automated systems involves constructing entity-relationship models, which define classes of entities and interclass relationships of the ancestor-descendant type, serving as a conceptual and ontological foundation for the subsequent creation of databases. This article explores aspects of representing the semantic constraints of the subject area imposed on relationships between entities in entity-relationship models. A special type of relationship between classes of entities, termed multiple ancestor (MA) relations, is highlighted, where several instances of the ancestor entity may exist for a single instance of the descendant entity. The article analyses the possible semantic constraints that arise in such cases and the anomalies they generate. Based on the introduced concepts of ascending kinship lines and the MA predicate, a formalisation of MA integrity is presented. Examples of formal MA constraints are provided, including positive (requiring the coincidence of ancestor instances), negative (requiring the mismatch of ancestor instances), and mixed. The mutual influence of several MA constraints with partially intersecting lines of ascending kinship is also examined. Finally, the feasibility of implementing MA constraints in relational database models is evaluated.

Keywords: *information model, entity-relationship model, classes and instances, ontology in computer science, conceptual schema, ancestor-descendant hierarchy.*

For citation: Mironov VV, Mironov KV. Conceptual and ontological aspects of the plurality of ancestors in "entity-relationship" information models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 493-503. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-493-503.

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

List of figures

Figure 1 — A simple example of MA relationship

Figure 2 — The emergence of an MA relation as a result of the composition of models

Figure 3 — MA relation without MA constraint

Figure 4 — Example of a positive MA integrity
 Figure 5 — Example of a complex positive MA integrity
 Figure 6 — Example of a negative MA integrity
 Figure 7 — Example of a complex negative MA integrity
 Figure 8 — Example of a split MA constraint

References

- [1] **Jardine DA.** The ANSI/SPARC DBMS Model. North-Holland Pub. Co., 1977. 225 p.
- [2] **Martin J.** Computer Data-base Organization [In Russian]. Translated from English edited by A.L. Shchers. Moscow, Mir Publ., 1978. 616 p.
- [3] **Peter Pin-Shan Chen.** The Entity-Relationship Model — toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*. 1976; 1: 9–36. DOI 10.1145/320434.320440.
- [4] **Storey VC. et al.** An ontology-based expert system for database design. *Data and Knowledge Engineering*, 1998; 28(1): 31–46. DOI 10.1016/S0169-023X(98)00012-3.
- [5] **Sugumaran V, Storey V.** Supporting database designers in entity-relationship modeling: An ontology-based approach. *ICIS 2003 Proceedings*. 2003. P.59–71. <https://aisel.aisnet.org/icis2003/6>.
- [6] **Chujai P, Kerdprasop N, Kerdprasop K.** On transforming the ER model to ontology using Protégé OWL tool. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2014; 6(6): 484.
- [7] **Semenova VA, Smirnov SV.** The mechanism of normalization of the empirical context in the ontological analysis of data [In Russian]. *SIIT*. 2021; 3(7): 45–52. DOI 10.54708/26585014_2021_33745. EDN QXRTXB.
- [8] **Borgest NM.** System and ontological analysis: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(1): 9–28. DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28. EDN KRGWSR.
- [9] **Perakath C. Benjamin et al.** IDEF5 Method Report. Prepared for Armstrong Laboratory AL/HRGA. Knowledge Based Systems Inc. Sept. 21, 1994. 187 p. <https://online-pmo.com/wp-content/Education/Idef5.pdf>.
- [10] **Antonov AA, Bykov AN, Chernyshev SA.** A review of existing methods for forming the ontology of a subject area in modeling [In Russian]. *International Journal of Information Technology and Energy Efficiency*. 2021; 6(22): 12–17. EDN WMBSEO.
- [11] **Bogdanova DR, Shakhmametova GR, Niiazgulov AM.** The structure of the CDSS information repository based on the ontological approach [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(2): 270–278. DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278. EDN CAYCVK.
- [12] **Mironov VV, Gusarenko AS, Tuguzbaev GA.** Personalized engineering documentation templates in instructional design: ontological aspects and situation-based implementation [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2023; 13(3): 333–351. DOI 10.18287/2223-9537-2023-13-3-333-351. EDN GEPSYX.

About the authors

Valery Viktorovich Mironov (b. 1952), Professor at the Department of Automated Control Systems of the Ufa University of Science and Technology. Diploma in Radiophysics (Voronezh University, 1975). Doctor of Technical Sciences (1995). Researches are in the field of situational management, hierarchical models and databases. ORCID: 0000-0002-0550-4676. AuthorID (RSCI): 691759. Author ID (Scopus): 57192962687. Researcher ID (WoS): AAB-9377-2022. mironov@list.ru ✉

Konstantin Valerievich Mironov (b. 1991), Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Information Security, of the Ufa University of Science and Technology. Diploma in Information Security (Ufa Aviation Technical University, 2012). PhD from the Technical University of Vienna (2015). Researches are in the field of robotics and artificial intelligence, information processing and information security. ORCID: 0000-0002-4828-1345. AuthorID (RSCI): 939814. Author ID (Scopus): 56732791500. Researcher ID (WoS): ABC-3576-2020. mironovconst@gmail.com

Received July 30, 2024. Revised September 16, 2024. Accepted October 8, 2024.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.82

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-504-517



Применение графов знаний для клинического мониторинга процесса лечения

© 2024, В.В. Грибова, Д.Б. Окунь, Е.А. Шалфеева ✉

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

Аннотация

Для всех этапов лечебно-диагностического процесса необходим мониторинг состояния пациентов. На этапе лечения задачами мониторинга являются оценка эффективности тактики лечения и его безопасность: отсутствие осложнений и нежелательных последствий от приёма медицинских препаратов или процедур и их сочетаний. Для улучшения взаимодействия врач – пациент и качества лечебного процесса необходимо создание интеллектуальных средств мониторинга. В мониторинге по информации о пациенте с помощью формализованных знаний предметной области требуется определить, результаты каких наблюдений и в какие моменты времени покажут, является ли состояние пациента отличающимся от прогнозируемого. Цель исследования – разработать онтологию для формализации знаний, применяемых для выбора и объяснения параметров мониторинга в процессе лечения. Выделены основные связи понятий, достаточные для решения задач мониторинга состояния пациента в процессе лечения. На их основе построен онтологический граф для класса задач мониторинга в медицине. Описан метод построения графов знаний для произвольных заболеваний, а также процесс рассуждения для определения состояния, отличного от ожидаемого. Показаны процесс рассуждения и выдача рекомендации. Предложенный подход положен в основу системы поддержки принятия решений для этого класса задач, где параметры мониторинга могут изменяться с учётом стадии лечения, состояния и особенностей пациентов.

Ключевые слова: клинический мониторинг, процесс лечения, состояние пациента, онтология, граф знаний, система поддержки принятия решений.

Цитирование: Грибова В.В., Окунь Д.Б., Шалфеева Е.А. Применение графов знаний для клинического мониторинга процесса лечения. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.504-517. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-504-517.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН № FFW-2021-0004.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Мониторинг состояния пациентов необходим для всех этапов лечебно-диагностического процесса. На этапе лечения мониторинг необходим для уточнения того, насколько полно и с необходимым результатом достигаются все цели лечения, нет ли осложнений и других нежелательных последствий от приёма медицинских препаратов или процедур, насколько хорошо используемые методики лечения согласуются между собой.

Мониторинг процесса лечения сложен для врача: часть необходимых для мониторинга параметров задаётся в клинических руководствах Минздрава (см. Рубрикатор КР¹), которые регламентируют правила принятия клинических решений, например [1], и часть параметров

¹ Рубрикатор клинических рекомендаций (КР). https://cr.minzdrav.gov.ru/clin_recomend.

принимается из фармакологических справочников (инструкций по применению лекарственных средств, ЛС). Учитывая количество заболеваний, которые «ведёт» врач, и ЛС, имеющих свои противопоказания, ограничения и особые условия приёма, становится очевидным, что врачебные ошибки² являются следствием огромного объёма информации, которое необходимо «обработать» врачу при принятии решений [2].

Для обеспечения взаимодействия врач - пациент необходимы программные средства мониторинга, которые могут дать обратную связь от пациента, при этом имеется ряд опасений, что врачи ещё больше будут перегружены избыточной информацией [3-5]. Создание интеллектуальных средств мониторинга состояния пациентов позволит улучшить взаимодействие между пациентом и врачом с целью улучшения качества лечебного процесса.

Целью данной работы является создание онтологии для формирования графов знаний (ГЗ), предназначенных для проведения клинического мониторинга процесса лечения в системах поддержки принятия решений (СППР).

1 Виды мониторинга и источники знаний

1.1 Обзор решений медицинского мониторинга

Медицинский мониторинг включает использование различных методов и устройств для сбора данных о физиологических параметрах организма. Часто измерение показателей состояния пациента сопровождается измерениями параметров окружающей среды (температура, влажность, атмосферное давление, неблагоприятные факторы – загрязнение, радиация и др.), которые могут повлиять на измеряемые показатели.

В медицине классификация видов мониторинга является условной [3-5]. Мониторинг может быть простым (с точки зрения его планирования и оценки его результатов) и сводиться к учёту и анализу многих наблюдений о пациенте (и к выявлению отклонения от нормы) для проведения диагностики, анализа эффективности проведения лечения, оценки и прогноза его состояния. Известны мобильные приложения (например, *Apple Health*³, *MyTherapy*⁴, *Happify*⁵, *Medisafe*⁶), «умные» часы и другие устройства, позволяющие проводить мониторинг различных параметров человека. Они помогают отследить такие важные показатели здоровья как частота сердечных сокращений, артериальное давление, уровень кислорода в крови, уровень стресса и др. Другие приложения направлены на организационную часть амбулаторного лечения (календари приёма лекарств, ведение дневников с передачей информации лечащему врачу и возможностью дистанционного взаимодействия врачей и пациентов, например, *Sensley.ly*⁷, доступного в *AppStore Remsmed*⁸).

Клинический мониторинг используется в операционных, реанимационных отделениях, палатах интенсивной терапии и связан с измерением жизненно важных показателей с помощью инструментальных или лабораторных измерений [4-6].

К удалённому медицинскому мониторингу относятся: инструментальные (инвазивные и неинвазивные методы мониторинга), которые собираются вручную пациентом или автоматически с помощью имплантированных или носимых устройств; лабораторные методы, включающие регулярные анализы крови, мочи и других биологических жидкостей для оцен-

² Материалы «Оценка качества медицинской информации» (2017 года). <https://yandex.ru/health/turbo/articles?id=2635>.

³ <https://apps.apple.com/us/app/apple-здоровье/id1242545199?l=ru>.

⁴ <https://www.mytherapyapp.com/ru>.

⁵ <https://apps.apple.com/ru/app/happify-for-stress-worry/id730601963>.

⁶ <https://medisafeapp.com/>.

⁷ <https://sensely.com/>.

⁸ <https://remsmmed.ru>.

ки различных параметров; смешанные, которые также включают жалобы пациента и необходимые значения окружающей среды.

Наблюдение за пациентами может выявлять обострения хронических заболеваний и способствовать: упреждающему реагированию на возникающие проблемы; более точной, персонализированной диагностике и эффективному управлению процессом лечения; снижению вероятности осложнений^{9,10}.

В общем случае результатом мониторинга являются данные, которые либо сохраняются у пациента и в дальнейшем могут быть предоставлены врачу для оценки, либо передаются в лечебное учреждение и заносятся в электронную медицинскую карту. Получение врачом огромного количества информации может негативно отразиться на результатах его деятельности и привести к обратному эффекту [7].

Существуют системы, реализующие отдельные функции обработки данных мониторинга с помощью методов искусственного интеллекта (ИИ), например, обнаружение аритмии на основе ЭКГ [8], мониторинг гемодинамики и жизненно важных показателей [6, 9, 10], лечение сахарного диабета [11]. Имеются системы мониторинга процесса лечения на основе симптомов. В таких системах используются модели ожидаемого ответа на лечение, но более точными признаются клинические динамические модели прогнозирования, которые позволяют с каждым новыми полученными данными уточнять прогнозы [12]. Отсутствуют системы, ориентированные на широкий класс заболеваний и позволяющие гибко настраивать параметры мониторинга, анализировать их и адаптировать к конкретным пациентам.

1.2 Мониторинг лечения и источники знаний

Учитывая разнообразие форм и видов мониторинга и его классификации, в данной работе рассматривается подмножество, которое обеспечивается знаниями и связано с клиническим мониторингом лечения заболеваний. Основными задачами мониторинга лечения является контроль:

- эффективности тактики лечения, т.е. поиск таких признаков-симптомов, которые должны исчезнуть или улучшиться (не ухудшиться) за определённый период; если наблюдаемые признаки не изменились (как ожидалось), принимаются решения о корректировке лечения: смене препаратов и видов лечения, дозировок отдельных элементов, длительности применения, вплоть до их полной отмены, а если достигнуты ожидаемые результаты – о прекращении лечения;
- безопасности лечения, т.е. проверка, не появились ли признаки, значения которых до начала лечения были нормальными (или допустимыми для данного вида лечения), но в процессе лечения изменились в худшую сторону.

Для осуществления медицинского мониторинга из источников знаний (КР, справочники, монографии, медицинские журналы и др.) выбираются актуальные сведения для контроля клинической картины. Для формирования на основе этих источников представления о контроле за течением клинического процесса и правил его проведения требуются значительные временные затраты. Не менее важной является информация в справочниках (инструкциях) по применению ЛС: указываются возможные осложнения, нежелательные реакции от приёма ЛС, которые также нуждаются в мониторинговании.

⁹ *Artificial Intelligence and Machine Learning (AI/ML) - Enabled Medical Devices. August 7, 2024 update.* <https://www.fda.gov/medical-devices/software-medical-device-samd/artificial-intelligence-and-machine-learning-aiml-enabled-medical-devices>.

¹⁰ *AI in Remote Patient Monitoring: The Top 4 Use Cases in 2024. September 6, 2023.* <https://healthsnap.io/ai-in-remote-patient-monitoring-the-top-4-use-cases-in-2024/>.

2 Граф знаний как источник сведений для принятия решений

СППР должна базироваться на знаниях, в которых описаны все необходимые указания и критерии их применимости для проведения мониторинга процесса лечения и оценки его результата. Одним из подходов к разработке подобных систем является проектирование программного обеспечения на основе онтологий.

2.1 Онтология наблюдения процесса в организме

Онтологический граф построен на основе знаний, необходимых для решения задач мониторинга организма в процессе лечения. Узлами онтологического графа являются понятия предметной области (ПрО): процесс, воздействие, наблюдение, состояние и др., а дугами – их связи (причина зарождения патологического процесса, лечебное воздействие...). Ориентированный граф, имеющий корневой узел и включающий иерархические подграфы, удобно применять для моделирования документов.

Граф знаний (ГЗ) – главный компонент консультирующих систем, в которых знания интерпретируются при решении задачи для анализа входных данных и выработки решений с объяснениями.

В задаче мониторинга требуется по результатам наблюдений динамической системы в реальном времени и ожидаемым (целевым) состояниям определить, не является ли ситуация отличной от ожидаемой. Для решения такой задачи может потребоваться знание о нормальных значениях всех наблюдений.

В задаче интеллектуального мониторинга требуется по информации о системе, состоянии которой вышло из нормы, с помощью формализованных знаний ПрО определить, результаты каких наблюдений и в какие моменты времени покажут, является ли состояние системы отличающимся от ожидаемого (прогнозируемого).

Пусть:

$\{r_n(t_0, t_1, \dots, t_k)\}$ – наблюдения за свойствами (r_n) объекта или системы в динамике, $n \in N$ – количество свойств с потенциально изменяющимися значениями, t_0 – момент начала наблюдений, t_k – текущий момент, $\{t_i\}$ – последовательные моменты наблюдений между начальным и текущим моментами, $t_{(k+1)}$ – первый из ожидаемых моментов;

$\{r_j^{ev}(t_v)\}$ – внешние воздействия на ситуацию или систему, момент t_v находится между t_0 и $t_{(k+1)}$;

$\{r_m^{prop}\}$ – неизменяемые параметры или свойства динамической системы, $m \in M$ – количество неизменяемых свойств;

$R = \{r_n\} \cup \{r_j^{ev}\} \cup \{r_m^{prop}\}$ – множество всех наблюдений, $\{r_n'\}$ – выбранные наблюдения из полного множества наблюдений, $\{r_n'\} \subset \{r_n\}$;

$isDifferentFromExpected(\{r_n(t_k)\}, \{r_n(t')\})$ – предикат, результирующий проверку отличия наблюдаемого состояния от ожидаемого, где состояние – это набор значений проведённых наблюдений;

KnB – база знаний (БЗ), которая содержит конкретные утверждения о связях понятий в конкретной ПрО;

$AS(\{r_n'\} \cup isDifferentFromExpected(t'))$ – объяснение того, почему $\{r_n'\}$ выбраны для проверки состояния в момент t' .

Примечание. Фигурные скобки показывают множество элементов, круглые заключают аргументы, от которых зависит значение предиката или функции.

От СППР пользователи ожидают построение объяснения. С учётом этого постановка задачи мониторинга такова.

Дано: $R = \{r_n\} \cup \{r_j^{ev}\} \cup \{r_m^{prop}\}$, t' , KnB (база знаний об изменениях показателей под воздействием лечения).

Требуется найти: $AS(\{\{r_n'\} \cup isDifferentFromExpected(\{r_n'(t_{(k+1)})\})\})$.

Момент измерения (t') может быть явно не задан (он может быть определён в процессе мониторинга). Для таких постановок в KnB описываются группы (множества) признаков ($\{signName_k\}$), целевые (нормальные) диапазоны значений, для которых ($\{signValuesRanges_k\}$) определены как «числовые значения», конкретизируемые через <нижняя граница, верхняя граница, единица измерения> или как «качественные значения» с непустым множеством «значение». Описываемые признаки в ПрО играют роль критериев достижения цели лечения, применимости методов лечения, а также необходимости проведения мониторинга. Момент измерения (t'), обычно отсчитываемый от момента начала процесса, связан с критерием тем, что $\{r_n\}$ сравниваются с ($\{signName_k, signValuesRange_{sk}\}$) в момент t' .

Для решения задачи нужна онтология с описанием закономерностей ПрО в виде влияния течения времени и событий на варианты динамики состояния системы (см. рисунок 1).

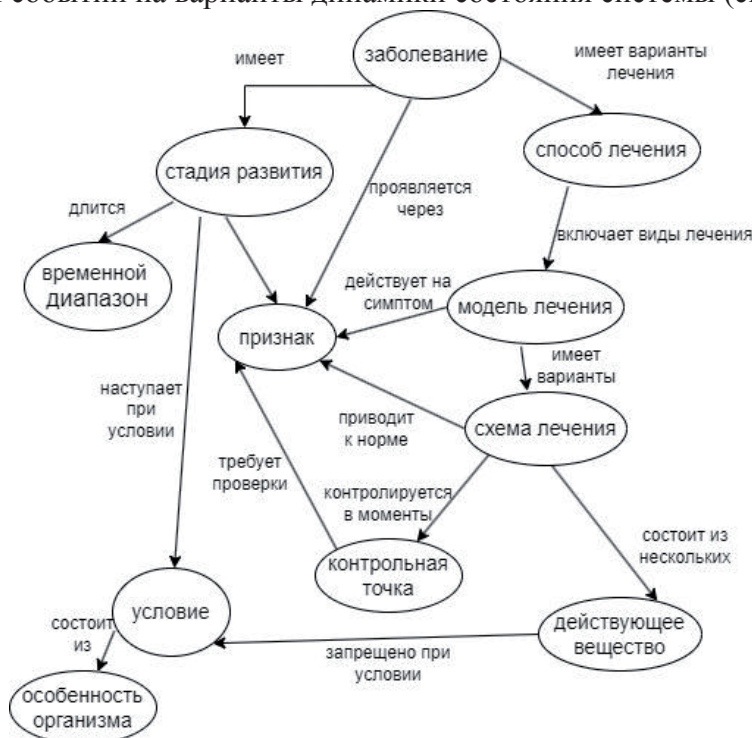


Рисунок 1 – Онтологический граф связи понятий¹¹ для описания картины заболеваний и других закономерностей ПрО

Формируемые по такой онтологии ГЗ различных заболеваний будут востребованы там, где параметры мониторингирования могут или должны изменяться с учётом особенностей пациентов. Для изложения таких знаний используются понятия:

- особенности и метрики организма ($\{proper_n, prValuesRange_{kn}\}$);
- название патологического процесса или его стадии ($Ds, DsStage_s$);
- признаки текущей стадии (s) процесса ($\{signName_k, signValuesRange_{sk}\}$);
- внешние воздействия ($\{event_v\}$), являющиеся причинами зарождения патологических процессов, обычно с некоторой задержкой после свершения события ($delay_v$): ($\{event_v, [evValuesRange_{jv}], delay_v, Ds\}$);

¹¹ Использован графовый редактор <https://app.diagrams.net/>.

- внешние воздействия ($\{event_v\}$), являющиеся лечебными воздействиями ($\{event_u, [param_{ju}, paramValuesRange_{ju}], contin_u\}$), способными обеспечить через заданное время ($contin_u$):
 - переход процесса Ds в стадию $DsStage_s$ из-за воздействий на него ($\{event_u, contin_u\}$, $DsStage_{su}$);
 - изменение некоторых показателей состояния ($\{signName_k\}$) из-за воздействий: ($\{event_u, contin_u\}$, $\{signName_k, ValuesTrend_k\}$) или ($\{event_u, contin_u\}$, $\{signName_k, signValuesRange_{ku}\}$), возможно, с побочными эффектами ($signValuesRange_{ku}$ вне $signNormalValues$).

В задаче *контроля эффективности* воздействий по входным данным о ситуации (симптомам $\{r_n(t_0, \dots, t_k)\}$ и факторам $\{r_m^f\}$) выбирается из базы знаний вариант течения процесса; динамика симптомов сравнивается с описанной в нём картиной течения. Если в периоде развития соответствующему t_k применено воздействие (лечение), допустимое для этого периода в этом варианте, то планируются к проверке признаки, свойственные $t_{(k+1)}$ -му периоду.

В задаче *контроля безопасности* планируются к проверке признаки $t_{(k+1)}$ -го периода, указываемые в знаниях как возможные побочные эффекты.

В задаче *контроля динамики состояния* (при диагностике) по достаточному набору признаков рассматриваемого варианта течения процесса ($R(t_0, t_1, \dots, t_k)$) выбирается стадия текущего процесса; оценивается критичность следующего момента $t_{(k+1)}$ или следующей стадии и планируются к регулярной проверке все актуальные признаки.

Онтологический граф (см. рисунок 1) связи понятий переведён в структурированную форму для описания знаний (см. рисунок 2).

Корневой узел включает множество названий заболеваний. Каждое заболевание связывается с описанием его стадий развития и с множеством описаний способов лечения. Обычно концевые узлы отношений размещаются (в иерархическом виде) под узлами-истоками этих отношений, а названия отношений обычно представляются нетерминальными элементами в получаемых иерархических структурах. Структурированная форма представления для ориентированного графа, имеющего корневой узел и не имеющего циклов, создаётся исходя из следующих принципов: корневой узел ресурса соответствует названию или идентификатору документа; на следующем уровне иерархии добавляются как узлы названия основных разделов или сущностей; связь со следующим (в иерархии) узлом соответствует иерархической связи (такой, как целое–часть, множество – элемент множества, общее – частное или другой связи: причина – следствия, процесс – стадии, стадия – признаки, имя признака – область значений признака и т.д.).

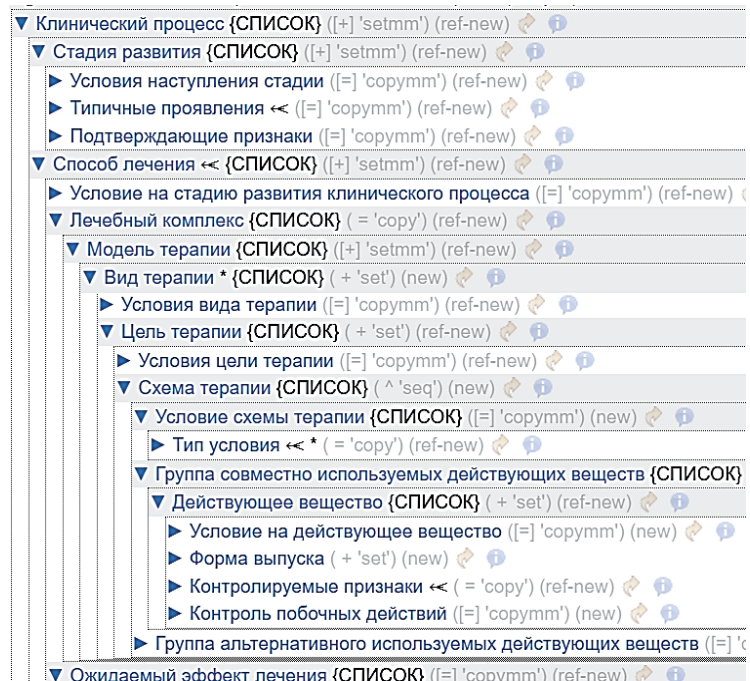


Рисунок 2 – Фрагмент онтологического графа течения и лечения заболевания в иерархическом виде

При выборе в качестве рабочей среды инструментов iasraas¹² разработчики получают механизм ссылок на любые узлы-понятия, что позволяет трансформировать ГЗ и с циклическими цепочками связей в иерархию узлов-понятий. Повторно используемый экземпляр понятия, в т.ч. порождённый выше в иерархии, располагается на любом требуемом уровне, удобном для восприятия при чтении, и фактически хранится как единственный.

Онтологический граф для описания течения заболевания и его лечения для удобства может быть декомпозирован на модуль вариантов развития процесса в организме (диагностика) и модуль управления состоянием организма (лечение).

2.2 Уточнение онтологии клинических знаний

Для учёта варианта течения заболевания и выбора одной из возможных схем терапии рассматривается множество факторов. Здесь фактор – это метрика или другая особенность организма (или окружающей среды), влияющая на вариант развития процессов. Для рассмотрения лечебных воздействий в модели, соответствующей медицинской практике, предложена следующая иерархия понятий ПрО (см. рисунок 3).

Содержание задач может уточниться, в частности контроль:

- *эффективности* – поиск наблюдений (и частоты их измерения или контрольные точки), которые покажут, улучшилось ли состояние организма (исчезают ли внешние симптомы, нормализуются ли внутренние показатели);
- *безопасности* – поиск наблюдений (и частоты их измерения), которые покажут, нет ли ухудшений после начала воздействий среди всех известных показателей нормального функционирования организма и указанных в знаниях неблагоприятных влияний этих воздействий на конкретные признаки;
- *динамики состояния организма* – оценка возможности наступления критичной следующей стадии (или даже наличие критичных среди нескольких возможных вариантов следующей стадии) процесса и поиск всех способных изменяться наблюдений (и частоты их измерения), свойственных такому периоду.

БЗ составляется из нескольких модулей, связанных общими понятиями. Структура знаний, формализуемых для задач лечения и его мониторинга, может позволять совместно использовать не только информацию о методе лечения для описанной категории пациентов, но и о том, что и когда при этом методе придётся контролировать.

Для медицинской модели в соответствии с традициями ПрО следует отделить знания о способах выздоровления от знаний о неблагоприятных эффектах.

Могут быть специально сформированы знания (инструкции) для каждой схемы лечения, показывающие, в каком контроле нуждается больной. Например, цель – следить, не наступила ли через ожидаемое время следующая «худшая» стадия или, наоборот, не наступила ли уже «хорошая» стадия по прошествии заданного времени (см. рисунок 4). Тогда для изложения знаний дополнительно понадобятся понятия: наблюдения в будущем ($\{(signName_n, sign-ValuesRange_n(t_{(k+1)}))\}$) и контрольные точки ($t_{(k+1)}, t_{(k+2)}, \dots$) или частота их измерения ($interv, t_{(k+M)} = t_k + M * interv$).

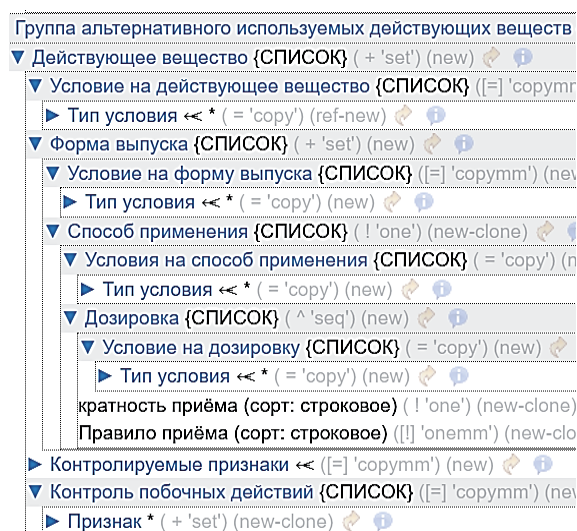


Рисунок 3 – Фрагмент модели понятий для описания воздействий

¹² Инструменты онтологической платформы. <https://iaspaas.dvo.ru/my/services>.

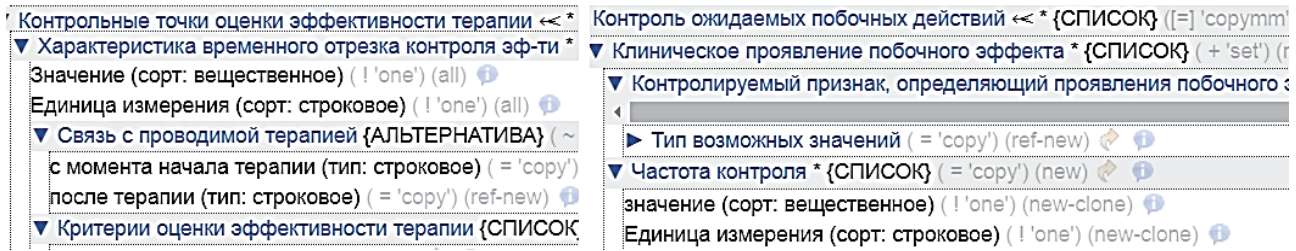


Рисунок 4 – Фрагмент знаний о необходимом контроле

Фрагменты на рисунке 4 демонстрируют комплекс связей, позволяющих организовать пациент-ориентированный подход к проведению контрольных мероприятий по достижению целей терапии и отслеживать ожидаемый (возможный) выход за пределы физиологического «коридора норм». С помощью понятий, порожаемых по узлу «характеристика временного отрезка контроля эффективности» описывается временной интервал для контрольных исследований, «связь с проводимой терапией» – семантика зависимости процесса проводимой терапии, «критерии оценки эффективности» – описание ожидаемой клинической картины при достижении целей терапии. Кроме контроля по достижению целей терапии запланирован контроль ожидаемых побочных действий при проводимой терапии: временные изменения диапазона физиологических норм. Предлагаемые фрагменты позволят СППР клинических решений или подобным системам, обрабатывающим знания, осуществлять мониторинг процесса терапии и дифференцировать не только достижение целей терапии, но и объяснять клинически обусловленный выход из физиологической нормы.

2.3 Метод рассуждения по ГЗ

В задачах мониторинга, для которых знания подготовлены в виде ГЗ или иерархических семантических сетей, рассуждения производятся по связям между понятиями $\langle Ds_m, event_u, t, signName_{k,t}, signValuesRange_{k,u,t} \rangle$, $m \in M$ -множеству патологических процессов, $u \in U$ -множеству воздействий на организм. Их конкретные экземпляры, хранимые в ГЗ, сопоставляются с входной ситуацией, чтобы формировать гипотезы о параметрах наблюдения $\{ \langle signName_{k,t} \rangle \}$.

Проход по иерархическим семантическим сетевым знаниям, связывающим понятия, среди которых есть искомые в решаемой задаче $\langle Ds_{Stage_j}, \{signName_{jk}\} \rangle$, представляет собой движение по цепочкам от $\langle Ds_m, Ds_{Stage_{mj}} \rangle$ к $\langle Ds_{Stage_{m(j+1)}}, \{signName_{(j+1)mk}\} \rangle$ и от $\langle Ds_m, event_u \rangle$ к $\langle delay_{mu}, \{signName_{umk}\} \rangle$.

Стратегия для задач анализа – отбор гипотез, в которых отсутствуют противоречия входным условиям задачи. Т.е. в БЗ берутся те пути развития, которые проходят через «точки» (и параметры), указанные среди входных данных. Для задачи мониторинга «контроль эффективности» входные данные относятся к разным моментам времени течения процесса; они включают лечебные воздействия, которые относятся к разным периодам. Часто на момент решения задачи все наблюдения предшествуют моменту лечебного воздействия.

Описанные в БЗ варианты развития с учётом воздействий позволяют прогнозировать тренды, а значит увидеть в знаниях те признаки, которые в каждом из трендов наиболее важны для слежения.

Процесс рассуждения по знаниям в задаче мониторинга для определения состояния, отличного от ожидаемого нормального, состоит в следующем: результаты получаемых на фоне лечения (ev_u) значений наблюдений $\{r_j(t_k)\}$ в момент t_k сопоставляются элементам знаний $\{ \langle signName_{ij}, NormSignValues_{ij} \rangle \}$. Применяется предикат неНормален ($r_j(t)$). Объяснением для гипотезы (состояние в норме, состояние не в норме) в момент t_k является множество свя-

зей $\{(\text{signName}_j, \text{NormSignValues}_j), r_{jk}\}$. Т.е. в такой задаче мониторинга осуществляется поиск и объяснения $\{\text{signName}_{jk}\}$.

В задаче контроля эффективности воздействий, где среди входных данных, описывающих ситуацию, есть данные по факторам $\{r_m^f\}$, выбирается вариант течения процесса, $\{r_n(t_0, \dots, t_k)\}$ сравниваются с описанной в нём картиной течения. Если в периоде развития, соответствующем t_k , применено исправляющее воздействие, допустимое для этого периода в этом варианте, то планируются к проверке признаки, свойственные $t_{(k+1)}$ -му периоду: результаты получаемых на фоне лечения ev_u значений наблюдений $\{r_{j(t(k+1))}\}$ в соответствующий момент или в соответствующей стадии сопоставляются элементам знаний для $DsStage_{(k+1)}$: диапазоны значений $\{\text{signName}_{j(k+1)}, \text{signValuesRange}_{ju(k+1)}\}$ либо направление их изменений $\{\text{ValuesTrend}_{ju(k+1)}\}$.

Объяснением для гипотезы $\langle ev_u \text{ достиг цели} \rangle$ в момент или период $(k+1)$ является связь $\langle Ds_m, event_u, t_{(k+1)}, \{\text{signName}_{jm}, (\text{signValuesRange}_{jmu(k+1)} | \text{ValuesTrend}_{jmu(k+1)}) \} \rangle$. Т.е. используется предложение из БЗ: $Ds_m = \{(DsStage_{mi}, interval_{mi}), \{\text{signName}_{jm}\}, (event_u, contin_{um}), \{\text{signName}_{jm}, \text{NormSignValues}_{jm}\}\}$, с учетом $|t_{(k+1)} - t_{(k)}| > contin_{ujm}$. В задаче мониторинга осуществляется поиск и объяснения $\{\text{signName}_{jk}\}$.

В задаче контроля безопасности планируются к проверке признаки $t_{(k+1)}$ -го периода, указываемые в знаниях как возможные побочные эффекты. Для этого применяется предикат $\text{неНормален}(\text{signName}_{j(k+1)})$. Объяснением для гипотезы $\{\langle \text{signName}_{ju}, (\text{в норме} | \text{не в норме}) \rangle\}$ в момент $(i+1)$ является связь $\langle Ds_m, event_u, \{\text{contin}_{uj}, \text{signName}_j, \text{signValuesRange}_{ju}, t_{(i+1)} \rangle \text{contin}_{uj} \rangle$ и $\langle \{\text{signName}_j, \text{NormSignValues}_j\} \rangle$.

2.4 Пример рассуждения и выдачи рекомендации по ГЗ

В процессе анализа данных истории болезни (ИБ) пациента с артериальной гипертензией был рекомендован к назначению комбинированный препарат, содержащий действующие вещества: «Индапамид + Периндоприл» с описанием правил приёма ЛС. Выполненными условиями, явно присутствующими в ГЗ, были диапазоны значений для показателей «пульсовое артериальное давление» и «скорость распространения пульсовой волны» (см. рисунок 5). Мониторинг при такой терапии реализуется по следующему сценарию: контроль целевых «цифр» артериального давления, слежение за появлением побочных эффектов от терапии данным препаратом.

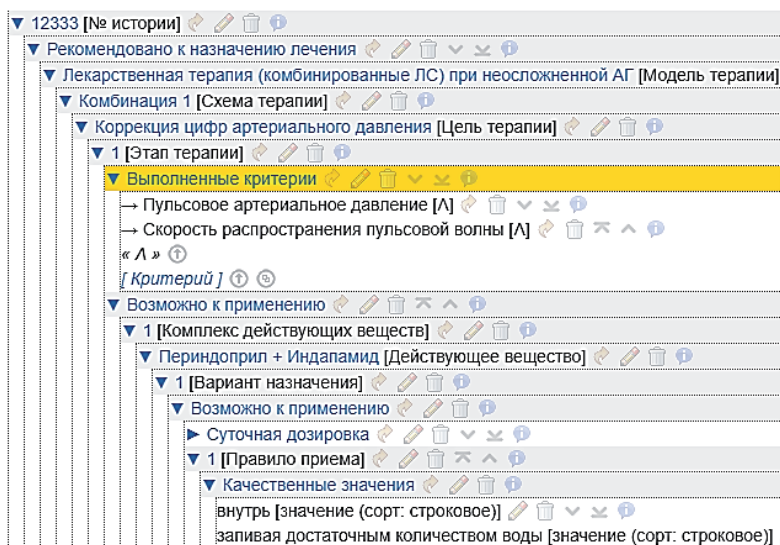


Рисунок 5 – Фрагмент результата выполнения рекомендаций проведения медикаментозной терапии

Перечень побочных действий ($\{contin_{u,t2}, signName_k, signValuesRange_{k,u,t2}\}$) генерируется из соответствующего информационного ресурса (Фармакологический справочник) и включает определение следующих параметров $\{signName_k\}$: наличие белка в моче, концентрация калия в плазме крови, АЛТ, АСТ, билирубин, уровень кальция в плазме крови, уровень глюкозы в плазме крови, клинический анализ крови. Должен осуществляться мониторинг появления жалоб: головокружение, нарушение зрения, звон в ушах, нарушение сна, судороги, парестезии, нарушение вкусового восприятия, сухой кашель, боль в животе, тошнота и др. Кроме этого, осуществляется контроль выявленных (и/или занесённых в систему) патологических состояний (например, анорексия, спутанность сознания). При регистрации (через интервалы $\{contin_{u,t2}\}$) контролируемых признаков в соответствующих диапазонах их значений ($\{signValuesRange_{k,u,t2}\}$) система реагирует и сигнализирует.

По результатам анализа данных, введённых в ИБ, $((R(t_0, \dots, t_k) \cup \{r_{m}^{prop}\}))$, рекомендовано использовать «Индапамид + Периндоприл» в дозировке 1 таблетка 1 раз в день. При применении данного комбинированного ЛС необходимо осуществлять мониторинг лабораторных показателей и клинической картины, которые представлены в «Фармакологическом справочнике».

На фоне приёма данного ЛС регистрируется изменение клинической картины (см. рисунок 6): появление новых жалоб (головокружение, нарушение вкуса, затруднённое дыхание) совместно с резким ухудшением биохимических исследований крови (АЛТ, АСТ). Проверяется предикат $isDifferentFromExpected$ (головокружение ($t_{(k+1)}$)), $isDifferentFromExpected$ (нарушение вкуса ($t_{(k+1)}$)), $isDifferentFromExpected$ (затруднённое дыхание ($t_{(k+1)}$)). Объяснением становится обнаруженное изменение некоторых показателей состояния ($\{signName_k\}$): $((event_u = \text{«Индапамид + Периндоприл»}, contin_u = 1 \text{ сут}), ((signName_1 = \text{АЛТ}, ValuesTrend_{(1,u)} = \text{повышение}), (signName_2 = \text{головокружение}, signValuesRange_{(2,u)} = \text{Имеется}), (signName_3 = \text{нарушение вкуса}, signValuesRange_{(3,u)} = \text{Имеется}), (signName_4 = \text{затруднённое дыхание}, signValuesRange_{(4,u)} = \text{Имеется}), \dots))$.

При анализе клинических параметров пациента данное ЛС попадает в категорию «не рекомендованных» по причине выявленных данных, которые могут являться побочным эффектом (см. рисунок 7), а именно: наличие в ИБ соответствующих жалоб: «Головокружение», «Нарушение вкуса», «Затруднение дыхания» и изменением показателей ферментативной активности печени (Аланинаминотрансфераза крови и Аспартатаминотрансфераза крови), которые увеличены более чем в 3 раза по сравнению с предыдущими значениями.

Таким образом, реализуется динамический контроль текущего клинического состояния пациента на фоне проведения медикаментозной терапии. Для оценки эффективности проводимой терапии в ГЗ лечения для каждого ЛС или их комбинации предусмотрен элемент знаний «критерии оценки эффективности лечения», согласно которому в данном клиническом примере формируется описание ежедневного контроля эффекта проводимой терапии через $signName_{jt}$ = артериальное давление.

▼ Аланинаминотрансфераза крови ↑ [Признак]	
▼ Числовые значения	
ед/л ↑ [единица измерения (сорт: строковое)] *	
28.0 [значение (сорт: вещественное)]	
▼ Аспартатаминотрансфераза крови ↑ [Признак]	
▼ Числовые значения	
ед/л ↑ [единица измерения (сорт: строковое)] *	
27.0 [значение (сорт: вещественное)]	
▼ 2 [Номер записи]	
16.07.2024-11:42:40.000 [дата (сорт: дата и время)] *	
▼ Аланинаминотрансфераза крови ↑ [Признак]	
▼ Числовые значения	
85.0 [значение (сорт: вещественное)]	
ед/л ↑ [единица измерения (сорт: строковое)] *	
▼ Аспартатаминотрансфераза крови ↑ [Признак]	
▼ Числовые значения	
ед/л ↑ [единица измерения (сорт: строковое)] *	
92.0 [значение (сорт: вещественное)]	
▼ Дневники	
▼ 1 [Номер записи]	
16.07.2024-11:19:23.000 [дата (сорт: дата и время)]	
▼ Жалобы *	
▶ Головокружение ↑ [Признак]	
▶ Нарушение вкуса ↑ [Признак]	
▶ Затрудненное дыхание ↑ [Признак]	

Рисунок 6 – Фрагмент отражения динамики в истории болезни

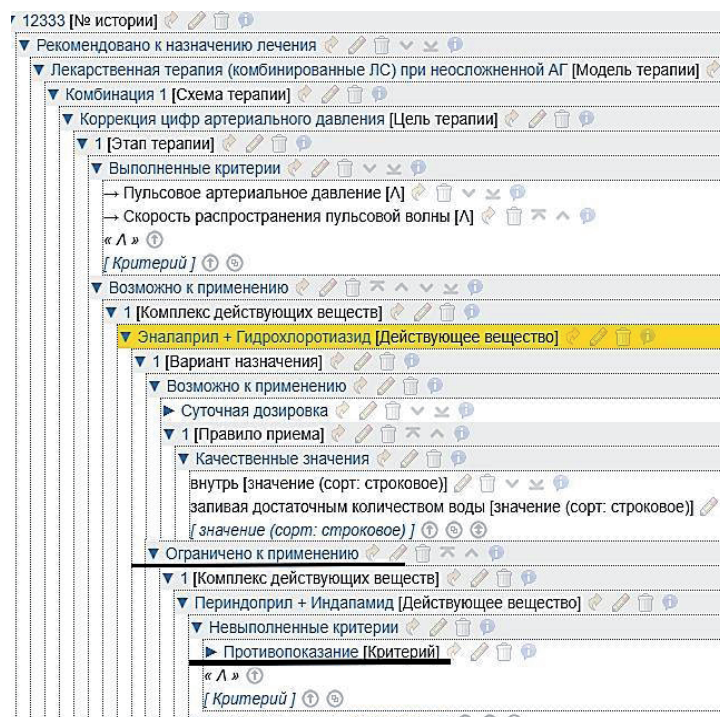


Рисунок 7 – Результат работы системы по контролю противопоказаний к применению лекарственных средств

Заключение

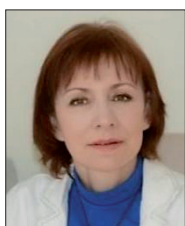
В работе представлен обзор методов медицинского мониторинга, описаны виды мониторинга, построен онтологический граф изменения состояния организма от различных воздействий для мониторинга состояния пациентов в процессе лечения. Он размещён (и доступен новым пользователям по запросу) на облачной платформе IACPaaS (<https://iacpaas.dvo.ru/>), а на его основе реализован метод рассуждения по ГЗ. В работе дан пример использования предложенного решения для мониторинга пациентов при терапии артериальной гипертензии. Онтологический граф об изменении состояния организма с учётом различных воздействий реализует концепцию мониторинга состояния пациентов через возможность определения особенностей организма как критериев выбора схемы терапии и её конкретизации в виде действующих веществ или ЛС. Разработаны ГЗ и решатель на его основе. Для построения системы мониторинга по конкретной медицинской специализации необходимо внесение проверенных знаний [13]. Для проведения тестирования системы требуется набор тестовых или контрольных случаев. Некоторые результаты по автоматическому формированию ГЗ по лечению на основе анализа текстов клинических рекомендаций получены в [14].

Список источников

- [1] Клинические рекомендации. Артериальная гипертензия у взрослых / Кобалава Ж.Д., Конради А.О., Недогода С.В., Шляхто Е.В. и др. Российское кардиологическое общество. 2020. 136 с. https://scardio.ru/content/Guidelines/Clinic_rek_AG_2020.pdf.
- [2] **Краснопеева М.К.** Современные врачебные ошибки, статистика летальных исходов в России. *Проблемы современной науки и образования*. 2017. № 34(116). С.78-80. DOI: 10.20861/2304-2338-2017-116-004.
- [3] **Шадеркин И.А.** Дистанционный мониторинг состояния здоровья и окружающей среды человека: возможности и ограничения. *Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения*. 2022. № 8(3). С.45-54. DOI:10.29188/2712-9217-2022-8-3-45-54.

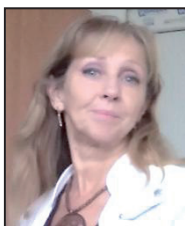
- [4] **Dubey A., Tiwari A.** Artificial Intelligence and Remote Patient Monitoring in US Healthcare Market: A Literature Review. *Journal of Market Access & Health Policy*. 2023. Vol. 11(1). 2205618. DOI:10.1080/20016689.2023.2205618.
- [5] **Сиротина А.С., Кобякова О.С., Деев И.А. и др.** Удаленный мониторинг состояния здоровья. Аналитический обзор. *Социальные аспекты здоровья населения* [сетевое издание]. 2022. № 68(2): 1. DOI: 10.21045/2071-5021-2022-68-2-1.
- [6] **Lu J.W., Wang Y., Sun Y., et al.** Effectiveness of telemonitoring for reducing exacerbation occurrence in COPD patients with past exacerbation history: a systematic review and meta-analysis. *Front Med (Lausanne)*. 2021. Vol. 8. :720019. DOI: 10.3389/fmed.2021.720019.
- [7] **Benamins S., Dhunoo P., Meskó B.** The state of artificial intelligence-based FDA-approved medical devices and algorithms: an online database. *NPJ Digital Med*. 2020. Vol. 3:118. DOI: 10.1038/s41746-020-00324-0.
- [8] **Jiang X., Yao J., You J.H.** Telemonitoring versus usual care for elderly patients with heart failure discharged from the hospital in the United States: cost-effectiveness analysis. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2020. Vol. 8(7): e17846. DOI: 10.2196/17846.
- [9] **Taylor M.L., Thomas E.E., Snoswell C.L., Smith A. C., Caffery L.J.** Does remote patient monitoring reduce acute care use? A systematic review. *BMJ Open*. 2021. Vol. 11(3): e040232. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-040232.
- [10] **Ebrahimian S., Kalra M.K., Agarwal S., et al.** FDA-regulated AI algorithms: trends, strengths, and gaps of validation studies. *Acad Radiol*. 2022. Vol. 29(4). P.559–566. DOI: 10.1016/j.acra.2021.09.002.
- [11] **Nimri R., Battelino T., Laffel LM, et al.** Insulin dose optimization using an automated artificial intelligence-based decision support system in youths with type 1 diabetes. *Nature Med*. 2020. Vol.26(9). P.1380–1384. DOI: 10.1038/s41591-020-1045-7.
- [12] **Bone C., Simmonds-Buckley M, et al.** Dynamic prediction of psychological treatment outcomes: development and validation of a prediction model using routinely collected symptom data. *Lancet Digit Health*. 2021 Apr. Vol. 3(4). P.e231-e240. DOI: 10.1016/S2589-7500(21)00018-2.
- [13] **Зулкарнеев Р.Х., Юсупова Н.И., Сметанина О.Н., Гаянова М.М., Вульфун А.М.** Методы и модели извлечения знаний из медицинских документов. *Информатика и автоматизация*. 2022. № 21(6). С.1169-1210. DOI: 10.15622/ia.21.6.4.
- [14] **Грибова В.В., Переволоцкий В.С.** Разработка графов знаний на основе больших языковых моделей для поддержки принятия решений в медицине. *Программная инженерия*. 2024. Т.15, № 6. С.308-321. DOI: 10.17587/prin.15.308-321.

Сведения об авторах



Грибова Валерия Викторовна, 1965 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт по специальности «Прикладная математика» (1989). Заместитель директора по научной работе, научный руководитель лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН, д.т.н. (2008), чл.-корр. РАН (2022). Научные интересы: онтологии и БЗ, прикладные и проблемно-ориентированные системы, основанные на знаниях, управление БЗ. В списке научных трудов более 300 работ. Author ID (РИНЦ): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016; ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru.

Окунь Дмитрий Борисович, 1973 г. рождения. Окончил Владивостокский государственный медицинский университет по специальности «Лечебное дело» в 1996 году, к.м.н. (2000). Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН. Author ID (РИНЦ): 642886; Author ID (Scopus): 57204598165; Researcher ID (WoS): AAV-1824-2020; SPIN-код: 8390-2749; ORCID: 0000-0002-6300-846X; okdm@iacp.dvo.ru



Шалфеева Елена Арефьевна, 1967 г. рождения. Окончила математический факультет Дальневосточного государственного университета по специальности "Прикладная математика" в 1989 г., д.т.н. (2022). Ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН, доцент по специальности. В списке научных трудов более 120 работ. Author ID (Scopus): 6508163590; Researcher ID (WoS): Q-2609-2016; ORCID: 0000-0001-5536-2875. shalf@dvo.ru. ✉

Поступила в редакцию 9.09.2024, после рецензирования 3.10.2024. Принята к публикации 22.10.2024.



Application of knowledge graphs for clinical monitoring of the treatment process

© 2024, V.V. Gribova, D.B. Okun, E.A. Shalfeeva ✉

Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russia

Abstract

Patient condition monitoring is essential at every stage of the treatment and diagnostic process. During treatment, the key tasks of monitoring include evaluating the effectiveness of treatment strategies and ensuring safety, specifically by avoiding complications and adverse effects from medications, procedures, or their combinations. To enhance doctor-patient interactions and improve treatment quality, intelligent monitoring tools are needed. These tools must use patient data and formalized knowledge of the subject area to identify which observations, at specific times, can indicate any deviation of the patient's condition from expected outcomes. This study aims to develop an ontology that formalizes the knowledge necessary for selecting and explaining monitoring parameters throughout treatment. Key concept relationships that address the challenges of monitoring patient conditions during treatment are identified, leading to an ontological graph for a specific class of medical monitoring issues. The study describes a method for building knowledge graphs applicable to various diseases and a reasoning process to identify unexpected conditions. A process of reasoning and the resulting recommendation is presented. This approach establishes a foundation for a decision support system tailored to this class of problems, where monitoring parameters can be adapted according to treatment stage, patient condition, and individual characteristics.

Keywords: *clinical monitoring, treatment process, patient condition, ontology, knowledge graph, decision support system.*

For citation: Gribova VV, Okun DB, Shalfeeva EA. Application of knowledge graphs for clinical monitoring of the treatment process [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 504-517. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-504-517.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Advanced Medical Studies of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences No. FFW-2021-0004.

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

List of figures

- Figure 1 - Graph of concept relationships for describing disease pattern and other subject area patterns
- Figure 2 - Fragment of ontological graph for disease progression and treatment in hierarchical network form
- Figure 3 - Fragment of the concept model for describing impacts
- Figure 4 - Fragment of knowledge on required monitoring
- Figure 5 - Fragment showing results from implementing drug therapy recommendations
- Figure 6 - Fragment illustrating dynamic changes in the medical history
- Figure 7 - System output for monitoring drug contraindications

References

- [1] Clinical guidelines. Arterial hypertension in adults. https://scardio.ru/content/Guidelines/Clinic_rek_AG_2020.pdf.
- [2] **Krasnopeeveva MK.** Modern medical errors, statistics of fatal outcomes in Russia. [In Russian]. *Problems of modern science and education*. 2017; 34(116).
- [3] **Shaderkin IA.** Remote monitoring of human health and environment: possibilities and limitations [In Russian]. *Russian Journal of Telemedicine and Electronic Health*. 2022; 8(3): 45-54. DOI: 10.29188/2712-9217-2022-8-3-45-54. DOI: 10.20861/2304-2338-2017-116-004.

- [4] **Dubey A, Tiwari A.** Artificial Intelligence and Remote Patient Monitoring in US Healthcare Market: A Literature Review. *Journal of Market Access & Health Policy*. 2023; 11(1): 2205618. DOI: 10.1080/20016689.2023.2205618.
- [5] **Sirotina AS, Kobayakova OS, Deev IA, et al.** Remote monitoring of health status. Analytical review. [In Russian]. *Social aspects of population health*. 2022; 68(2): 1. DOI: 10.21045/2071-5021-2022-68-2-1
- [6] **Lu JW, Wang Y, Sun Y, et al.** Effectiveness of telemonitoring for reducing exacerbation occurrence in COPD patients with past exacerbation history: a systematic review and meta-analysis. *Front Med (Lausanne)*. 2021; 8: 720019. DOI: 10.3389/fmed.2021.720019.
- [7] **Benjamins S, Dhunnoo P, Meskó B.** The state of artificial intelligence-based FDA-approved medical devices and algorithms: an online database. *NPJ Digital Med*. 2020; 3: 118. DOI: 10.1038/s41746-020-00324-0.
- [8] **Jiang X, Yao J, You JH.** Telemonitoring versus usual care for elderly patients with heart failure discharged from the hospital in the United States: cost-effectiveness analysis. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2020; 8(7): e17846. DOI: 10.2196/17846.
- [9] **Taylor ML, Thomas EE, Snoswell CL, Smith AC, Caffery LJ.** Does remote patient monitoring reduce acute care use? A systematic review. *BMJ Open*. 2021; 11(3): e040232. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-040232.
- [10] **Ebrahimian S, Kalra MK, Agarwal S, et al.** FDA-regulated AI algorithms: trends, strengths, and gaps of validation studies. *Acad Radiol*. 2022; 29(4): 559–566. DOI: 10.1016/j.acra.2021.09.002.
- [11] **Nimri R, Battelino T, Laffel LM, et al.** Insulin dose optimization using an automated artificial intelligence-based decision support system in youths with type 1 diabetes. *Nature Med*. 2020; 26(9): 1380–1384. DOI: 10.1038/s41591-020-1045-7.
- [12] **Bone C, Simmonds-Buckley M, et al.** Dynamic prediction of psychological treatment outcomes: development and validation of a prediction model using routinely collected symptom data. *Lancet Digit Health*. 2021; 3(4): e231–e240. DOI: 10.1016/S2589-7500(21)00018-2.
- [13] **Zulkarneev RK, Yusupova NI, Smetanina ON, Gayanova MM, Vulfin AM.** Methods and models for extracting knowledge from medical documents [In Russian]. *Computer Science and Automation*. 2022; 21(6): 1169–1210. DOI: 10.15622/ia.21.6.4.
- [14] **Gribova VV, Perevolotsky VS.** Development of knowledge graphs based on large language models to support decision making in medicine [In Russian]. *Software engineering*. 2024; 15(6): 308–321. DOI: 10.17587/prin.15.308-321.

About the authors

Valeriya Viktorovna Gribova (b. 1965) graduated from the Leningrad Polytechnic Institute in 1989 with a degree in Applied Mathematics, Doctor of Technical Sciences (2008), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (2022). Deputy Director for Scientific Work, Scientific supervisor of the Laboratory of Intelligent Systems in the Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS. The scientific interests are ontologies and knowledge bases, applied and problem-oriented systems based on knowledge, and knowledge base management. There are more than 300 works in the list of scientific papers. Author ID (RSCI): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016; ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru.

Okun Dmitry Borisovich (b. 1973) graduated from Vladivostok State Medical University with a degree in General Medicine in 1996, PhD (2000). Senior Researcher at the Laboratory of Intelligent Systems at the Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Author ID (Scopus): 57204598165; Researcher ID (WoS): AAV-1824-2020; SPIN-код: 8390-2749; ORCID: 0000-0002-6300-846X; okdm@iacp.dvo.ru.

Elena Arefjevna Shalfeeva (b. 1967) graduated from the Faculty of Mathematics at Far Eastern State University with a degree in Applied Mathematics in 1989, Doctor of Technical Sciences (2022). Leading Researcher at the Laboratory of Intelligent Systems at the Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor. She is a co-author of more than 120 publications in the fields of system and program models and AI. Author ID (Scopus): 6508163590; Researcher ID (WoS): Q-2609-2016; ORCID: 0000-0001-5536-2875. shalff@dvo.ru. ✉.

Received September 9, 2024. Revised October 3, 2024. Accepted October 22, 2024.



Конструктивные алгоритмы автоматизированного решения позиционных задач

© 2024, К.Л. Панчук ✉, И.В. Крысова, Е.В. Любчинов, Т.М. Мясоедова

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), Омск, Россия

Аннотация

Изложены теоретические основы предлагаемого подхода к автоматизированному решению позиционных задач на пересечение геометрических объектов в евклидовом пространстве. Создан понятийный аппарат, основанный на понятиях и определениях, относящихся к известному в теории множеств отношению эквивалентности. Понятийный аппарат включает: отношение эквивалентности, вводимое на множестве геометрических объектов евклидова пространства; размерность и факторизацию множества объектов путём представления его как множества классов эквивалентности; проецирующее фактор-множество пространства. Приведено обоснование теоретико-множественного представления операции проецирования и разработаны на основе этого представления конструктивные алгоритмы решения позиционных задач на пересечение геометрических объектов пространства. Конструктивные алгоритмы реализованы в программной среде САПР КОМПАС-3D. Теоретические основы и анализ функционирования алгоритмов позволили определить понятия «геометрическое моделирование» и «3D-моделирование». Предлагаемый подход к автоматизированному решению позиционных задач по существу представляет собой 3D-моделирование этих решений, которое основано на создании виртуальной модели определённого решения. В работе приведены примеры автоматизированного 3D-решения позиционных задач на пересечение с описанием алгоритмов их конструктивных решений, а также примеры практического использования алгоритмов.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, позиционные задачи, отношение эквивалентности, конструктивные алгоритмы, 3D-моделирование.

Цитирование: Панчук К.Л., Крысова И.В., Любчинов Е.В., Мясоедова Т.М. Конструктивные алгоритмы автоматизированного решения позиционных задач. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.518-530. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-518-530.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Известны различные способы решения позиционных задач на взаимное пересечение линий, плоскостей и поверхностей в евклидовом пространстве E^3 . Каждый способ не является универсальным и применяется для пересекающихся геометрических объектов определённого класса и расположения [1-3]. Например, для двух поверхностей вращения с параллельными осями применяется способ секущих плоскостей, который в частных случаях может применяться и для поверхностей вращения с пересекающимися осями. Способ концентрических сфер применяется для двух поверхностей вращения с пересекающимися осями, а способ эксцентрических сфер – для поверхностей вращения и циклической.

Каждому из известных способов даётся упрощённое объяснение, основанное на представлениях о геометрической форме пересекающихся объектов и свойствах этой формы. Применяемые способы реализуются на проекционном чертеже, в т.ч. системами автоматизированного проектирования (САПР) [4-6]. Проекционная реализация сопровождается решениями дополнительных задач, например, определения видимости линии пересечения и пересекающихся поверхностей, поиска опорных точек линии пересечения и других задач. Суще-

ствующие способы выполнения проекционного чертежа при явном функциональном различии инструментов, реализующих эти способы, основаны на одних и тех же проекционных алгоритмах [7]. Без мыслительно-образного взаимодействия между выполняемыми на чертеже построениями и соответствующими им в пространстве геометрическими формами и конструкциями невозможно получить верное решение позиционных и других геометрических задач.

Целью настоящей работы является выведение конструктивных алгоритмов решений позиционных задач на автоматизированный уровень их применения в пространстве E^3 . Алгоритм конструктивного решения геометрической задачи (конструктивный алгоритм) часто используется в геометрических исследованиях и является основным инструментом решения геометрических задач на плоскости и в пространстве [8-10].

Для достижения цели работы необходимо решить две задачи.

- Разработать теорию конструктивных алгоритмов решения позиционных задач на пересечение в пространстве E^3 , в рамках которой известные способы решения этих задач получат системное обоснование с единых позиций.
- Показать возможность практической 3D-реализации предложенных конструктивных алгоритмов на основе использования отечественных САПР, в частности КОМПАС-3D.

1 Теория конструктивных алгоритмов

Между элементами α_1 и α_2 множества A в пространстве E^3 может быть установлено отношение эквивалентности Δ : $\alpha_1 \Delta \alpha_2$, если для всяких элементов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ множества A выполняются следующие условия [11, 12]:

- рефлексивность: $\alpha \Delta \alpha, \forall \alpha \in A$,
- симметричность: $\alpha_1 \Delta \alpha_2 = \alpha_2 \Delta \alpha_1, \forall (\alpha_1, \alpha_2) \in A$,
- транзитивность: $(\alpha_1 \Delta \alpha_2, \alpha_2 \Delta \alpha_3) \Rightarrow \alpha_1 \Delta \alpha_3, \forall (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \in A$.

Подмножество элементов, соответствующих элементу α в отношении эквивалентности Δ называется классом эквивалентности. Характеристическое свойство отношения эквивалентности порождает разбиение всего множества элементов на классы эквивалентности.

Пусть Δ есть отношение эквивалентности на множестве элементов A . Для каждого элемента $\alpha \in A$ его класс эквивалентности K представляет собой множество всех элементов $\beta \in A$, для которых выполняется $\alpha \Delta \beta$. Пусть $K_1 \cap K_2 = \beta$. Тогда имеет место $\alpha_1 \Delta \beta$ и $\alpha_2 \Delta \beta$, откуда следует, что $\beta \Delta \alpha_2$ (по симметричности), $\alpha_1 \Delta \alpha_2$ (по транзитивности) и $\alpha_2 \Delta \alpha_1$ (по симметричности). Поэтому для каждого β из эквивалентности $\alpha_1 \Delta \beta$ следует $\alpha_2 \Delta \beta$ и наоборот. Очевидно, что классы K_1 и K_2 совпадают. Каждый элемент $\alpha \in A$, в силу рефлексивности, принадлежит определяемому им классу эквивалентности, и всё множество элементов A может быть разбито на непересекающиеся классы.

Примерами отношения эквивалентности служат отношения подобия и конгруэнтности, параллельность в плоскости E^2 и в пространстве E^3 . Перпендикулярность не является отношением эквивалентности. Представление некоторого множества в виде непустых и попарно непересекающихся классов $\{K_i\}_{i \in I}$ называется разбиением множества. Множество классов эквивалентности называется фактор-множеством данного множества элементов по отношению эквивалентности, а операция разбиения множества на классы эквивалентности называется факторизацией.

Пусть Q^n есть множество элементов в пространстве E^n такое, что каждому элементу $\alpha \in Q^n$ соответствует набор переменных параметров $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, определяющих его положение во множестве Q^n . Если $\alpha_n = t$ (действительное число), то в Q^n выделяется некоторое подмножество Φ^{n-1} , каждый элемент которого определяется набором из $n-1$ параметров. Если для двух элементов $\alpha \in Q^n$ и $\beta \in Q^n$ с соответствующими наборами $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ и $\beta(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ выполняется условие $\alpha_n = \beta_n = t$, то оба элемента α и β принадлежат некоторому подмно-

жеству Φ^{n-1} . Введённое здесь условие инцидентности есть отношение эквивалентности $\Delta_{\square}$, а подмножество Φ^{n-1} – $(n-1)$ -мерный класс эквивалентности.

Например, в пространстве E^3 каждая точка определяется тройкой координат (x, y, z) . Если $z = t$, то в E^3 образуется плоскость, которой принадлежат все точки (x, y, t) . Если давать параметру t некоторое приращение Δt : $t + \Delta t = t_1, t_1 + \Delta t = t_2, \dots, t_{n-1} + \Delta t = t_n$, получается дискретное множество плоскостей, перпендикулярных оси z . Никакие две плоскости этого множества не пересекаются, а непрерывное объединение всех плоскостей при непрерывном изменении параметра t заполняет всё множество Q^n . Очевидно, плоскость $z = t$ есть класс эквивалентности, а всё множество таких классов представляет собой фактор-множество по отношению к E^3 .

Можно сделать следующее обобщение. При фиксировании двух параметров из набора $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ во множестве Q^n выделяется подмножество Φ^{n-2} . При непрерывном изменении значений этих двух параметров, получается непрерывное двухпараметрическое множество $(n-2)$ -мерных подмножеств, представляющих собой классы эквивалентности, попарно непересекающиеся и непрерывно заполняющие всё множество Q^n . Обобщение рассуждения приводит к выводу, что при фиксировании m параметров в наборе $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, $m < n$, исходное множество Q^n разбивается на m -параметрическое множество $(n-m)$ -мерных классов эквивалентности, в каждом из которых содержится $(n-m)$ параметрическое множество элементов из множества Q^n . Очевидно тождество $m + (n-m) = n$. Пусть $l = (n-m)$. Тогда разбиение множества Q^n на классы эквивалентности имеет вид: $\Phi^{m(l)} \subset Q^n$, $m + l = n$, где $\Phi^{m(l)}$ есть m -мерное фактор-множество, состоящее из l -мерных классов эквивалентности ϕ^l . Таким образом, можно записать в символьном виде:

$$\Phi^{m(l)} \subset Q^n, \quad \Phi^{m(l)} = \bigcup_m \phi^{(l)}, \quad m + l = n, \quad (1)$$

где $\bigcup_m \phi^{(l)}$ – это непрерывное m -параметрическое объединение l -мерных классов эквивалентности $\phi^{(l)}$. Очевидно, операция факторизации множества Q^n в общем случае не единственна.

Представление инцидентности как отношения эквивалентности позволяет перейти к представлению операции проецирования в пространстве E^n , тоже как отношения эквивалентности.

В пространстве E^n между множествами A и B могут быть установлены различные соответствия, если сопоставить элементу $\alpha \in A$ один или множество элементов $\beta \in B$ (см. рисунок 1). Сопоставление может быть выполнено конструктивно, т.е. путём соответствующих построений. Пусть пространство E^n разбито на классы эквивалентности согласно схеме на рисунке 1. Для этого образ β и прообраз α в конструктивном соответствии должны принадлежать одному классу эквивалентности ϕ^l , который называется проецирующим классом. При этом под отношением эквивалентности Δ_{ϵ} понимается инцидентность элементов α и β одному проецирующему классу ϕ^l [13]. При разбиении пространства E^n на проецирующие классы необходимо выполнение некоторых условий:

- через каждый прообраз α проходит один класс эквивалентности ϕ^l ;
- элементы-прообразы, через которые проходит множество классов ϕ^l , либо не существуют, либо образуют некоторое множество Ψ^k , $k = 0, 1, 2, \dots, k < n$, которое исключается из операции проецирования (множество Ψ^k называется центром ($k = 0$) или ядром ($k > 0$) проецирования).

Фактор-множествами пространства E^3 по отношению эквивалентности Δ_{ϵ} , представляющими собой инцидентность прообраза β и образа α одному проецирующему классу, могут быть следующие.

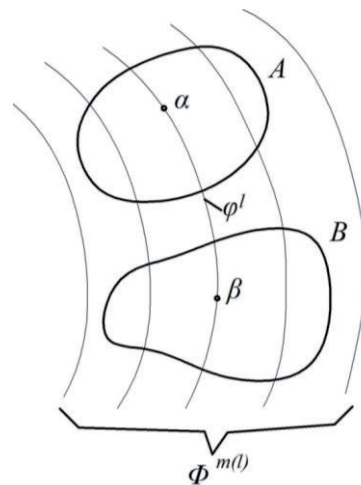


Рисунок 1 – Представление операции проецирования как отношения эквивалентности

- $E^3 \rightarrow \Phi^{2(1)}, \Phi^{2(1)} \subset E^3, \Phi^{2(1)} = \bigcup_2 \varphi^1$ – двухпараметрическое множество линий. Например, связка прямых с собственным или несобственным центром – ядром проецирования, либо конгруэнция прямых – множество прямых, пересекающих две заданные линии (фокальные линии конгруэнции).
- $E^3 \rightarrow \Phi^{1(2)}, \Phi^{1(2)} \subset E^3, \Phi^{1(2)} = \bigcup_1 \varphi^2$ – однопараметрическое множество плоскостей или поверхностей.

2 Алгоритмы конструктивного определения множества пересечения

Известно, что если два множества A^m и B^q в пространстве E^n пересекаются, то размерность p множества их пересечения определяется формулой [2]: $p = m + q - n$. В пространстве E^3 возможны следующие варианты пересечений.

- $m = q = 2, p = 1$ (линия, либо конечное число линий).
 - $m = 1, q = 2$ или $m = 2, q = 1$, следовательно, $p = 0$ (точка или конечное число точек).
- Применение для пересекающихся множеств A^2 и B^2 пространства E^3 операции разбиения на классы эквивалентности имеет вид:

$$A^2 \rightarrow \Phi^{1(1)}, \Phi^{1(1)} \subset A^2, \Phi^{1(1)} = \bigcup_1 \varphi^1; B^2 = \Psi^{1(1)}, \Psi^{1(1)} \subset B^2, \Psi^{1(1)} = \bigcup_1 \psi^1.$$

В таком случае для их множества пересечения можно записать:

$$\Phi^{1(1)} \cap \Psi^{1(1)} = (\bigcup_1 \varphi^1) \cap (\bigcup_1 \psi^1). \quad (2)$$

Если предположить, что существует множество пересечения (2), то оно будет представлять собой объединение попарных пересечений классов эквивалентности φ^1 и ψ^1 :

$\varphi^1 \cap \psi^1 = c^0 \Rightarrow (\bigcup_1 \varphi^1) \cap (\bigcup_1 \psi^1) = \bigcup_1 c^0 = C^{1(0)}$ – однопараметрическое множество точек, т.е. линия.

Из формулы размерности множества пересечения $p = m + q - n$, применённой для классов эквивалентности φ^1 и ψ^1 , получается, что при $p = 0$ и $m = q = 1$ элемент пересечения c^0 может быть получен при условии, что $n = 2$. Это значит, что классы φ^1 и ψ^1 должны принадлежать одному двумерному множеству Σ^2 , т.е. плоскости или поверхности. Таким образом:

$(\bigcup_1 \varphi^1) \cap (\bigcup_1 \psi^1) = \bigcup_1 (\varphi^1 \cap \psi^1) = \bigcup_1 c^0$, где $c^0 \in \Sigma^2$, т.к. $\varphi^1 \subset \Sigma^2, \psi^1 \subset \Sigma^2$ и $C^{1(0)} = \bigcup_1 c^0 \subset \bigcup_1 \Sigma^2 = \Phi^{1(2)} \subset E^3$, где $\Phi^{1(2)}$ – непрерывное однопараметрическое множество плоскостей (или поверхностей) представляет собой фактор-множество пространства E^3 .

Исходя из изложенного, можно предложить следующий алгоритм конструктивного определения множества пересечения $C^{1(0)} = A^2 \cap B^2$.

Алгоритм 1:

- 1) $\Phi^{1(2)} \subset E^3, \Phi^{1(2)} = \bigcup_1 \Sigma^2 \Rightarrow \{\Sigma_i^2\} = \{\Sigma_1^2, \Sigma_2^2, \dots, \Sigma_n^2\}$
- 2) $\Sigma_i^2 \cap A^2 = \varphi_i^1$
- 3) $\Sigma_i^2 \cap B^2 = \psi_i^1$
- 4) $\varphi_i^1 \cap \psi_i^1 = c_i^0$ – точка или конечное множество точек
 - $\{c_i^0\} = \{c_1^0, c_2^0, \dots, c_k^0\} \Rightarrow \bigcup_1 c^0 = C^{1(0)}$

Пункт 1 алгоритма 1 означает получение дискретного множества $\{\Sigma_i^2\}$ плоскостей или поверхностей, а запись в итоговом пункте $\{c_1^0, c_2^0, \dots, c_k^0\} \Rightarrow \bigcup_1 c^0$ означает преобразование дискретного множества точек $\{c_i^0\}$ в непрерывное множество точек $\bigcup_1 c^0 = C^{1(0)}$, т.е. в искомую линию пересечения $A^2 \cap B^2 = C^{1(0)}$ на основе интерполяции множества $\{c_i^0\}$.

Использование классов эквивалентности $\varphi^1 \subset A^2$ и $\psi^1 \subset B^2$ простейшей геометрической формы имеет важное практическое значение при построении линии пересечения поверхностей A^2 и B^2 в пространстве E^3 . Поэтому формирование фактор-множества $\Phi^{1(2)} \subset E^3$ целесообразно выполнить следующим образом.

- 1) Одно из пересекающихся множеств A^2 или B^2 представляется в виде его фактор-множества $\Phi^{1(1)}$, например: $A^2 \rightarrow \Phi^{1(1)}$, $\Phi^{1(1)} \subset A^2$, $\Phi^{1(1)} = \bigcup_1 \varphi^1$.
- 2) Полученное множество $\Phi^{1(1)}$ расширяется на всё пространство E^3 для получения фактор-множества пространства: $\bigcup_1 \varphi^1 \rightarrow \bigcup_2 \varphi^1 = \Phi^{2(1)}$, $\Phi^{2(1)} \subset E^3$.

Геометрическая схема формирования фактор-множества $\Phi^{2(1)} \subset E^3$ и последующие операции, направленные на конструктивное определение линии пересечения $A^2 \cap B^2$, могут быть представлены в виде алгоритма 2.

Алгоритм 2 (см. рисунок 2).

- 1) $A^2 \rightarrow \Phi^{1(1)}$, $\Phi^{1(1)} \subset A^2$, $\Phi^{1(1)} = \bigcup_1 \varphi^1$
- 2) $\bigcup_1 \varphi^1 \rightarrow \bigcup_2 \varphi^1 = \Phi^{2(1)}$, $\Phi^{2(1)} \subset E^3$
- 3) $B^2 \rightarrow \Psi^{1(1)}$, $\Psi^{1(1)} \subset B^2$, $\Psi^{1(1)} = \bigcup_1 \psi^1$
- 4) Вводится плоскость отображения (проекции) Π
- 5) $A^2 \rightarrow A_\Pi^1 = C_\Pi^{1(0)}$ – след проецирующей поверхности A^2 и одновременно φ -проекция искомой линии пересечения $C^{1(0)}$
- 6) $\bigcup_1 \psi^1 \rightarrow \bigcup_1 \psi_\Pi^1$
- 7) $c_\Pi^0 = A_\Pi^1 \cap \psi_\Pi^1$
- 8) $c_\Pi^0 \rightarrow C^0$, $c^0 \in \psi^1$
 - $\{c_\Pi^0\} = \{c_{\Pi 1}^0, c_{\Pi 2}^0, \dots, c_{\Pi k}^0\} \Rightarrow$ интерполяция $\bigcup_1 c_\Pi^0 = C_\Pi^{1(0)}$
 - $\{c^0\} = \{c_1^0, c_2^0, \dots, c_k^0\} \Rightarrow$ интерполяция $\bigcup_1 c^0 = C^{1(0)}$ – решение задачи

Если в условии задачи (алгоритм 2) по определению линии пересечения $A^2 \cap B^2$ заменить поверхность B^2 на линию B^1 , то получится задача нахождения пересечения $A^2 \cap B^1 = C^0$ (точка или конечное число точек). Для её решения можно использовать алгоритм 2 с заменой $B^2 \rightarrow B^1$, приводящей к некоторым сокращениям и упрощениям операторов этого алгоритма. Конструктивная интерпретация изменённого алгоритма представлена на рисунке 3.

Неоднозначность в выборе фактор-множества $\Phi^{2(1)} \subset E^3$ позволяет получать, с учётом конкретных форм пересекающихся поверхностей и линий, различные решения одной и той же позиционной задачи на пересечение. Например, решение предыдущей задачи $A^2 \cap B^1 = C^0$ может быть выполнено, если в качестве проецирующего фактор-множества $\Sigma^{2(1)} = \bigcup_2 \sigma^1$, $\Sigma^{2(1)} \subset E^3$ рассмотреть двухпараметрическое множество $\bigcup_2 \sigma^1$ линии σ^1 , а плоскость Π отображения заменить на саму поверхность A^2 . Тогда однопараметрическим множеством проецирующих линий σ^1 , образующих проецирующую поверхность $\bigcup_1 \sigma^1$ при пересечении с линией B^1 , последняя отображается в свой образ B_A^1 , и точка $C^0 = B^1 \cap B_A^1$ (или конечное множество таких точек) будет искомым решением рассматриваемой задачи (см. рисунок 4).

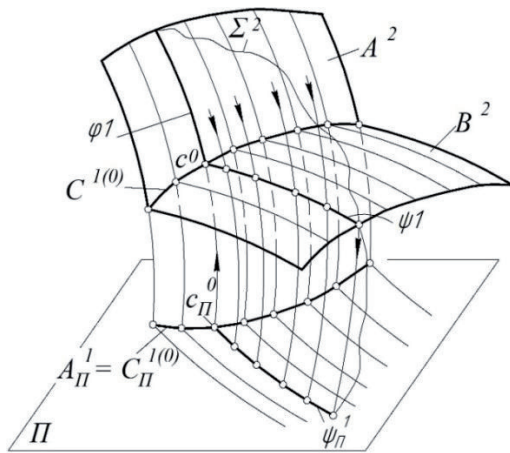


Рисунок 2 – Конструктивная интерпретация алгоритма 2

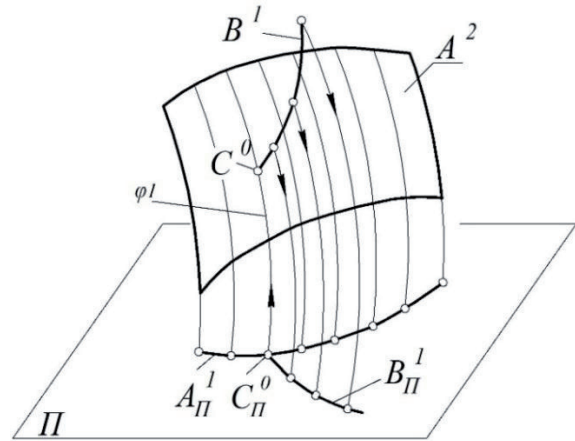


Рисунок 3 – Конструктивная интерпретация изменённого алгоритма 2

3 Реализация конструктивных алгоритмов

Реализацию автоматизированного решения позиционных задач на пересечение геометрических объектов в пространстве E^3 можно показать на примерах.

В задачах с пересекающимися объектами часто используются поверхности различных геометрических форм. Для аналитического и компьютерного моделирования поверхностей на этапе подготовки исходных данных в решении позиционных задач используются различные методы их формообразования, например, криволинейного проецирования [14].

Пример 1. В декартовой системе координат O_{xyz} задана плоскость (1, 2, 3) координатами трёх точек 1, 2 и 3 (см. рисунок 5). Задана также прямая (9,10) координатами точек 9 и 10. Требуется определить точку пересечения прямой и плоскости.

Решение задачи выполнено в САПР КОМПАС-3D, используя соответствующий функционал системы. Поэтапное решение задачи представлено в дереве построений и выполняется в следующей последовательности.

- 1) проводится ось (прямая) через точки 9 и 10 и строится плоскость (1,2,3);
- 2) в соответствии с алгоритмом, конструктивная интерпретация которого представлена на рисунке 4, задаётся направление отображения прямой (9,10) на плоскость отображения (1,2,3); направление задаётся прямой a , которая принадлежит конгруэнции параллельных прямых, представляющих собой проецирующие классы эквивалентности и образующих фактор-множество $\bigcup_2 a^1 = \Sigma^{2(1)} \subset E^3$;
- 3) прямая (9,10) отображается проецирующими классами эквивалентности в прямую (20,21) на плоскости отображения (1,2,3);
- 4) точка 22 является решением задачи: $22 = (9,10) \cap (20,21)$.

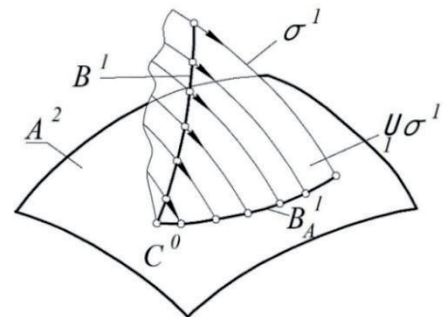


Рисунок 4 – Конструктивная интерпретация алгоритма решения задачи $A^2 \cap B^1$ на основе фактор-множества $\Sigma^{2(1)} = \bigcup_2 \sigma^1 \rightarrow \bigcup_1 \sigma^1$

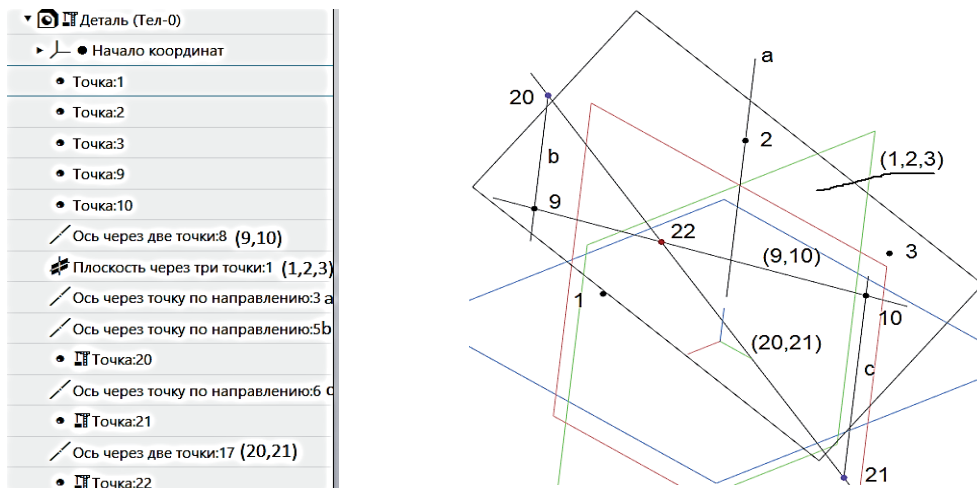


Рисунок 5 – Дерево построений (слева) и решение задачи (справа) в примере 1

Пример 2. Требуется построить линию пересечения двух поверхностей вращения с пересекающимися осями. В определитель первой поверхности вращения $Q(a,m)$ входит её ось a и полумеридиан m , позволяющие перейти к формированию поверхности (см. дерево построений на рисунке 6).

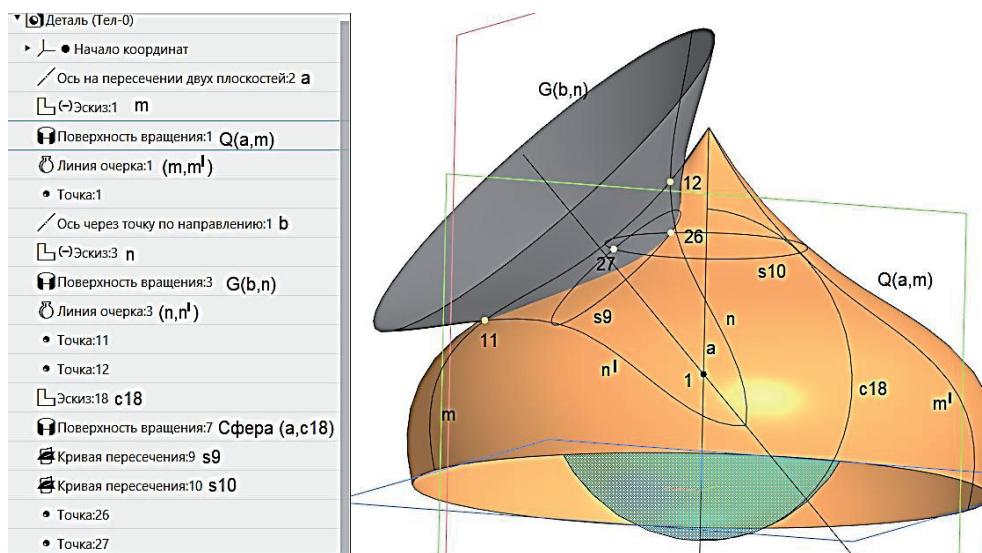


Рисунок 6 – 3D-моделирование линии пересечения поверхностей вращения (этап 1: формирование исходных данных)

Для второй поверхности вращения $G(b,n)$ её формирование выполнено вращением полумеридиана n относительно оси b . Координатной плоскости ZX принадлежат составные очерки (m,m') и (n,n') исходных поверхностей Q и G соответственно. Точки пересечения этих очерков $(m,m') \cap (n,n') = 11,12$ (две точки) служат опорными точками искомой линии пересечения исходных поверхностей. На рисунке 6 приведена сфера $(a, c18)$, построенная как поверхность вращения по оси a и полуокружности $c18$ с центром на оси a . Сфера $(a, c18)$ пересекает поверхности G и Q по окружностям $s9$ и $s10$ соответственно, общие точки 26 и 27 которых принадлежат искомой линии пересечения $Q \cap G$. На рисунке 7 в дереве построений приведена последовательность построений промежуточных точек линии пересечения и их визуализация на 3D-модели на основе использования способа секущих концентрических сфер, который соответствует алгоритму 2. Интерполяция полученного пространственного

дискретного ряда даёт искомую линию пересечения (сплайн 4 в дереве построений) исходных поверхностей вращения Q и G .

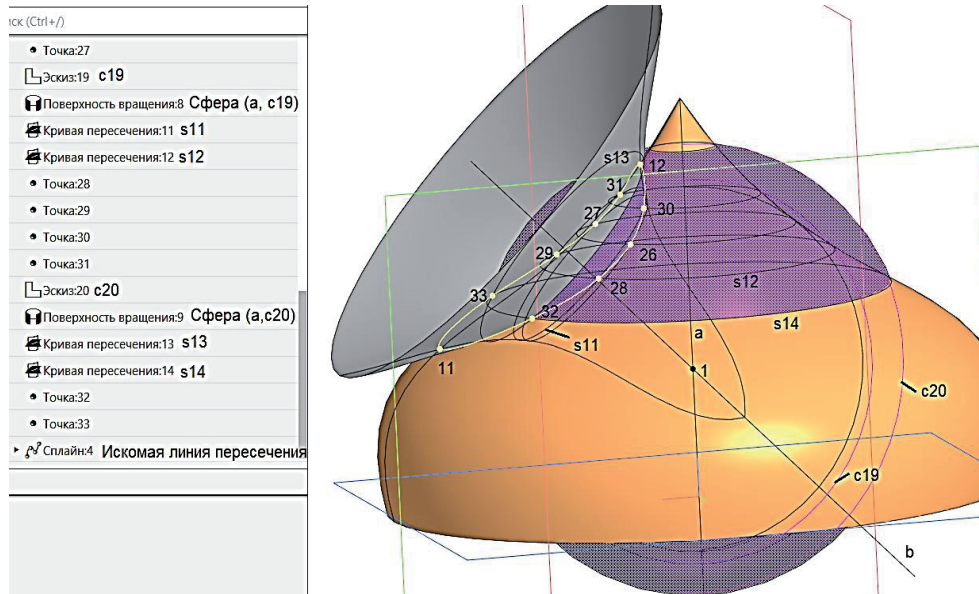


Рисунок 7 – 3D-моделирование линии пересечения поверхностей вращения (этап 2: формирование дискретного массива промежуточных точек и линии пересечения)

Пример 3. Рассматривается задача построения линии пересечения двух квадрик: цилиндрической поверхности вращения и наклонной круговой конической поверхности, у которых имеется одна общая образующая прямая a – компонента линии их пересечения (см. рисунок 8). Цилиндрическая поверхность $G(n, a)$ определена окружностью основания n , направляющей прямой a – общей образующей пересекающихся поверхностей. Коническая поверхность $Q(3, m)$ определена вершиной в точке 3 на поверхности G и круговым основанием m (см. дерево построений на рисунке 9). Для построения линии пересечения заданных поверхностей можно использовать алгоритм 2, при этом плоскостью отображения может быть общая плоскость оснований m и n заданных поверхностей, а проецирующим фактор-множеством $\Phi^{2(1)}$ пространства E^3 может быть, например, связка прямых с центром в точке 3, либо связка прямых с бесконечно удалённым центром, параллельных общей образующей a пересекающихся поверхностей G и Q . В первом варианте образом конической поверхности Q на плоскости отображения будет окружность m её основания, а образом цилиндрической поверхности G будет пучок окружностей с центрами на прямой (5,7); во втором варианте образом поверхности G на плоскости отображения будет окружность n её основания, а образом поверхности Q – пучок прямых с центром в точке 5 (см. рисунок 8). В варианте 1 построение точек искомой линии пересечения сводится к определению точек пересечения образующих прямых конической поверхности Q с цилиндрической поверхностью G . Этот вариант использован в решении рассматриваемой задачи, и его последовательность отражена в дереве построений (см. рисунок 9).

В итоге биквадратная линия пересечения заданных квадрик представляется в виде двух компонент: пространственной алгебраической кривой третьего порядка Spl и прямой линией a . (Порядок пространственной алгебраической кривой есть число точек пересечения кривой с плоскостью пространства. Построение точек пересечения образующих конической поверхности Q с цилиндрической поверхностью G может быть выполнено многократным повторением изменённого алгоритма 2).

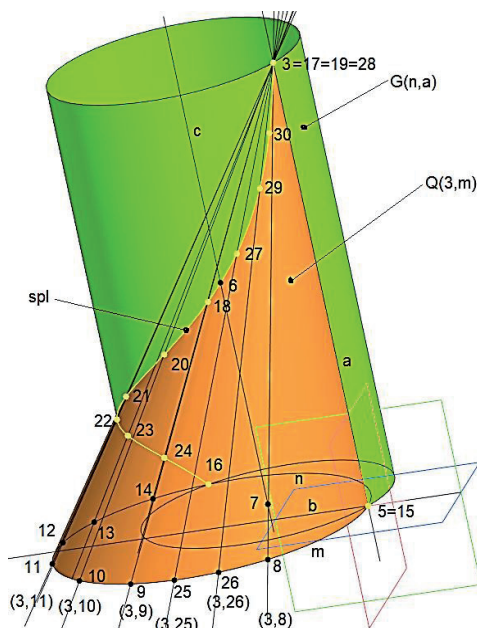


Рисунок 8 – Случай распадаения линии пересечения двух квадрик: $4=3+1$



Рисунок 9 – Дерево 3D-моделирования линии пересечения квадрик ($4=3+1$)

Теоретические основы и анализ множества выполненных автоматизированных решений позиционных задач на пересечение геометрических объектов в специализированной программной среде САПР КОМПАС-3D позволил определить понятия «геометрическое моделирование» и «3D-моделирование».

Геометрическое моделирование - это математическое моделирование геометрических объектов пространства, в частности евклидова пространства E^3 .

3D-моделирование – это процесс создания виртуального трёхмерного представления объекта по его математической модели с помощью специализированного программного обеспечения.

Предложенные конструктивные алгоритмы для решения позиционных задач могут быть использованы при проектировании и изготовлении различных изделий машиностроения. Например, при выполнении соединения деталей сварными швами (рисунок 10). Спроектированная теоретическая линия пересечения поверхностей деталей задаёт эквидистантную по отношению к ней траекторию перемещения рабочей точки электрода сварочного аппарата.

В другом случае при формировании переходной или сглаживающей поверхности для двух базовых поверхностей детали необходимо вначале определить линию пересечения этих поверхностей. Приняв её за направляющую линию переходной поверхности, сформировать саму поверхность (рисунок 11).

Предложенные алгоритмы могут быть использованы как набор дополнительных инструментов для контроля правильности и точности решений позиционных задач стандартным функционалом САПР. На рисунке 12 представлены два решения одной и той же задачи по определению линии пересечения двух поверхностей вращения в САПР КОМПАС-3D. Одно из них выполнено в соответствии с алгоритмом 2 и является теоретически верным (справа).

Линия пересечения представляет собой две пересекающиеся плоские кривые (эллипсы a и b). Другое решение (слева), выполненное при тех же исходных данных стандартным функционалом КОМПАС-3D, является ошибочным: имеются две пространственные кривые (c и d). Очевидно, технологическое формообразование детали по линии пересечения должно выполняться по варианту справа. В этом случае соединение составных поверхностей детали на

основе сварного шва будет производиться электродом сварочного аппарата по двум плоским траекториям за одну установку в отличие от варианта слева с двумя разомкнутыми пространственными траекториями.

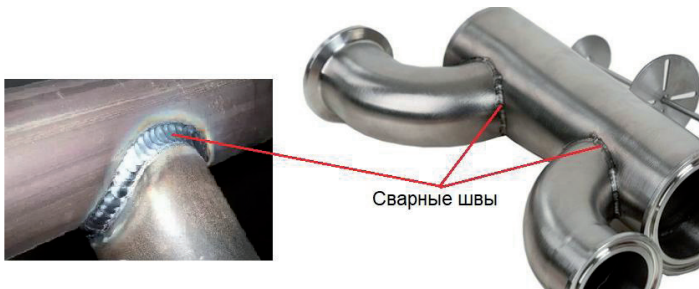


Рисунок 10 - Сварные швы, выполняемые по линии пересечения поверхностей соединяемых деталей

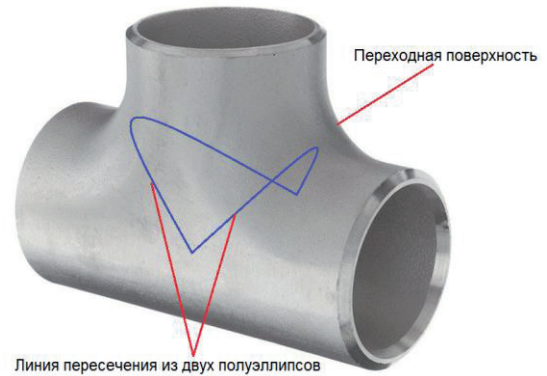


Рисунок 11 - Переходная поверхность на основе линии пересечения базовых поверхностей

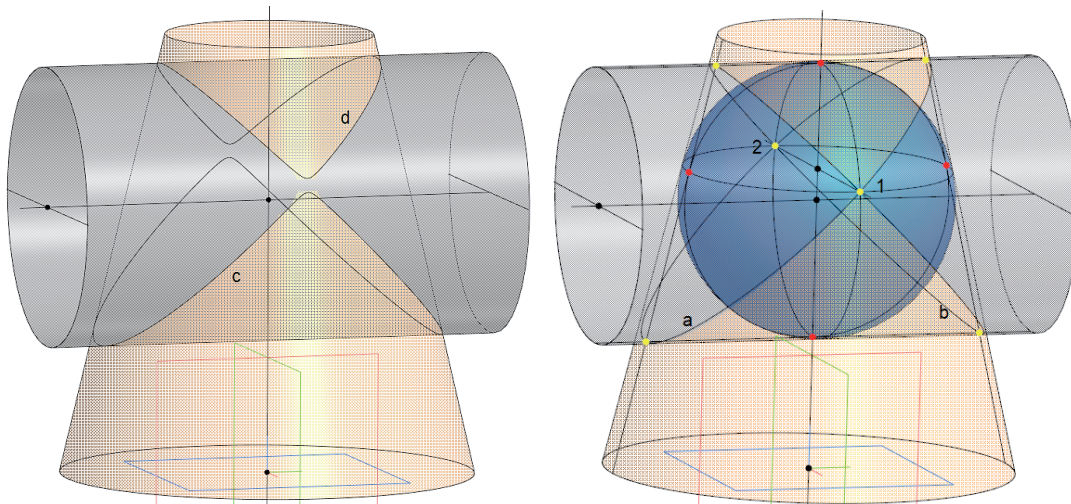


Рисунок 12 - Визуализация линии пересечения двух поверхностей вращения, построенной в САПР КОМПАС-3D: слева - с использованием стандартного функционала; справа - с использованием функционала, реализующего предложенный алгоритм 2

Заключение

Выполненное в работе теоретико-множественное обоснование способов решений позиционных задач на пересечение в пространстве E^3 позволило создать единый фундамент для разработки конструктивных алгоритмов решений указанных задач. Предложенные алгоритмы решений реализованы конструктивно в пространстве и не привязаны к известным технологиям проекционных решений позиционных задач.

Использование конструктивных алгоритмов и программных возможностей современных САПР позволило получить компьютерные решения позиционных задач на пересечение. Предложенные алгоритмы конструктивных решений могут быть рекомендованы к применению в проектной и конструкторской практике при формообразовании изделий машиностроения с учётом линий пересечения поверхностей их конструктивных элементов.

Список источников

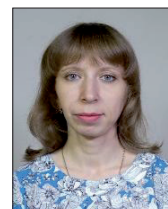
- [1] **Четверухин Н.Ф. и др.** Начертательная геометрия. М.: Высшая школа, 1963. 420 с.
- [2] **Иванов Г.С.** Теоретические основы начертательной геометрии. М.: Машиностроение, 1998. 157 с.
- [3] **Rehbock F.** Darstellende Geometrie. Berlin: Springer-Verlag, 1969.
- [4] **Харах М.М., Козлова И.А., Славин Б.М., Гусева Т.В.** Построение линии пересечения некоторых сложных поверхностей 2-го порядка в КОМПАС с помощью 2D- и 3D-технологии // *Геометрия и графика*. 2015. Т.3. №2. С.38-45. DOI: 10.12737/12167.
- [5] **Волошинов Д.В., Кожеева И.В.** Компьютерное моделирование позиционных задач. Отношения инцидентности. СПб.: СПбГТУ, 1996. 98 с.
- [6] **Талалай П.Г.** Компьютерный курс начертательной геометрии на базе КОМПАС-3D. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. 608 с.
- [7] **Ямпольский А.А.** Когнитивные проблемы освоения графических дисциплин при подготовке инженеров // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №3(53). С.335-343. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-335-343.
- [8] **Волошинов Д.В.** Единый конструктивный алгоритм построения фокусов кривых второго порядка // *Геометрия и графика*. 2018. Т.6, № 2. С.47-54. DOI: 10.12737/article_5b559c70becf44.21848537.
- [9] **Короткий В.А.** Конструктивные алгоритмы формирования составных кубических кривых Безье в пространстве и на плоскости // *Омский научный вестник*. 2022. №2(182). С.10-16. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-10-16.
- [10] **Пеклич В.А.** Высшая начертательная геометрия. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2000. 344 с.
- [11] **Вережагин Н.К., Шень А.** Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 1. Начала теории множества. М.: МЦНМО, 1999. 128 с.
- [12] **Хаггарти Р.** Дискретная математика для программистов. Москва: Техносфера, 2012. 400 с.
- [13] **Согомонян К.А.** Линейно-конструктивные методы формообразования (Геометрическое моделирование). Ереван: Изд-во АЙАСТАН, 1990. 216 с.
- [14] **Денисова Е.В., Гурьева Ю.А.** Аналитическое и компьютерное моделирование поверхностей методом криволинейного проецирования // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №2(48). С.204-216. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-204-216.

Сведения об авторах



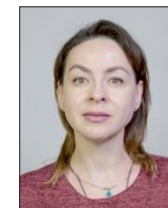
Панчук Константин Леонидович, 1948 г. рождения. Окончил Омский политехнический институт в 1971 г., д.т.н. (2009). Профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ. В списке научных трудов более 200 работ. Области научных интересов: геометрическое и компьютерное моделирование евклидова пространства и его объектов применительно к задачам формообразования изделий машиностроения и строительства. ORCID: 0000-0001-9302-8560; Author ID (РИНЦ): 501163; Author ID (Scopus): 55857766100; Researcher ID (WoS): S-2788-2017. Panchuk_KL@mail.ru. ✉.

Крысова Ирина Викторовна, 1981 г. рождения. Окончила ОмГТУ в 2003 г., к.т.н. (2006). Доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ. В списке научных трудов более 60 работ. Области научных интересов: геометрическое и компьютерное моделирование изделий машиностроения, компьютерная графика, автоматизация проектирования. ORCID: 0000-0002-2749-0594; Author ID (РИНЦ): 686834; Author ID (Scopus): 57200725554; Researcher ID (WoS): E-3902-2014. omsk11@rambler.ru.



Любчинов Евгений Владимирович, 1990 г. рождения. Окончил ОмГТУ в 2013 г., к.т.н. (2021). Доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ. В списке научных трудов более 40 работ. Области научных интересов: геометрическое и компьютерное моделирование изделий машиностроения, цифровая поддержка жизненного цикла изделий. ORCID: 0000-0003-2499-4866; Author ID (РИНЦ): 917932; Author ID (Scopus): 57199399265; Researcher ID (WoS): D-1882-2019. Lubchikov.E.V@yandex.ru.

Мясоедова Татьяна Михайловна, 1972 г. рождения. Окончила ОмГТУ в 1995 г., к.т.н. (2022). Доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ. В списке научных трудов около 40 работ. ORCID: 0000-0002-9641-9417; Author ID (РИНЦ): 686836; Author ID (Scopus): 57201776004; Researcher ID (WoS): E-7505-2014. mtm44mtm44@mail.ru.



Поступила в редакцию 17.08.2024, после рецензирования 7.10.2024. Принята к публикации 14.10.2024.



Constructive algorithms for automated solutions to positional problems

© 2024, K.L. Panchuk ✉, I.V. Krysova, E.V. Lyubchinov, T.M. Myasoedova

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract

This paper presents the theoretical foundations for an approach to automated solutions of positional problems involving intersections of geometric objects in Euclidean space. A conceptual framework is developed based on concepts and definitions related to the equivalence relation known in set theory. This framework includes: an equivalence relation defined on the set of geometric objects in Euclidean space; the dimension and factorization of the object set, represented as a collection of equivalence classes; and the projected factor set of space. A set-theoretic basis for representing the projection operation is provided, enabling the development of constructive algorithms to solve positional problems involving intersections of spatial geometric objects. These algorithms have been implemented within the KOMPAS-3D CAD environment. The theoretical foundations and analysis of the algorithm functionality establish definitions for "geometric modeling" and "3D modeling." The proposed approach to automating positional problem solutions essentially constitutes a 3D model of these solutions through the creation of a virtual model. The paper includes examples of automated 3D solutions to intersection problems, descriptions of the algorithms used in their design, and examples of practical applications of these algorithms.

Keywords: automated design, positional problems, equivalence relation, constructive algorithms, 3D modeling.

For citation: Panchuk KL, Krysova IV, Lyubchinov EV, Myasoedova TM. Constructive algorithms for automated solutions to positional problems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 518-530. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-518-530.

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

List of figures

Figure 1 - Representation of the projection operation as an equivalence relation

Figure 2 - Constructive interpretation of algorithm 2

Figure 3 - Constructive interpretation of the modified algorithm 2

Figure 4 - Constructive interpretation of the algorithm for solving the problem $A^2 \cap B^1$ based on the factor set

$$\Sigma^{2(1)} = \bigcup_2 \sigma^1 \rightarrow \bigcup_1 \sigma^1$$

Figure 5 - Tree of constructions and 3D-solution of the problem in example 1

Figure 6 - 3D-modeling of the intersection line of surfaces of revolution (stage 1: initial data formation)

Figure 7 - 3D-modeling of the intersection line of surfaces of revolution (stage 2: formation of a discrete array of intermediate points and the intersection line)

Figure 8 - Example of disintegration of the intersection line between two quadrics: $4=3+1$

Figure 9 - 3D-modeling tree of the intersection line of quadrics ($4=3+1$)

Figure 10 - Welds applied along the intersection line of the connecting surfaces of the parts

Figure 11 - Transition surface based on the intersection line of the base surfaces

Figure 12 - Visualization of the intersection line between two surfaces of revolution in KOMPAS-3D CAD: left - using standard functionality, right - using the proposed algorithm 2 functionality

References

- [1] *Chetverukhin NF. et al.* Descriptive Geometry [In Russian]. Moscow: Vysshaya shkola, 1963. 420 p.
- [2] *Ivanov GS.* Theoretical Foundations of Descriptive Geometry [In Russian]. Moscow: Mashinostroenie, 1998. 157 p.
- [3] *Rehbock F.* Darstellende Geometrie. Berlin: Springer-Verlag, 1969. 252 p.

- [4] **Kharakh MM, Kozlova IA, Slavin BM, Guseva TV.** Construction of the intersection line of some complex 2nd order surfaces in KOMPAS using 2D and 3D technology [In Russian]. *Geometry and graphics*. 2015; 3(2): 38-45. DOI: 10.12737/12167.
 - [5] **Voloshinov DV, Kozhevina IV.** Computer modeling of positional problems. Incidence relations [In Russian]. St. Petersburg: SPbGTU, 1996. 98 p.
 - [6] **Talalay PG.** Computer course of descriptive geometry based on KOMPAS-3D [In Russian]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010. 608 p.
 - [7] **Yampolsky AA.** Cognitive challenges in teaching graphic disciplines to engineering specialists [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 335-343. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-335-343.
 - [8] **Voloshinov DV.** A unified constructive algorithm for constructing foci of second-order curves [In Russian]. *Geometry and Graphics*. 2018; 6(2): 47-54. DOI: 10.12737/article_5b559c70becf44.21848537.
 - [9] **Korotkiy VA.** Constructive algorithms for forming composite cubic Bezier curves in space and on the plane [In Russian]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022; 2(182): 10-16. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-10-16.
 - [10] **Peklich VA.** Higher descriptive geometry [In Russian]. Moscow: Publishing house of Assoc. construction universities, 2000. 344 p.
 - [11] **Vereshchagin NK, Shen A.** Lectures on mathematical logic and theory of algorithms. Part 1. Principles of set theory [In Russian]. Moscow: MCNO, 1999. 128 p.
 - [12] **Haggarty R.** Discrete Mathematics for Programmers [In Russian]. 2nd edition, revised Moscow: Tekhnosfera, 2012. 400 p.
 - [13] **Sogomonian KA.** Linear-constructive methods of form-building (Geometric modeling) [In Russian]. Yerevan: Publishing house HAYASTAN, 1990. 216 p.
 - [14] **Denisova EV, Guryeva YuA.** Analytical and computer modeling of surfaces with the curvilinear projection method [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 204-216. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-204-216.
-

About the authors

Konstantin Leonidovich Panchuk (b. 1948) graduated from Omsk Polytechnic Institute (OmPI) in 1971, D. Sc. Eng. (2009). Professor of the Department of Engineering Geometry and CAD at Omsk State Technical University. The list of scientific publications includes more than 200 works. The areas of scientific interests include geometric and computer modeling of Euclidean space and its objects as applied to the problems of shaping products of mechanical engineering and construction. ORCID: 0000-0001-9302-8560; Author ID (RSCI): 501163; Author ID (Scopus): 55857766100; Researcher ID (WoS): S-2788-2017. *Panchuk_KL@mail.ru*. ✉.

Irina Viktorovna Krysova (b. 1981) graduated from OmSTU in 2003, PhD (2006). She is a Professor at the Department of Engineering Geometry and CAD of Omsk State Technical University. The list of scientific publications consists more than 60 works. The areas of scientific interests include geometric and computer modeling of mechanical engineering products, computer graphics, and computer-aided design. ORCID: 0000-0002-2749-0594; Author ID (RSCI): 686834; Author ID (Scopus): 57200725554; Researcher ID (WoS): E-3902-2014. *omsk11@rambler.ru*.

Evgeny Vladimirovich Lyubchinov (b. 1990) graduated from OmSTU in 2013, PhD (2021). He is a Professor at the Department of Engineering Geometry and CAD of Omsk State Technical University. The list of scientific publications consists more than 40 works. The areas of scientific interests include geometric and computer modeling of mechanical engineering products, computer graphics, and digital support for the product life cycle. ORCID: 0000-0003-2499-4866; Author ID (RSCI): 917932; Author ID (Scopus): 57199399265; Researcher ID (WoS): D-1882-2019. *Lubchinov.E.V@yandex.ru*.

Tatyana Mikhailovna Myasoedova (b. 1972) graduated from OmSTU in 1995, PhD (2022). She is a Professor at the Department of Engineering Geometry and CAD of Omsk State Technical University. The list of scientific publications includes about 40 works. ORCID: 0000-0002-9641-9417; Author ID (RSCI): 686836; Author ID (Scopus): 57201776004; Researcher ID (WoS): E-7505-2014. *mtm44mtm44@mail.ru*.

Received August 17, 2024. Revised October 7, 2024. Accepted October 14, 2024.



Информационно-аналитическая система детектирования движения объектов на пешеходном переходе

© 2024, М.В. Бобырь✉, Н.И. Храпова

Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), Курск, Россия

Аннотация

Для регулирования пешеходного и транспортного потоков на перекрёстках внедряются системы, которые используют модели, обеспечивающие изменение временных промежутков работы сигналов светофоров в зависимости от количества пешеходов и автомобилей, находящихся на перекрёстке. Подобные системы содержат видеокамеры, фиксирующие передвижение участников дорожного движения, что позволяет улучшить контроль и регулирование дорожного движения в режиме реального времени. В данной работе представлена информационно-аналитическая система управления транспортным и пешеходным потоками, которая основана на нейронной модели YOLO, позволяющей распознать объекты. В этой системе выполняются следующие операции: преобразование исходного изображения в градации серого; размытие изображения по Гауссу; детектирование границ объектов с помощью фильтра Канни и нечётко-логического метода детектирования контуров объектов; контурная обработка, в процессе которой каждому найденному контуру присваивается определённый номер. Нейронная сеть сопоставляет обнаруженные контуры с данными из обучающей выборки и принимается решение о том, является ли рассматриваемый объект человеком или автомобилем. Приведены результаты экспериментальных исследований описанных алгоритмов для решения задачи распознавания объектов. В экспериментах использовалось модификация ранее разработанного программного обеспечения и изображения перекрёстков с пешеходными переходами, взятые с видеокамер, установленных на улицах города Курска. По результатам экспериментов показатель точности распознавания объектов составил 72,4%.

Ключевые слова: информационно-аналитическая система, пешеходный переход, детектирование объектов, нечёткая логика, фильтр Канни, выделение контуров, нейронная модель.

Цитирование: Бобырь М.В., Храпова Н.И. Информационно-аналитическая система детектирования движения объектов на пешеходном переходе. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.531-541. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-531-541.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трёхмерных сцен по картам глубин».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Задачи идентификации объектов рассматриваются в различных предметных областях (ПрО): медицина [1], авиация [2], дистанционное зондирование Земли [3], дорожное движение [4, 5]. С целью выявления нарушений правил дорожного движения, фиксирования дорожно-транспортных происшествий, поиска автотранспортных средств или установления местоположения человека может использоваться информация о распознавании лиц участников дорожного движения [6], номерных знаков [7], а также автомобилей и пешеходов.

В данной работе рассматривается распознавание автомобилей и пешеходов с целью управления их потоками. В [8] предложена система управления светофором, которая в зависимости от количества участников движения, находящихся на пешеходном переходе, на основе нечётких правил регулирует время работы зелёных и красных сигналов светофора. Разработано специализированное программное обеспечение (СПО) «Программа для регулиро-

вания светофора на основе нечёткой логики» [9], алгоритм работы которого модифицирован в данной работе.

Существуют открытые решения типа *OpenCV* (*Open Computer Vision Library*, библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и алгоритмов общего назначения), которые позволяют решать подобные задачи. Наиболее распространённым из этих библиотек является нейронная сеть (НС) *YOLO* (от англ. *You Only Look Once*), которая способна детектировать объекты в режиме реального времени [10, 11]. Другими известными моделями машинного обучения, используемыми для детектирования объектов, являются конволюционные НС [12, 13].

Алгоритмы на основе глубоких и рекуррентных НС могут улучшить детектирование пешеходов, особенно в сложных условиях, таких как плохое освещение или интенсивное движение [14]. Методы ансамблевого обучения используются для улучшения точности детектирования путём объединения результатов нескольких моделей [15]. Комбинированные модели создаются путём соединения различных методов компьютерного зрения, с помощью которых строятся гиперплоскости в n -мерном пространстве с целью разделения объектов, относящихся к разным классам [16]. Общим недостатком данных моделей является использования фильтра Канни [17] для выделения контуров на изображении. В работе [18] показано, что данный детектор плохо реагирует на градиент изменения выпуклой и вогнутой формы.

В данной работе используется модифицированный алгоритм нечётко-логического метода выделения контуров объектов, реализованный на первом уровне двухуровневой информационно-аналитической системы управления транспортным потоком (ДИАСУТП), позволяющий детектировать участников дорожного движения с целью расчёта времени задержек сигналов светофоров на перекрёстке.

1 Методическая основа ДИАСУТП

1.1 Онтология предметной области

Онтологическая модель (ОМ) процесса управления транспортным потоком (ТП) позволяет структурировать знания при расчёте времени срабатывания управляющих сигналов светофора и обеспечивает формальное представление функциональности системы в целом. ОМ ДИАСУТП состоит из набора понятий и описания взаимоотношений между ними. Фрагмент описания ОМ представлен на рисунке 1. Для описания процесса управления ТП на пешеходном переходе используется список понятий, в котором определены атрибуты и взаимоотношения между ними (см. таблицу 1).

Структура вычислительных процессов детектирования объектов в ДИАСУТП, позволяющей распознать объекты на перекрёстке в режиме реального времени представлена на рисунке 2. Система состоит из двух уровней: детекция числа автомобилей и пешеходов; расчёт времени задержки сигналов светофора. Первый уровень содержит следующие вычислительные процессы: преобразование исходного изображения в градации серого; размытие изображения по Гауссу; детектирование границ объектов с помощью алгоритма Канни или нечётко-логического метода детектирования контуров объектов [18]; выявление необходимых объектов по выделенным признакам с помощью алгоритма *YOLO*; принятие решений об итоговом количестве автомобилей и пешеходов.

Второй уровень ДИАСУТП содержит пять этапов: определение чётких входных переменных; фаззификация значений входных переменных; выборка решений на основе нечётких правил; дефаззификация значений; определение времени задержки сигналов светофора. Подробно данный уровень описан в работах [8, 9].

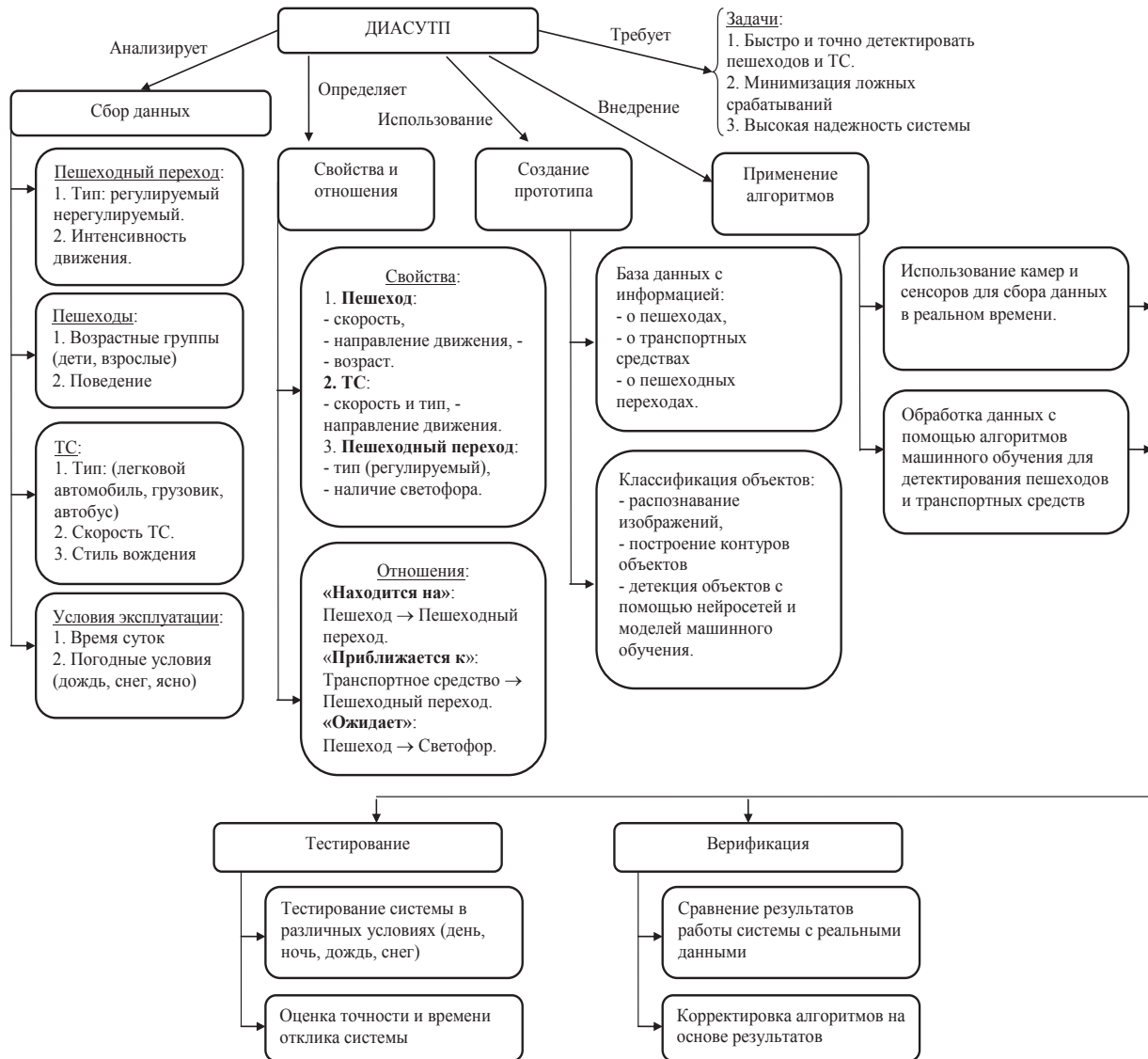


Рисунок 1 – Фрагмент онтологии управления транспортным потоком (ТС – транспортное средство)

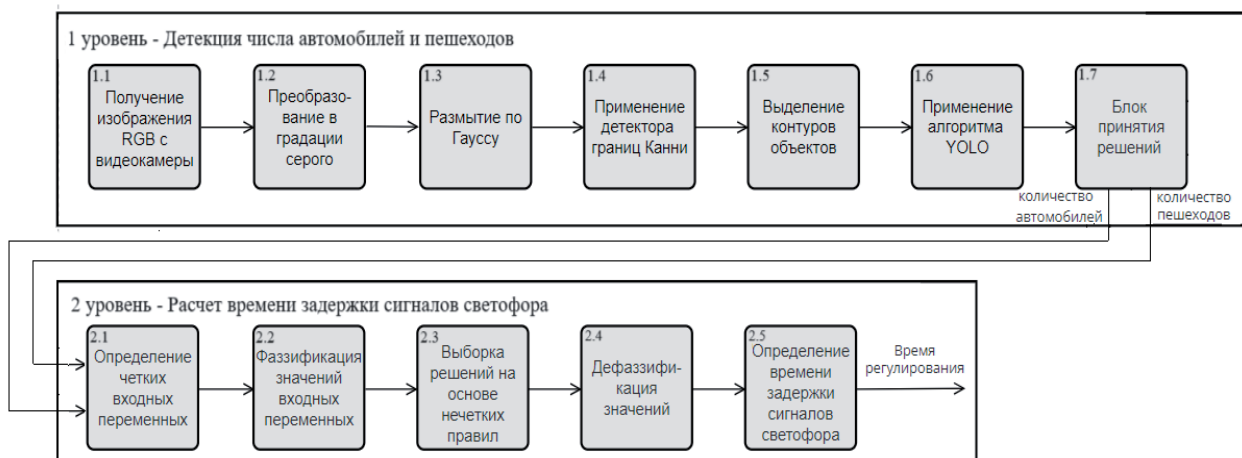


Рисунок 2 – Структура вычислительных процессов в двухуровневой информационно-аналитической системе управления транспортным потоком

Таблица 1 – Фрагмент спецификации понятий онтологической модели управления транспортным потоком

Понятия	Атрибуты	Отношения с атрибутами
Сбор данных	Данные о пешеходном переходе, поведение транспорта и пешеходов, вид дорожных условий	ДИАСУТП
Свойства и отношения	Детектирование объектов на пешеходном переходе и определение данных о их перемещении	ДИАСУТП
Создание прототипа	База данных и классификация объектов на основе машинного обучения и нейронных сетей	ДИАСУТП
Применение алгоритмов	Использование специализированных устройств для анализа данных на пешеходном переходе, применение нейронных сетей для классификации объектов на пешеходном переходе	ДИАСУТП
Тестирование	Анализ данных о работе ДИАСУТП	Применение алгоритмов
Верификация	Оценка точности работы ДИАСУТП	Применение алгоритмов
Пешеход	Скорость, направление движения, возраст	Свойства и отношения
Транспорт	Скорость, тип, направление движения	Свойства и отношения
Пешеходный переход	Тип, расположение	Свойства и отношения
Направление движения	Находится на..., приближается к...	Свойства и отношения

1.2 Преобразование в градации серого цвета

На начальном этапе работы ДИАСУТП происходит получение исходного изображения, полученного с видеокамеры. На втором этапе осуществляется преобразование исходного изображения в формате *RGB* в градации серого. Для этой цели требуется рассчитать значения интенсивности каждого отдельного пикселя, используя формулу [19]:

$$I_{x,y} = 0,299R_{x,y} + 0,587G_{x,y} + 0,114B_{x,y},$$

где $I_{x,y}$ – интенсивность яркости градации серого в пикселе ($I_{x,y} \in [0, 255]$) на изображении с координатами вдоль оси абсцисс ($x=1 \dots w$) и вдоль оси ординат ($y=1 \dots h$); w – ширина изображения в пикселях; h – высота изображения в пикселях; R – значение интенсивности красного цвета в пикселе; G – значение интенсивности зелёного цвета в пикселе; B – значение интенсивности синего цвета в пикселе.

Преобразованное изображение подаётся на третий блок 1.3 первого уровня ДИАСУТП (рисунок 2), где происходит размытие по Гауссу.

1.3 Размытие изображения по Гауссу

Третий этап работы ДИАСУТП позволяет уменьшить влияние шума на изображение. Сглаживание полутонового изображения происходит с помощью поэлементного умножения матриц $I_{x,y}$ и Гаусса с размером окна 5×5 .

1.4 Детекторы границ объектов

1.4.1 Детектор Канни

Алгоритм Канни используется для обнаружения границ искоемых объектов на изображении [17]. Недостаток алгоритма Канни заключается в том, что он распознаёт только линейные области изображения. Это связано с тем, что в данном методе анализируется рамка на изображении с размером окна 3×3 . Поэтому целесообразно использовать нечётко-логический метод детектирования границ объектов [18], который позволяет распознавать вогнуто-выпуклую форму объектов благодаря анализу рамки в окне с размером 5×5 .

1.4.2 Нечётко-логический метод детектирования границ объектов

Нечётко-логический метод основан на модификации детектора Канни и использовании нечётких правил для определения градиента границ. Вычисления, соответствующие алгоритму Канни, повторяются до этапа определения угла направления градиента яркости. Далее осуществляется фазификация входных переменных, которыми являются разности градиентов между центральной и смежными ячейками, и формирование базы нечётких правил [20]. Сформированная база состоит из четырёх или шестнадцати нечётких правил в зависимости от выбранной модификации рассматриваемого метода. Дефазификация чёткого значения выполняется при помощи метода центра тяжести. С помощью нечётких α -срезов производится бинаризация полученного изображения и выделение границ объектов на нём. В отличие от детектора Канни данный метод реагирует на различные изменения градиента относительно центральной ячейки, что позволяет распознавать вогнутые и выпуклые формы объектов. Использование описанного метода позволяет повысить производительность вычислительных операций во время распознавания границ объектов посредством сокращения числа проходов по исходному изображению.

В процессе обработки изображений после операции детектирования границ осуществляется распознавание контуров. Изображения контуров подаются на вход НС. Для выделения контуров используется алгоритм *Suzuki-Abe* [21].

1.5 Алгоритм YOLO

Назначение алгоритма *YOLO* – распознать класс объекта и выделить его ограничивающей рамкой на финальном изображении. По завершении работы алгоритма выходное изображение содержит объекты, выделенные рамкой.

Ограничением точности предлагаемого метода является ухудшение погодных условий, например, возникновение тумана или метели, во время которых видеокамеры не могут передать качественное изображение из-за изменения интенсивности света. В таких случаях могут возникать погрешности распознавания объектов.

1.6 Циклограмма формирования управляющего сигнала

Циклограмма работы для двух светофоров включает четыре режима регулирования, два из которых являются основными и два промежуточными. В первом режиме предполагается, что на Светофоре_1 включается красный свет, а на Светофоре_2 – зелёный свет. Второй режим является промежуточным перед сменой сигналов устройства. При этом к лампам, горящим в режиме 1, добавляется лампа с мигающим жёлтым светом. Происходит пять коротких включений сигнала жёлтого света, после чего устройства переходят в третий режим, который полностью противоположен первому. В четвёртом режиме происходит переход на режим 1, после чего цикл повторяется. Циклограмма работы двух светофоров сведена в таблицу 2.

Расчёт времени работы первого и третьего режимов светофоров осуществляется по формуле: $t_{pez} = t_{min} + t_{delay}$, где t_{min} – минимальное время задержки управляющего сигнала светофора; t_{delay} – время задержки управляющего сигнала. Переменная t_{delay} определяется на выходе второго уровня ДИАСУТП, детальный расчёт представлен в работах [8, 9]. Переменная t_{min} является настраиваемым параметром (по умолчанию $t_{min} = 10$ с) и используется для работы светофора в ситуации, когда время задержки t_{delay} равно нулю. Время полного цикла работы светофора, состоящего из четырёх режимов, определяется по формуле: $t_u = t_{pez} + t_{yellow} + t_{pez} + t_{yellow} = 2(t_{pez} + t_{yellow})$, где t_{yellow} – время задержки жёлтого сигнала светофора (настраиваемый параметр, по умолчанию $t_{yellow} = 2$ с).

Таблица 2 – Циклограмма работы светофоров

Светофор		Светофор_1			Светофор_2		
Режим	Цвет лампы	красный	жёлтый	зелёный	зелёный	жёлтый	красный
1		1	0	0	1	0	0
	Время свечения	$t_{pez} = t_{min} + t_{delay}$					
2		1	1/0 10 тактов	0	1	1/0 10 тактов	0
	Время мигания	t_{yellow} (10 тактов мигания за 2 с)					
3		0	0	1	0	0	1
	Время свечения	$t_{pez} = t_{min} + t_{delay}$					
4		0	1/0 10 тактов	1	0	1/0 10 тактов	1
	Время мигания	t_{yellow} (10 тактов мигания за 2 с)					

2 Экспериментальные исследования

По представленному алгоритму создано модифицированное СПО на языке C# в среде *Microsoft Visual Studio 2022*. На вход СПО подаются изображения с видеокамер, выходными данными являются обработанные изображения, на которых детектируемый объект выделен рамкой. Для экспериментальных исследований были взяты изображения с видеокамер, установленных на перекрёстках города Курска (пересечение ул. Карла Маркса и ул. Хуторской (см. рисунок 3), площадь Перекальского (см. рисунок 4).



Рисунок 3 – Результаты первого экспериментального исследования:

- а) исходное изображение; б) преобразованное в градации серого и размытое по Гауссу изображение;
в) детектированные границы объектов; г) результирующее изображение с распознанными объектами (выделены рамками)

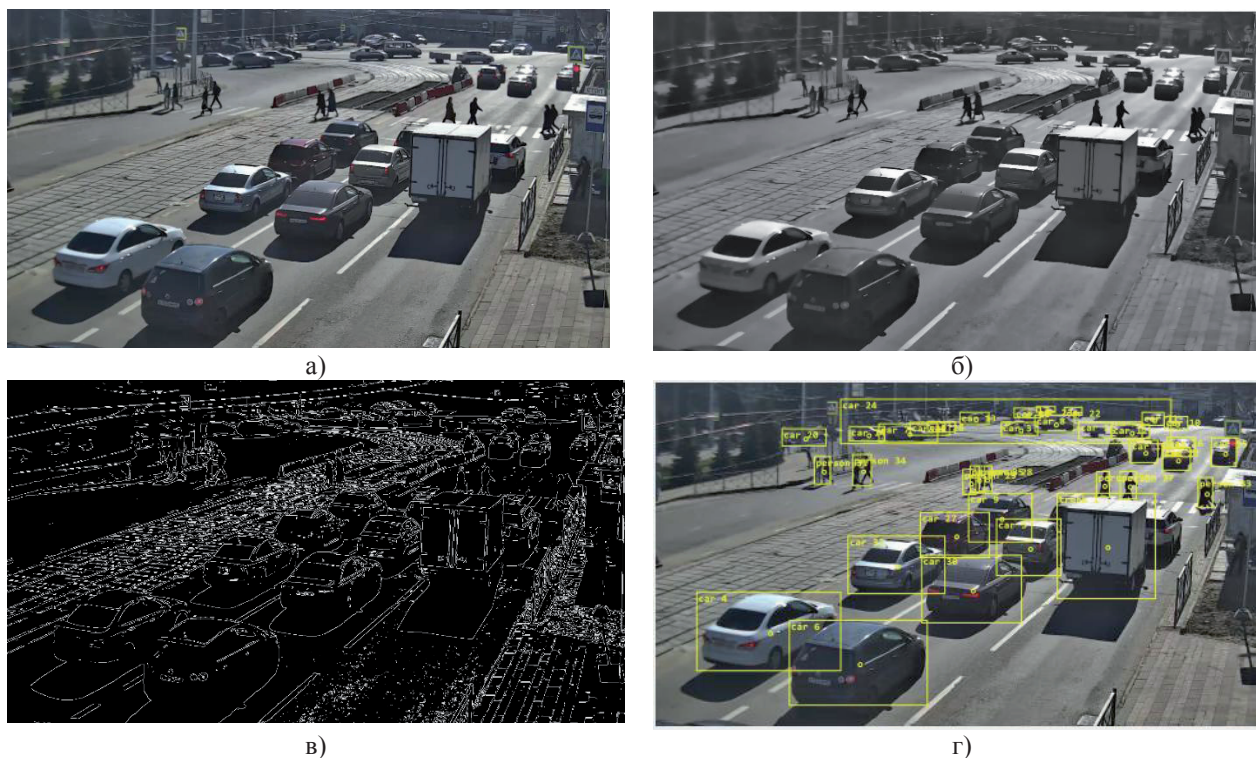


Рисунок 4 – Результаты второго экспериментального исследования:

- а) исходное изображение; б) преобразованное в градации серого и размытое по Гауссу изображение;
в) детектированные границы объектов; г) результирующее изображение с распознанными объектами
(выделены рамками)

Экспериментальные исследования показали хорошие результаты работы ДИАУСТП, что видно на результирующих изображениях, на которых обнаруженные объекты выделены рамкой. Однако выявлены некоторые погрешности распознавания, например, при частичной видимости объекта НС *YOLO* не распознаёт его наличие. В этих случаях распознавание осуществлялось визуально. Для этого каждый кадр из видеопоследовательности, на котором рамками были выделены распознанные объекты, сохранялся в базе данных и оценивался вручную. В ходе этого эксперимента на каждом кадре визуально оценивалось количество правильно и неправильно распознанных объектов, а также оценивалось, пропущен объект или нет. Результаты экспериментов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

Эксперимент	Объекты	Всего	Кол-во верно обнаруженных объектов, <i>TP</i>	Кол-во ложно обнаруженных объектов, <i>FP</i>	Кол-во пропущенных объектов, <i>FN</i>
1	Пешеходы	3	2	0	1
	Автомобили	4	4	1	0
2	Пешеходы	10	7	1	3
	Автомобили	10	8	0	2
Итого		27	21	2	6

Точность распознавания объектов на изображениях в экспериментах вычисляется по формуле

$$N = \frac{TP}{TP + FP + FN} \times 100\%,$$

где *TP* – количество верно обнаруженных объектов; *FP* – количество ложно обнаруженных объектов; *FN* – количество пропущенных объектов.

Согласно значениям из таблицы 3 точность составляет 72,4%.

Заключение

В данной работе представлена ДИАСУТП, позволяющая распознавать автомобили и пешеходов на перекрёстке в режиме реального времени для решения задачи регулирования городского потока. Для экспериментальных исследований использовалось модифицированное СПО и изображения перекрёстков с пешеходными переходами, взятые с видеокамер, установленных на улицах города Курска. Результаты экспериментов показали работоспособность предложенного алгоритма детектирования объектов.

Список источников

- [1] **Сойникова Е.С., Батищев Д.С., Михелев В.М.** О распознавании форменных объектов крови на основе медицинских изображений. *Научный результат. Информационные технологии*. 2018. Т.3, №3. С.54-65. DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-3-0-7.
- [2] **Яковлев Е.Л.** Модель оценивания вычислительной сложности интеллектуального распознавания объектов на изображениях на борту беспилотных летательных аппаратов // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2018. № 3(15). С. 27-32.
- [3] **Шошина К.В., Алешко Р.А., Березовский В.В., Васендина И.С., Шошин А.С., Гурьев А.Т.** Тематическое дешифрирование аэроснимков лесных территорий на основе концептуального моделирования. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, № 3(49). С.437-454. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-437-454.
- [4] **Морев К.И., Целых А.Н.** Система анализа автомобильного трафика на объекте (в логистике), основанная на распознавании изображения с камеры видеонаблюдения. *Альманах современной науки и образования*. 2017. № 2(116). С.93-96.
- [5] **Копейкин Р.Е., Глазков В.В., Пашева Т.А.** Сравнительная характеристика методов распознавания изображения для задачи распознавания дорожных знаков. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. №3. С.63-67.
- [6] **Колоденкова А.Е.** Онтология идентификации человека по движениям тела и лицу в видеонаблюдениях. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, № 1(47). С.55-74. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-55-74.
- [7] **Убоженко Н.В.** Анализ эффективности методов распознавания символов в рамках задачи распознавания номерного знака автотранспорта. *Перспективы развития информационных технологий*. 2013. №12. С.41-45.
- [8] **Бобырь М.В., Храпова Н.И., Ламонов М.А.** Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021. Т.25, №4. С.162-176. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176.
- [9] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661796. **М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, Н.И. Храпова** [и др.] Заявка № 2021660730. Дата поступления 08.07.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.07.2021.
- [10] **Астапова М.А., Уздяев М.Ю.** Детектирование дефектов неисправных элементов линий электропередач при помощи нейронных сетей семейства YOLO. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021. Т.9, № 4(35), 16 с. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.035.
- [11] **Никитин Д.В., Тараненко И.С., Катаев А.В.** Детектирование дорожных знаков на основе нейросетевой модели YOLO. *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 7(103). С.91-99.
- [12] **Чуйков Р.Ю., Юдин Д.А.** Обнаружение транспортных средств на изображениях загородных шоссе на основе метода Single shot multibox Detector. *Научный результат. Информационные технологии*. 2017. Т.2, № 4. С.50-58. DOI: 10.18413/2518-1092-2017-2-4-50-58.
- [13] **Яскеляйнен Я.С., Хакимов А.А., Мутанна М.С.А., Мутханна А.С.А., Киричёк Р.В.** Разработка системы распознавания пешеходов в режиме реального времени для ее применения в концепции умного города. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2018. Т.6, №3. С.123-136.
- [14] **Лысанов М.К., Сай С.В.** Распознавание объектов дорожного движения с помощью глубокой нейронной сети. *Информационные технологии XXI века*. 2019. С.263-268.
- [15] **Hossain A., Sun X., Das S., Jafari M., Codjoe J.** Investigating older driver crashes on high-speed roadway segments: a hybrid approach with extreme gradient boosting and random parameter model. *Transportmetrica A Transport Science*, 2024. DOI: 10.1080/23249935.2024.2362362.

- [16] **Бобырь М.В., Милостная Н.А., Храпова Н.И.** О подходе к детектированию движения пешеходов методом гистограмм направленных градиентов. *Электронные библиотеки*. 2024. Т.27, №4. С.429-447. DOI: 10.26907/1562-5419-2024-27-4-429-447.
- [17] **Canny J.A.** computational approach to edge detection. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1986, № 8(6). P.679–698. DOI:10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [18] **Бобырь М.В., Архипов А.Е., Горбачев С.В., Цао Ц., Бхаттачарья С.Б.** Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов. *Информатика и автоматизация*. 2022. Т.21, №2. С.376-404. DOI: 10.15622/ia.21.2.6.
- [19] **Sala Filip A.** Design of false color palettes for grayscale reproduction. *Displays*, 2017. №46. P.9–15.
- [20] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Фаворская Е.А., Осипова Е.А.** Подход к оценке технического состояния электрооборудования с использованием взвешенных нечётких правил. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [21] **Suzuki S., Keiichi A.** Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Comput. Vis. Graph. Image Process*, 1985, Vol.30. P.32-46.

Сведения об авторах



Бобырь Максим Владимирович, 1978 г. рождения. Окончил Курский государственный технический университет (КГТУ) в 2000 г., к.т.н. (2003 г.). Д.т.н., профессор кафедры программной инженерии ЮЗГУ. Председатель первого в России диссертационного совета ЮЗГУ по специальности «Когнитивное моделирование» (технические науки). В списке научных трудов более 450 работ в области систем управления сложными объектами на основе интеллектуальных систем технического зрения. Author ID (РИНЦ): 276211; Author ID (Scopus): 57191724301; Researcher ID (WoS): G-2604-2013; ORCID: 0000-0002-5400-6817. fregat_mn@rambler.ru ✉.



Храпова Наталия Игоревна, 1998 г. рождения. Аспирант кафедры программной инженерии ЮЗГУ. Победитель Всероссийских и региональных соревнований в сфере информационных технологий. В списке научных трудов около 30 работ. Author ID (РИНЦ): 1148965; Researcher ID (WoS): KFT-1075-2024; ORCID: 0000-0001-7947-1427. KhrapovaNI@yandex.ru.

Поступила в редакцию 27.06.2024, после рецензирования 20.09.2024. Принята к публикации 22.10.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-531-541

Information and analytical system for detecting the movement of objects on a pedestrian crossing

© 2024, M.V. Bobyr ✉, N.I. Khrapova

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract

To manage pedestrian and vehicle flows at intersections, systems are implemented that use adaptive traffic light models, adjusting time intervals based on the volume of pedestrians and vehicles. These systems include video cameras that monitor road user movements, enhancing real-time traffic control. This paper introduces an information and analytical system for managing transport and pedestrian flows using the YOLO neural model, which enables object recognition. The system performs several operations: converting the original image to gray scale, applying Gaussian blurring, detecting object boundaries through the Canny filter and fuzzy logic for edge detection, and contour processing, where each identified contour is assigned a unique number. The neural network then compares detected contours to the training sample data, determining whether the object is a person or a vehicle. The paper presents experimental results for these algorithms in object recognition. Modified software and images of intersections with pedestrian crossings captured from

street video cameras in Kursk were used in the experiments. The recognition accuracy rate from the experiments was 72.4%.

Keywords: *information and analytical system, pedestrian crossing, object detection, fuzzy logic, boundary detection, Canny boundary detector, contour detection, neural model.*

For citation: *Bobyry MV, Khrapova NI. Information and analytical system for detecting the movement of objects on a pedestrian crossing [In Russian]. Ontology of designing. 2024; 14(4): 531-541. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-531-541.*

Financial Support: The work was supported by the Russian National Science Foundation grant 23-21-00071 – "Development of a computer vision model for intelligent robotic navigation through the construction of three-dimensional scenes using depth maps."

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

List of figures and tables

Figure 1 – Fragment of the traffic flow control ontology

Figure 2 – The structure of computational processes in a two-level information and analytical system for traffic flow management

Figure 3 – The results of the first experimental study: a) the original image; b) the image converted to grayscale and Gaussian blurring of the image; c) detecting objects edges; d) the resulting image with recognized objects which are highlighted with frames.

Figure 4 – Results of the second experimental study: a) the original image; b) the image converted to grayscale and Gaussian blurring of the image; c) detecting objects edges; d) the resulting image with recognized objects which are highlighted with frames.

Table 1 – Specification of concepts in the ontological model for traffic flow management

Table 2 – Traffic light operation cyclogram

Table 3 – Results of experimental studies

References

- [1] **Soynikova ES, Batishchev DS, Mikhelev VM.** On the recognition of shaped blood objects based on medical images [In Russian]. *Scientific result. Information technology.* 2018; 3: 54-65. DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-3-0-7.
- [2] **Yakovlev EL.** A model for estimating the computational complexity of intelligent object recognition in images on board unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Intelligent technologies in transport.* 2018; 3(15): 27-32.
- [3] **Shoshina KV, Aleshko RA, Berezovsky VV., Vasendina IS., Shoshin AS., Guryev AT.** Thematic interpretation of aerial photographs of forest areas based on conceptual modeling [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 3(49): 437-454. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-437-454.
- [4] **Morev KI, Tselykh AN.** A system for analyzing car traffic at an object (in logistics) based on image recognition from a video surveillance camera [In Russian]. *Almanac of Modern Science and Education.* 2017; 2(116): 93-96.
- [5] **Kopeikin RE, Glazkov VV, Pasheva TA.** Comparative characteristics of image recognition methods for the task of recognizing road signs [In Russian]. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region.* 2023; 3: 63-67.
- [6] **Kolodenkova AE.** Ontology of human identification by body movements and face in video surveillance [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 1(47): 55-74. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-55-74.
- [7] **Ubozhenko NV.** Analysis of the effectiveness of character recognition methods within the framework of the task of recognizing a vehicle license plate [In Russian]. *Prospects for the development of information technology.* 2013; 12: 41-45.
- [8] **Bobyry MV, Khrapova NI, Lamonov MA.** Intelligent traffic light control system based on fuzzy logic [In Russian]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.* 2021; 4: 162-176. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176.
- [9] Certificate of state registration of a computer program No. 2021661796 [In Russian]. **Bobyry MV, Milostnaya NA, Khrapova NI.** [et al.]. Application No. 2021660730. Date of receipt 08.07.2021. It was registered in the Register of Computer Programs on 07.15.2021.
- [10] **Astapova MA, Uzdyayev MY.** Detection of defects in faulty elements of power lines using neural networks of the YOLO family [In Russian]. *Modeling, optimization and information technology.* 2021; 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.035.

- [11] **Nikitin DV, Taranenko IS, Kataev AV.** Detection of road signs based on the YOLO neural network model [In Russian]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023; 7(103): 91-99.
- [12] **Chuikov RY, Yudin DA.** Detection of vehicles on images of suburban highways based on the Single shot multibox Detector method [In Russian]. *Scientific result. Information technology*. 2017; 2(4): 50-58. DOI: 10.18413/2518-1092-2017-2-4-50-58.
- [13] **Yaskelainen YS, Khakimov AA, Muthanna MSA, Muthanna ASA, Kirichek RV.** Development of a pedestrian recognition system in real time for its application in the concept of a smart city [In Russian]. *Information technologies and telecommunications*. 2018; 6(3): 123-136.
- [14] **Lysanov MK, Sai SV.** Recognition of traffic objects using a deep neural network [In Russian]. *Information technologies of the XXI century*. 2019. P. 263-268.
- [15] **Hossain A, Sun X, Das S, Jafari M, Codjoe J.** Investigating older driver crashes on high-speed roadway segments: a hybrid approach with extreme gradient boosting and random parameter model. *Transportmetrica A Transport Science*, 2024. DOI: 10.1080/23249935.2024.2362362.
- [16] **Bobyry MV, Milostnaya NA, Khrapova NI.** On the approach to detecting pedestrian movement using the method of histograms of directed gradients [In Russian]. *Electronic libraries*. 2024; 27(4): 429-447. DOI: 10.26907/1562-5419-2024-27-4-429-447.
- [17] **Canny JA.** computational approach to edge detection. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1986, № 8(6), p. 679–98. DOI:10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [18] **Bobyry MV, Arkhipov AE, Gorbachev SV, Cao Ts Bhattacharya SB.** Fuzzy logic methods in the problem of detecting object boundaries [In Russian]. *Informatics and Automation*. 2022; 21(2): 376-404. DOI: 10.15622/ia.21.2.6.
- [19] **Sala FA.** Design of false color palettes for grayscale reproduction. *Displays*, 2017; 46: 9-15.
- [20] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS, Favorskaya EA, Osipova EA.** An approach to assessing the technical condition of electrical equipment using weighted fuzzy rules [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 1(51): 134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [21] **Suzuki S, Keiichi A.** Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Comput. Vis. Graph. Image Process*. 1985; 30: 32-46.

About the authors

Maxim Vladimirovich Bobyr (b. 1978) graduated from Kursk State Technical University (KSTU) in 2000, Ph.D. (2003). Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Software Engineering at Southwestern State University. Chairman of the first dissertation Council of Southwestern State University in Russia in the specialty "Cognitive modeling" (technical sciences). The list of scientific papers includes more than 450 works in the field of control systems for complex objects based on intelligent vision systems. Author ID (RSCI): 276211; Author ID (Scopus): 57191724301; Researcher ID (WoS): G-2604-2013; ORCID: 0000-0002-5400-6817. fregat_mn@rambler.ru. ✉

Natalia Igorevna Khrapova (b. 1998) is a postgraduate student of the Department of Software Engineering at Southwestern State University. The winner of the All-Russian and regional competitions in the field of information technology. There are about 30 works in the list of scientific papers. Author ID (RSCI): 1148965; Researcher ID (WoS): KFT-1075-2024; ORCID: 0000-0001-7947-1427. KhrapovaNI@yandex.ru.

Received June 27, 2024. Revised September 20, 2024. Accepted October 22, 2024.



Электронный корпус татарского языка на базе модели лингвистических графов знаний

© 2024, А.Р. Гатиатуллин✉, Д.Р. Мухамедшин, Н.А. Прокопьев,
Д.Ш. Сулейманов

Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладной семиотики, Казань, Россия

Аннотация

В статье представлена новая версия электронного корпуса татарского языка, модернизированная на основе модели лингвистического графа знаний тюркских языков. Новая версия корпуса позволяет описать информацию на разных лингвистических уровнях: морфонологическом, синтаксическом и семантическом благодаря представлению лингвистической информации в виде графов знаний. Такой способ представления повышает функциональные возможности работы с корпусом, позволяет производить поиск по запросам, содержащим синтаксическую и семантическую информацию. Особенность реализации электронного корпуса заключается в том, что использованная модель в наибольшей степени соответствует структурно-функциональным особенностям тюркских языков и используется в качестве основы для создания ряда программных продуктов, связанных с семантической обработкой текста на тюркских языках. В частности, к таким продуктам относятся лингвистический портал «Тюркская морфема» и новая версия электронного корпуса татарского языка «Туган тел».

Ключевые слова: электронный корпус, граф знаний, система управления базами данных, лингвистическая единица, тюркские языки.

Цитирование: Гатиатуллин А.Р., Мухамедшин Д.Р., Прокопьев Н.А., Сулейманов Д.Ш. Электронный корпус татарского языка на базе модели лингвистических графов знаний. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14 №4(54). С. 542-554. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-542-554.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современные технологии искусственного интеллекта, основанные на использовании больших языковых моделей, испытывают потребность в увеличении их информационных ресурсов за счёт включения различных электронных корпусов (ЭК). Это стало фактором усиления активности разработок ЭК для тюркских языков (ТЯ) [1-4]. В таблице 1 приведён список ЭК, проанализированных в ходе модернизации ЭК татарского языка «Туган тел». ЭК двух ТЯ включены в состав лингвистической платформы Национальный корпус русского языка (<https://ruscorpora.ru/>): башкирский национальный корпус объёмом 550 тыс. словоупотреблений и хакасский ЭК объёмом 1194 тыс. словоупотреблений. Большой набор ЭК собран на лингвистической платформе *Sketch Engine*, в числе которых есть тюркские ЭК (см. таблицу 2). Наибольшее количество ЭК разработано для турецкого языка, которые имеют синтаксическую или семантическую разметки: <https://github.com/google-research-datasets/turkish-treebanks/> (турецкий *TreeBank*) и <https://turkishpropbank.github.io/> (турецкий *PropBank*). Для турецкого языка создан лингвистический ресурс *WordNet*, с помощью которого можно организовать семантический поиск. Ресурсы для турецкого языка имеют только один вид разметки - синтаксический или семантический. В турецком *PropBank* реализована ситуационная разметка, а в *WordNet* – таксономическая. Для остальных ТЯ корпуса включают только морфонологическую разметку.

Таблица 1 – Электронные корпуса тюркских языков

Название	Адрес
Баширский поэтический корпус	http://web-corpora.net/bashcorpus/search/
Корпус бакирского языка. Проза	http://212.193.132.98/bashcorp/bashcorp
Устный корпус бакирского языка	http://lingconlab.ru/spoken_bashkir/
Алматинский корпус казахского языка	http://web-corpora.net/KazakhCorpus/search/
Национальный корпус казахского языка	http://194.146.43.249/indexru/
Национальный корпус казахского языка	https://qazcorpus.kz/about/1/?lang=ru
Крымскотатарский электронный корпус	http://korpus.juls.savba.sk/QIRIM/
Электронный корпус тувинского языка	https://www.tuvancorpus.ru/
Национальный корпус турецкого языка	https://www.tnc.org.tr/
Корпус турецкого языка	https://tscorpus.com/
Spoken Turkish Corpus	https://std.metu.edu.tr/en/
Корпус узбекского языка	https://uzbekcorpus.uz/
Электронный корпус хакасского языка	https://khakas.altaica.ru/
Корпус шорского языка	https://corpora.iea.ras.ru/corpora/
Корпус якутского языка	http://adictsakha.nsu.ru/corpora/corpus
Татарский национальный корпус «Туган тел»	https://tugantel.tatar/
Письменный корпус татарского языка.	https://www.corpus.tatar/
Корпус татарской художественной литературы	http://litcorpus.antat.ru/

Таблица 2 – Электронные корпуса тюркских языков на платформе *Sketch Engine* (<https://www.sketchengine.eu/>)

Название	Адрес
Uzbek corpus from the web	https://www.sketchengine.eu/uzwac-uzbek-corpus/
Kazakh text corpora	https://www.sketchengine.eu/corpora-and-languages/kazakh-text-corpora/
Tatar Mixed Corpus from the web	https://www.sketchengine.eu/tatar-corpus-from-the-web/
Azerbaijani text corpora	https://www.sketchengine.eu/corpora-and-languages/azerbaijani-text-corpora/
Kyrgyz text corpora	https://www.sketchengine.eu/corpora-and-languages/kyrgyz-text-corpora/

В ЭК, размещаемых на платформе Национального корпуса русского языка, реализована возможность просмотра справочной грамматической информации о языковых единицах. Например, предыдущая версия ЭК «Туган тел» [5] включала только морфологическую разметку.

Проведенный анализ показал, что многие разработчики ЭК для ТЯ используют программный инструментарий и модели, реализованные для индоевропейского семейства языков, которые отличаются по своей структуре от ТЯ, обладающих богатой морфологией [6], а информация, представляемая в таких корпусах, не отображает всё богатство и полноту структурно-функциональных особенностей ТЯ.

Наиболее полное описание знаний и эффективное управление ими с использованием релевантных алгоритмов обработки с учётом специфики языка является важной и актуальной задачей при разработке лингвистических баз данных. Практика использования в портале «Тюркская морфема» представления данных в виде графа знаний (ГЗ) [7-9] способствует решению указанных задач, позволяя описывать в корпусе языка как онтологические, так и фактографические знания о мире.

Под ГЗ подразумевается разновидность семантической сети, определяемая в работе [10] как структурированный набор данных, собранный из разнородных источников, совместимый с моделью данных *RDF* и имеющий *OWL*-онтологию в качестве своей структуры.

Разновидностью ГЗ для представления лингвистической информации являются лингвистические ГЗ. Их отличительное свойство в том, что они описывают наряду с картиной мира также и средства для описания этого мира в виде лингвистических единиц и структур естественных языков. Исследованные в [6] лексические и грамматические особенности ТЯ [5] позволили построить модель ГЗ ТЯ, названную *TurkLang* [11]. Данная модель использовалась при создании новой версии ЭК «Туган тел».

1 Реализация архитектуры модели лингвистического ГЗ ТЯ *TurkLang* в ЭК

В проекте создания лингвистического портала «Тюркская морфема» [12] предложена модель лингвистического ГЗ ТЯ *TurkLang*, которая подходит для описания потенциальных возможностей языка и фактических данных, представленных в ЭК с текстами на ТЯ. Минимальной лингвистической единицей, представленной в этой модели, являются морфемы: корневая, аффиксальная и аналитическая. Это позволяет текст каждого предложения в корпусе представлять в виде последовательности морфем. Представление словоформы в виде фрагмента ГЗ согласно данной модели показано на рисунке 1. В узлах представлена информация о типе узла, а в скобках - содержимое конкретного узла. Узлы и рёбра фрагмента ГЗ можно условно отнести к трём уровням S1, S2, S3.

Уровень S1 – поверхностный уровень, который содержит узлы графа с информацией из реальной словоформы, использованной в тексте татарского языка.

Уровень S2 – морфемный уровень, содержит узлы ГЗ с информацией об аффиксальных морфемах татарского языка. Информация уровня S2 одина для отдельного ТЯ и узлы уровня S1 ссылаются на узлы из уровня S2.

Уровень S3 – категориальный уровень, в котором представлены узлы ГЗ, общие для всех ТЯ. Это обозначения грамем, тэгов и грамматических категорий.

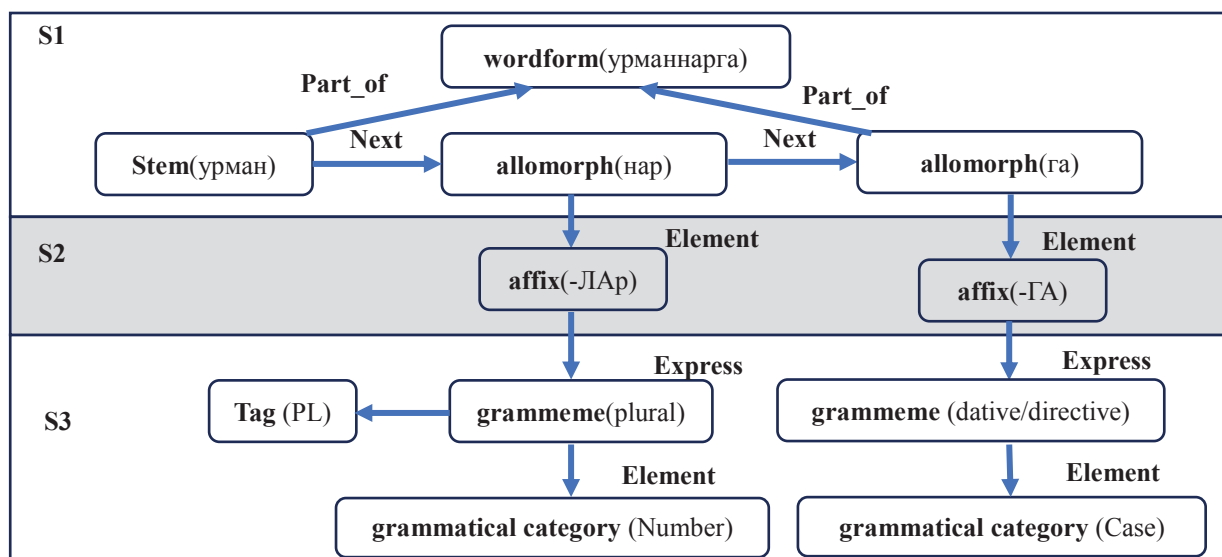


Рисунок 1 – Фрагмент графа знаний представления словоформы

Информация, представленная на уровнях S2 и S3 фрагмента ГЗ извлекается из базы знаний (БЗ) портала «Тюркская морфема», в котором специалистами по ТЯ описаны потенциальные возможности и свойства ТЯ. Такой подход позволяет использовать единую систему обозначений и обеспечить полную совместимость лингвистических ресурсов портала «Тюркская морфема» и ЭК «Туган тел». Фрагменты ГЗ с библиотеками грамматических категорий идентичны в портале и в корпусе, поэтому можно извлекать эту информацию из БЗ портала «Тюркская морфема». С целью увеличения скорости обработки поисковых запросов фрагменты ГЗ дублируются и для поддержания актуальной информации в обоих программных продуктах периодически синхронизируются.

На рисунке 1 представлен фрагмент ГЗ ЭК «Туган тел», описывающий структуру осуществления поиска в корпусе по грамматическим категориям, представленным на рисунке 2. На этом рисунке представлены все грамемы татарского языка, которые сгруппированы в грамматические категории и образуют уровень S3 ГЗ, представленного на рисунке 1.

Ещё один тип лингвистических единиц, который представлен в ГЗ ЭК «Туган тел» – это аналитические формы (*analytic form*). Аналитические формы – это формы слова с самостоя-

тельным значением в сочетании со служебными словами. Пример фрагмента ГЗ, описывающего структуру аналитической формы, представлен на рисунке 3. Аналитическими морфемами в ТЯ являются такие части речи, как послелог, частицы или вспомогательные глаголы. Аналитические морфемы в тексте так же, как и аффиксальные морфемы, выражают грамматическую роль, что в графе определяется связью типа *Express* с узлами типа грамемы.

Части речи и аффиксы

Части речи ☐ Существительное ☐ Прилагательное ☐ Глагол ☐ Наречие ☐ Числительное ☐ Местоимение ☐ Союз ☐ Послелог ☐ Междометие ☐ Модальное слово ☐ Звукоподражательное слово Время ☐ Настоящее ☐ Прощ. категорич. ☐ Прощ. результативное (перфект) ☐ Буд. категорич. ☐ Буд. неопред. ☐ Отриц. форма буд. неопред. Элементы словообразования ☐ Уменьшит. форма ☐ Ласкат. форма ☐ Лицо деятеля по роду занятий ☐ Абстрактное сущ. ☐ Мера ☐ Распределение Имена действия ☐ Имя действия на -у ☐ Имя действия на -ш (-ыш, -еш)	Падежи ☐ Именительный ☐ Родительный (генитив) ☐ Направительный (директив) ☐ Направительный с огранич. знач. ☐ Винительный (аккузатив) ☐ Исходный (аблатив) ☐ Местно-временной (локатив) Число ☐ Единственное ☐ Множественное Лицо ☐ 1 л., ед. ч. ☐ 1 л., мн. ч. ☐ 2 л., ед. ч. ☐ 2 л., мн. ч. ☐ 3 л., ед. ч. ☐ 3 л., мн. ч. Причастия ☐ Настоящего времени ☐ Прошедшего времени ☐ Будущего времени ☐ Регулярно совершаемого действия Инфинитивы ☐ Инфинитив на -ырга ☐ Инфинитив на -мак Аспект глагола ☐ Отрицание	Залог ☐ Действительный (основной) ☐ Страдательный (пассив) ☐ Возвратный (рефлексив) ☐ Понудительный (каузатив) ☐ Взаимно-совместный (реципрок) Формы поссесива ☐ 1 л., ед. ч. ☐ 1 л., мн. ч. ☐ 2 л., ед. ч. ☐ 2 л., мн. ч. ☐ 3 л., ед. ч. ☐ 3 л., мн. ч. Деепричастия ☐ Сопутствующего действия ☐ Сопутствующего действия (Отриц.) ☐ Деепричастие на -гач ☐ Деепричастие на -ганчы Модальные формы глаг. ☐ Условная модальность (кондиционалис) ☐ Необходимость ☐ Возможность ☐ Намерение ☐ Предостережение Способы глаг. действия ☐ на -гала ☐ Раритив на -ыштыр	Формы императива ☐ Императив 1 л. (гортатив) ед. ч. ☐ Императив 1 л. (гортатив) мн. ч. ☐ Императив 2 л. ед. ч. ☐ Императив 2 л. мн. ч. ☐ Императив 3 л. (юссив) ед. ч. ☐ Императив 3 л. (юссив) мн. ч. ☐ Просит. имп. (прекатив) на -чы ☐ Просит. имп. (прекатив) на -сана Разряды числительных ☐ Собирательное ☐ Порядковое ☐ Разделительное ☐ Приблизительного счета Общий вопрос ☐ Вопросит., неопред. ☐ Вопросит. формана -мыни ☐ Вероятн., предположит. ☐ Уподобление 1 ☐ Уподобление 2 ☐ Уподобление 3 Атрибутивные формы ☐ Атрибутив на -лы (мунитатив) ☐ Атрибутив на -сыз (Абессив) ☐ Локативный атрибутив ☐ Генитивный атрибутив Сравнит. степень ☐ Сравнит. степень
---	--	--	---

Рисунок 2 – Интерфейс для поиска в корпусе «Туган тел» по грамматическим категориям

В разных ТЯ одни и те же морфемы, выражающие одно и то же значение, могут являться как аффиксальными, так и аналитическими морфемами. Например, в татарском языке роль инструмента в тексте выражается с помощью аналитической морфемы *белән 'с' - чүкеч белән 'с молотком'*, в казахском она выражается с помощью аффиксальных алломорфов *-бен/-мен/-пен – балгамен 'с молотком'*, а в турецком с помощью аффиксальных алломорфов *-la/-le – çekiçle 'с молотком'*. Данная особенность написания связана с различием в правилах грамматики разных ТЯ, что выражается различием в связях между узлами ГЗ, представляющих аффиксальные и аналитические алломорфы.

Графовая структура БЗ ЭК «Туган тел» позволяет хранить в БЗ семантическую, синтаксическую и морфологическую информацию, а также осуществлять семантические поисковые запросы. Для этого в БЗ ЭК хранятся подграфы с двумя видами семантических универсалий.

Первый вид – это подграф знаний с ситуационными фреймами, который является объединением ресурсов *FrameNet* (<http://framenet.icsi.berkeley.edu>) и *FrameBank* [13]. *FrameNet* разработан для английского языка и не учитывает морфологию лингвистических единиц, с помощью которых выражаются значения семантических универсалиев, но в нём содержится наиболее полная база типовых ситуаций. *FrameBank* создан для русского языка с формализацией грамматических структур, используемых для описания ролей в ситуационных фреймах с учётом морфологии. Поскольку ТЯ – это языки с богатой морфологией, в них необхо-

димо учитывать морфологическую информацию. Новая структура БЗ использует полноту базы *FrameNet* и морфологические элементы *FrameBank*.

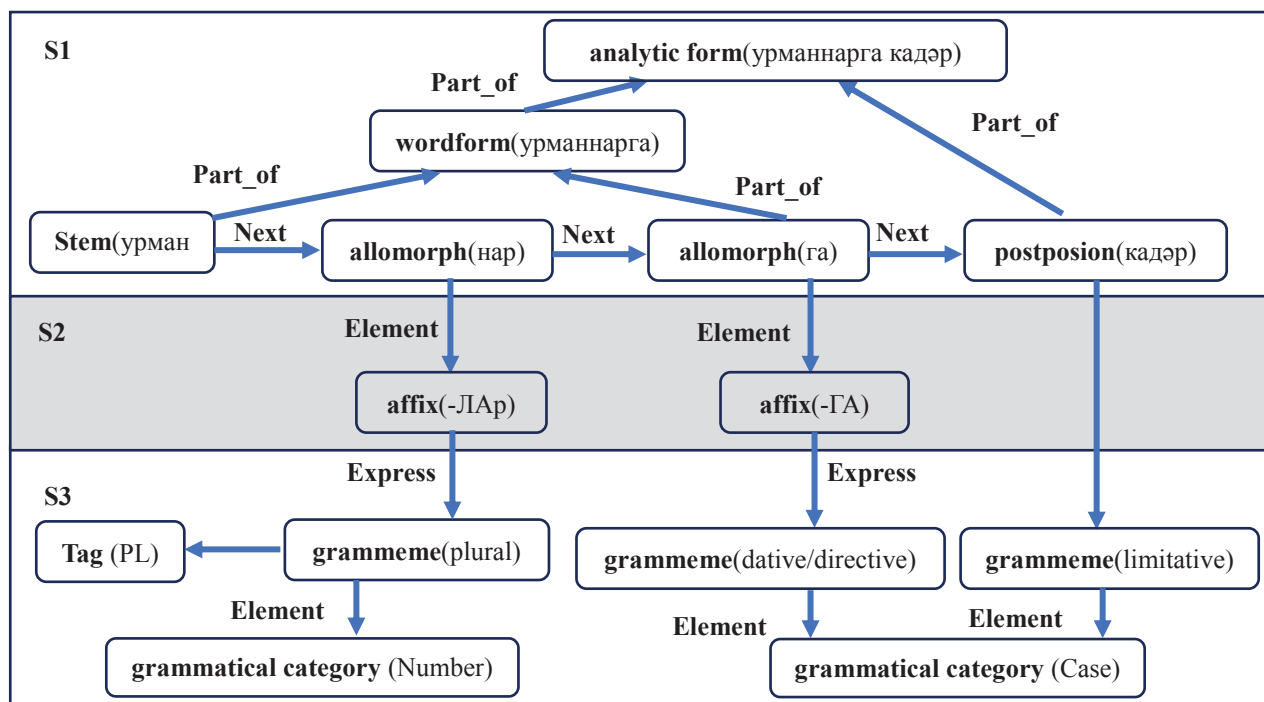


Рисунок 3 – Фрагмент графа знаний представления аналитической формы

Второй вид подграфа семантических универсалий – это таксономический подграф, реализованный в виде тезауруса типа *WordNet*. Фрагмент лингвистического ГЗ портала «Тюркская морфема» является точной копией ГЗ типа *WordNet*. Таксономическая часть графа для ТЯ представлена с помощью узлов графа концепт (*concept*), связываемых с помощью направленных рёбер. На рисунке 4 представлен фрагмент ГЗ с описанием таксономической информации, где область U ГЗ содержит семантические универсалии, которые представляют собой множество концептов и таксономические отношения между ними.

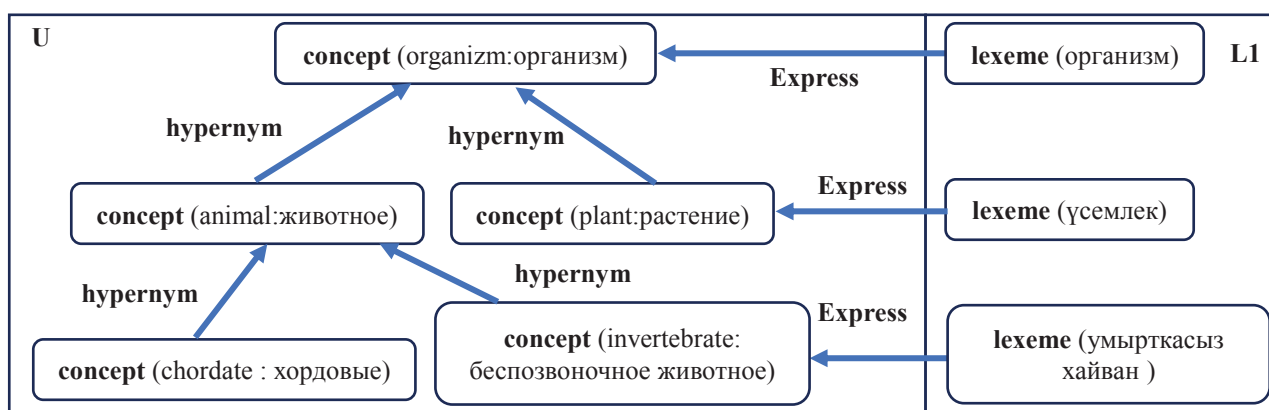


Рисунок 4 – Фрагмент графа знаний с таксономической структурой

Семантические универсалии, представленные в данной части ГЗ, в совокупности образуют семантический тезаурус. В области L1 представлены примеры лексем, которые встречаются в текстах ЭК языка (в данном примере это татарский язык). Таким образом, все лексемы 'үсемлек' ('рус.: *растение*'), которые встречаются в корпусе, имеют связь типа

Express с концептом ‘plant:растение’. Все лексемы, которые обозначают разные виды растений, имеют связь с концептами тезауруса, которые в тезаурусе находятся с концептом ‘plant:растение’ в цепочке отношений гипонимии. Такая структура ГЗ ЭК позволяет производить семантический поиск.

Система управления корпусными данными работает с ЭК текстов на татарском языке и позволяет подключать лингвистические корпуса на других агглютинативных и флективных языках (к языкам агглютинативного типа относятся ТЯ, а к языкам флективного типа – славянские языки). Поисковые технологии реализованы на базе общедоступных программных средств: реляционной системы управления базой данных (СУБД) *MariaDB* и хранилища данных *Redis*. Для реализации предлагаемой структуры БЗ используется графовая СУБД *Memgraph*.

2 Реализация структуры БЗ ЭК «Туган тел» с помощью СУБД *Memgraph*

Первичной задачей в процессе реализации БЗ ЭК «Туган Тел» является перенос существующего ЭК в структуру ГЗ. На рисунке 5 показана итоговая схема графа, реализованная с помощью СУБД *Memgraph*, достаточная для переноса существующего ЭК в структуру БЗ.

В отличие от схемы, реализованной с помощью СУБД *MariaDB*, в графе дополнительно появляются узлы типов «Clause» («Клауза»), «Syntaxeme» («Синтаксема»), «PunctuationMark» («Знак препинания»), «Morpheme» («Морфема»), «PartOfSpeech» («Часть речи»), необходимых для дальнейшего представления словоформ, клауз и синтаксем. Также в графе появляются узлы «Language» («Язык»), «Person» («Человек»), «Source» («Источник»), «DocumentName» («Название документа»), «Place» («Место»), «Building» («Здание»), необходимые для дальнейшего представления семантических связей с соответствующими объектами. Количество типов таких узлов неограниченно, и их набор может быть расширен без внесения изменений в основную ГЗ.

В качестве примера в представленную структуру можно поместить предложение: «Дөрес, эле Казанда моңа кадр картлар йорты юк иде» («И вправду, до сих пор в Казани не было дома престарелых») с морфологической разметкой, извлечённой из существующего ЭК. Для узлов типа «Sentence» предусмотрено два свойства, в которых хранятся данные о предложении в целом: «name» (предложение без морфологической разметки), «full» (предложение с морфологической разметкой). Добавление предложения осуществляется при помощи запроса на языке *Cypher*:

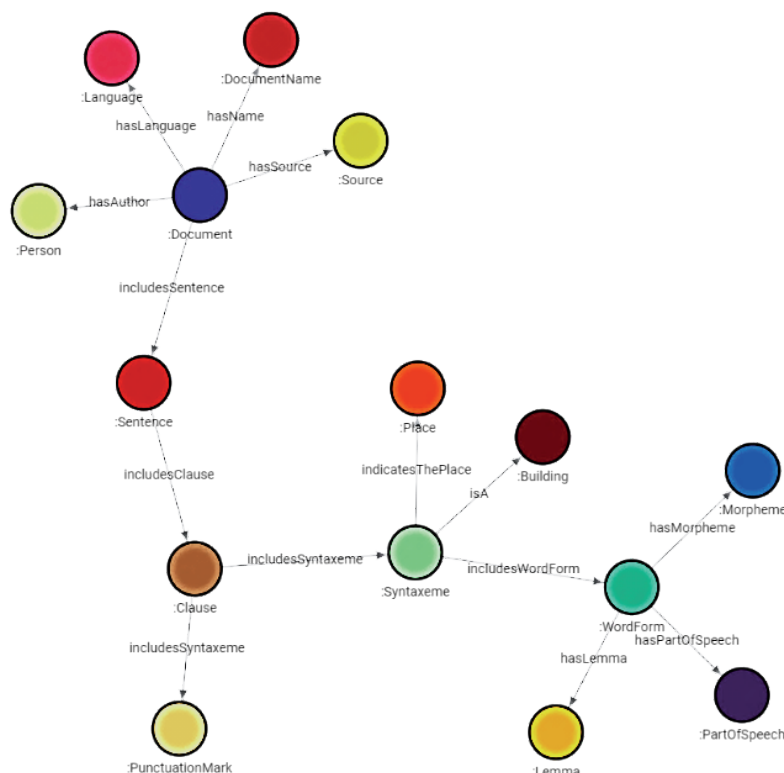


Рисунок 5 – Схема графа, реализованного с помощью СУБД *Memgraph*

CREATE (s:Sentence {name: "Дерес, әле Казанда моңа кадәр картлар йорты юк иде.", full: "Дерес (И вправду) дерес+Adj; Type2 әле (ещё) әле+CNJ;әле+PART; Казанда (в Казани) казан+N+Sg+LOC(ДА); казан+PROP+LOC(ДА); моңа (этого) моңа+PN; кадәр (до) кадәр+Adv; кадәр+POST; картлар (старика) карт+Adj+PL(ЛАР)+Nom;карт+N+PL(ЛАР)+Nom; йорты (дом) йорт+N+Sg+POSS_3SG(СЫ)+Nom; юк юк+MOD; иде и+V+PST_DEF(ДЫ); . Type1"});

Далее необходимо добавить узел типа «Document». Для таких узлов предусмотрено использование трёх свойств, в которых хранятся данные о документе: «name» (наименование файла документа), «length» (длина документа в словах), «publicationDate» (дата публикации). Представление метаданных о длине документа и дате публикации в виде свойств узла обусловлено необходимостью реализации поиска по интервалам длин документов и интервалам дат. Добавление узла документа при помощи запроса на языке *Cypher* имеет вид:

CREATE (d:Document {name: "1_17890_1_1.txt", length: 445, publicationDate: date("2010-07-08")});

Для добавления узлов и связей, связанных с другими метаданными документа, необходимо добавить узлы соответствующих типов («Language», «DocumentName», «Source», «Person») и рёбра между узлом документа и добавленными узлами соответствующих типов («hasLanguage», «hasName», «hasSource», «hasAuthor»). Сделать это можно одним запросом на языке *Cypher*:

MATCH (d:Document {name: "1_17890_1_1.txt"})

MERGE (d)-[:hasLanguage]->(l:Language {name: "Tatar"})

MERGE (d)-[:hasName]->(n:DocumentName {name: "Казанда да картлар йорты ачылачак"}) («В Казани откроется дом престарелых»)

MERGE (d)-[:hasSource]->(s:Source {name: "http://www.azatliq.org/"})

MERGE (d)-[:hasAuthor]->(p:Person {name: "Наил Алан"});

Чтобы указать, что созданный документ включает предложение, необходимо добавить ребро между узлом документа и узлом предложения типа «includesSentence». При этом у такого ребра есть дополнительные свойства «position» (порядковый номер предложения в документе) и «startPosition» (порядковый номер первого слова предложения в документе). Так как в добавляемом примере только одно предложение, оба свойства примут значение «1». Если предложений несколько, то указанные свойства в дальнейшем помогут построить контекст вокруг предложения и найти это предложение в нужном документе. Запрос на языке *Cypher* для добавления ребра выглядит так:

MATCH (d:Document {name: "1_17890_1_1.txt"})

MATCH (s:Sentence {name: "Дерес, әле Казанда моңа кадәр картлар йорты юк иде."})

MERGE (d)-[:includesSentence {position: 1, startPosition: 1}]->(s);

Выполнение всех описанных запросов создаёт подграф, показанный на рисунке 6. Каждое предложение в корпусе может быть разделено на клаузы. Если предложение является простым, то оно состоит из одной клаузы, сложное предложение - из двух клауз. Для добавления клауз необходимо создать узлы типа «Clause» и соединить их с узлом предложения при помощи ребра с типом «includesClause». В добавляемом предложении клауза только одна, но их может быть несколько, поэтому у рёбер типа «includesClause» должны быть указаны свойства «position» (порядковый номер клаузы в предложении) и «startPosition» (порядковый номер первого слова клаузы в предложении). Добавление клаузы при помощи запроса на языке *Cypher* может быть выполнено следующим образом:

MATCH (s:Sentence {name: "Дерес, әле Казанда моңа кадәр картлар йорты юк иде."})

MERGE (s)-[:includesClause {position: 1, startPosition: 1}]->(c:Clause {name: "Дерес, әле Казанда моңа кадәр картлар йорты юк иде."});

Каждая клауза в ЭК может быть разделена на синтаксемы. Синтаксема - это минимальная, неделимая семантико-синтаксическая языковая единица, выступающая одновременно как носитель элементарного смысла и как конструктивный компонент более сложных синтаксических построений. Синтаксеме может соответствовать как отдельная словоформа, так и словосочетание или знак препинания. Таким образом, для представления синтаксем в БЗ используются узлы типов «Syntaxeme» для синтаксем, состоящих из словоформ, и «PunctuationMark» для синтаксем, состоящих из знаков препинания. Для представления связей между клаузами и синтаксемами используются рёбра типа «includesSyntaxeme», у которых должны быть указаны

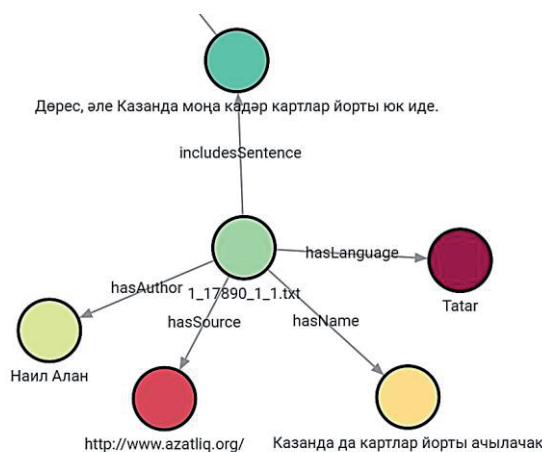


Рисунок 6 – Подграф, включающий узлы предложения, документа и метаданных документа

свойства «position» (порядковый номер синтаксемы в клаузе) и «startPosition» (порядковый номер первой словоформы или знака препинания синтаксемы в клаузе). Запрос для добавления синтаксем на языке *Cypher* представлен ниже:

```
MATCH (c:Clause {name: "Дерес, әле Казанда моңа кадәр картлар йорты юк иде."})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 1, startPosition: 1}]->(:Syntaxeme {name: "дерес"})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 2, startPosition: 2}]->(:PunctuationMark {name: ","})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 3, startPosition: 3}]->(:Syntaxeme {name: "әле"})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 4, startPosition: 4}]->(:Syntaxeme {name: "казанда"})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 5, startPosition: 5}]->(:Syntaxeme {name: "моңа кадәр"})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 6, startPosition: 7}]->(:Syntaxeme {name: "картлар йорты"})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 7, startPosition: 9}]->(:Syntaxeme {name: "юк иде"})
MERGE (c)-[:includesSyntaxeme {position: 8, startPosition: 11}]->(:PunctuationMark {name: "."});
```

Выполнение запросов на добавление клауз и синтаксем создаёт подграф, показанный на рисунке 7. Узлы типа «PunctuationMark» являются конечными в текущей версии БЗ. Синтаксемы, состоящие из словоформ, должны быть разделены на словоформы. Словоформы представлены в графе БЗ узлами типа «WordForm», а связи между синтаксемами и словоформами – рёбрами типа «includesWordForm» со свойствами «position», указывающими порядковый номер словоформы в синтаксеме. В качестве примера показаны запросы для синтаксем “Казанда” («в Казани») и “картлар йорты” («дом престарелых»). Запрос, добавляющий в граф БЗ словоформы и связи с указанными синтаксемами, на языке *Cypher* выглядит следующим образом:

```
MATCH (s1:Syntaxeme {name: "казанда"})
MATCH (s2:Syntaxeme {name: "картлар йорты"})
MERGE (s1)-[:includesWordForm {position: 1}]->(:WordForm {name: "казанда"})
MERGE (s2)-[:includesWordForm {position: 1}]->(:WordForm {name: "картлар"})
MERGE (s2)-[:includesWordForm {position: 2}]->(:WordForm {name: "йорты"});
```

Морфологическая разметка каждой словоформы содержит лемму, часть речи и набор морфологических свойств (морфем) словоформы. Причём в части корпуса у каждой словоформы может быть несколько вариантов морфологической разметки.

Для представления в БЗ лемм используются узлы типа «Lemma», для представления частей речи – узлы типа «PartOfSpeech», для представления морфологических свойств – узлы типа «Morpheme». Последние имеют справочное свойство «affix», в котором указывается словообразующий аффикс, соответствующий морфеме. Связи между узлами словоформ и узлами лемм представлены в графе рёбрами типа «hasLemma», связи между узлами словоформ и узлами частей речи – рёбрами типа «hasPartOfSpeech», а связи между узлами словоформ и узлами морфем – рёбрами типа «hasMorpheme». Так как в ЭК может иметься разметка с морфологической неоднозначностью, у всех указанных рёбер присутствуют свойства «variant», указывающие на порядковый номер морфологической разметки словоформы. Для рёбер типа «hasMorpheme» дополнительно указывается свойство «position», указывающее на порядковый номер морфемы в цепочке. Добавление указанных узлов и рёбер в граф БЗ при помощи запроса на языке *Cypher* может быть представлено следующим образом:

```
MATCH (w1:WordForm {name: "казанда"})
MATCH (w2:WordForm {name: "картлар"})
MATCH (w3:WordForm {name: "йорты"})
```

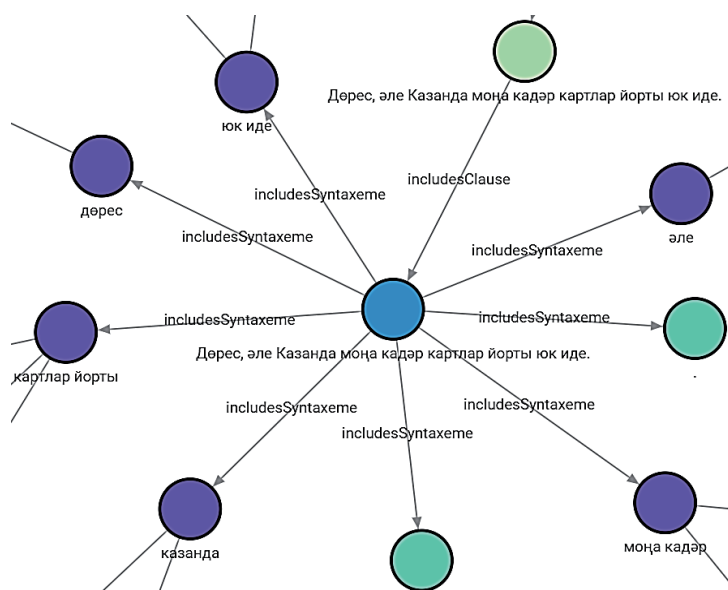


Рисунок 7 – Подграф, включающий узлы предложения, клауз и синтаксем

```
CREATE (:Morpheme {name: "SG", affix: ""}), (:Morpheme {name: "LOC", affix: "да"}), (:Morpheme {name: "PL", affix: "лар"}), (:Morpheme {name: "NOM", affix: ""}), (:Morpheme {name: "POSS_3SG", affix: "сы"})
MERGE (w1)-[:hasLemma {variant: 1}]->(:Lemma {name: "казан"})
MERGE (w1)-[:hasPartOfSpeech {variant: 1}]->(:PartOfSpeech {name: "N"})
MERGE (w1)-[:hasMorpheme {variant: 1, position: 1}]->(:Morpheme {name: "SG"})
MERGE (w1)-[:hasMorpheme {variant: 1, position: 2}]->(:Morpheme {name: "LOC"})
MERGE (w1)-[:hasLemma {variant: 2}]->(:Lemma {name: "казан"})
MERGE (w1)-[:hasPartOfSpeech {variant: 2}]->(:PartOfSpeech {name: "PROP"})
MERGE (w1)-[:hasMorpheme {variant: 2, position: 1}]->(:Morpheme {name: "LOC"})
MERGE (w2)-[:hasLemma {variant: 1}]->(:Lemma {name: "карт"})
MERGE (w2)-[:hasPartOfSpeech {variant: 1}]->(:PartOfSpeech {name: "ADJ"})
MERGE (w2)-[:hasMorpheme {variant: 1, position: 1}]->(:Morpheme {name: "PL"})
MERGE (w2)-[:hasMorpheme {variant: 1, position: 2}]->(:Morpheme {name: "NOM"})
MERGE (w2)-[:hasLemma {variant: 2}]->(:Lemma {name: "карт"})
MERGE (w2)-[:hasPartOfSpeech {variant: 2}]->(:PartOfSpeech {name: "N"})
MERGE (w2)-[:hasMorpheme {variant: 2, position: 1}]->(:Morpheme {name: "PL"})
MERGE (w2)-[:hasMorpheme {variant: 2, position: 2}]->(:Morpheme {name: "NOM"})
MERGE (w3)-[:hasLemma {variant: 1}]->(:Lemma {name: "йорт"})
MERGE (w3)-[:hasPartOfSpeech {variant: 1}]->(:PartOfSpeech {name: "N"})
MERGE (w3)-[:hasMorpheme {variant: 1, position: 1}]->(:Morpheme {name: "SG"})
MERGE (w2)-[:hasMorpheme {variant: 1, position: 2}]->(:Morpheme {name: "POSS_3SG"});
```

Необходимо также добавить семантические связи между лексемами и объектами. Указанные синтаксемы обозначают здание «картлар йорты» («дом престарелых») (в графе узел типа «Building») и место «Казан» («Казань») (в графе узел типа «Place»). Добавление семантических связей при помощи запроса на языке *Cypher* выглядит так:

```
MATCH (s1:Syntaxeme {name: "казанда"})
MATCH (s2:Syntaxeme {name: "картлар йорты"})
MERGE (s1)-[:indicatedThePlace]->(:Place {name: "Казан"})
MERGE (s2)-[:isA]->(:Building {name: "картлар йорты"});
```

На рисунке 8 показан подграф, созданный после выполнения указанных запросов для синтаксиса «Казанда» и «картлар йорты». На этом подграфе уже видны общие вершины графа для различных типов узлов и рёбер, например, все три словоформы из примера имеют связь с частью речи «N» (существительное), так как для всех трёх словоформ существует морфологическая разметка с указанием этой части речи.

Заключение

Описанная концептуальная модель лингвистического ГЗ применяется для представления данных ЭК «Туган Тел». Реализация функционала модернизированной системы управления корпусными данными поддерживает функционал поиска по словоформам и леммам, а также

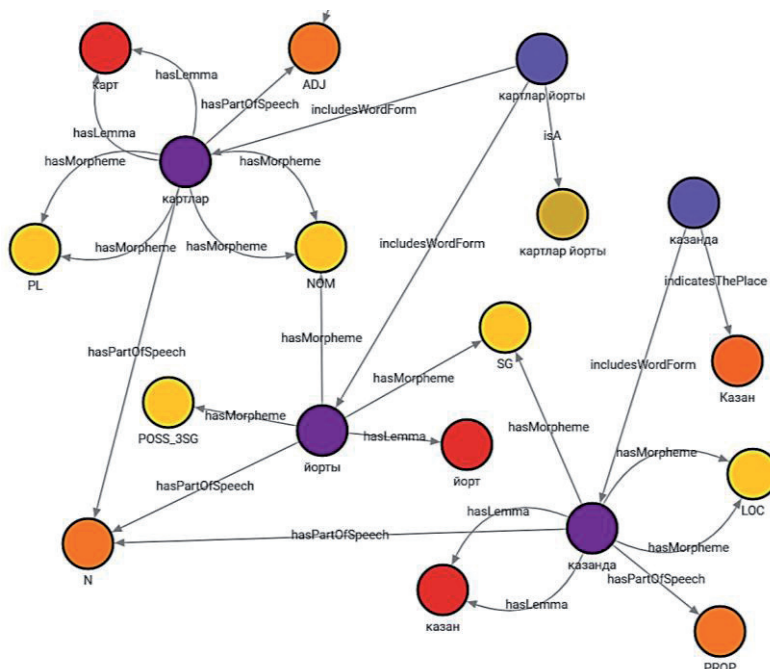


Рисунок 8 – Подграф, включающий узлы синтаксиса, словоформ, лемм, морфем, частей речи и семантических связей с объектами

поиск по морфемам. Применение новой модели лингвистического ГЗ и возможностей графовой СУБД позволяет расширить функционал системы, добавляя новые инструменты для исследования ТЯ.

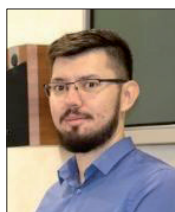
Использование системы семантических универсалий в виде фреймовых и таксономических ГЗ позволяет объединять все корпуса в единый многоязычный корпус и производить многоязычный поиск и исследования ТЯ. Эта возможность позволит повысить эффективность деятельности лингвистов и типологов, работающих с ЭК на основе предложенной модели лингвистического ГЗ ТЯ *TurkLang*.

Список источников

- [1] **Aksan M., Aksan Y.** Linguistic Corpora: A View from Turkish. In: Oflazer, K., Saraçlar, M. (eds) Turkish Natural Language Processing. Theory and Applications of Natural Language Processing. 2018. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-90165-7_14.
- [2] **Салчак А.Я.** Электронный корпус текстов тувинского языка. *Новые исследования Тувы*. 2012. №3. С.110-114.
- [3] **Bazarbayeva Z.M., Zharkynbekova Sh.K., Amanbayeva A.Zh., Zhumabayeva Zh.T., Karshygayeva A.A.** The National Corpus of Kazakh Language: Development of Phonetic and Prosodic Markers. *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*. 2023. Т. 16. № 8. P.1256-1270. EDN: IVPVAN.
- [4] **Sirazitdinov, Z. Buskunbaeva L., Ishmukhametova A.** About linguistic corpora of the Bashkir language // Proceedings of the International Conference "Turkic languages processing" TurkLang-2015 / Tatarstan Academy of Sciences L.N. Gumilyov Eurasian National University Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan Kazan Federal University Institute of Philology and Intercultural Communication. – Казань, Россия: Академия наук Республики Татарстан, 2015. P.269-275. EDN ZDGYTR.
- [5] **Mukhamedshin D., Gilmullin R., Khakimov B.** Search Engine Capabilities in the Corpus Data Management System // UBMK 2023 - Proceedings: 8th International Conference on Computer Science and Engineering, Burdur, Turkey, 13-15 September 2023, p.449–452. DOI: 10.1109/UBMK59864.2023.10286648.
- [6] **Сулейманов Д.Ш., Гильмуллин Р.А., Гатиатуллин А.Р., Прокопьев Н.А.** Когнитивный потенциал естественных языков агглютинативного типа в интеллектуальных технологиях // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.496-506. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-496-506.
- [7] **Hogan A, Blomqvist E, Cochez M, d'Amato C, de Melo G, Gutierrez C, Gayo JEL, Kirrane S, Neumaier S, Pollere A.** Knowledge graphs. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2021; 54(4): 1-37. DOI: 10.1145/3447772.
- [8] **Fensel D, Şimşek U, Angele K, Huaman E, Kärle E, Panasiuk O, Toma I, Umbrich J, Wahler A.** Knowledge Graphs: Methodology, Tools and Selected Use Cases. Cham: Springer Cham, 2020. 164 p. DOI: 10.1007/978-3-030-37439-6.
- [9] **Ji S, Pan S, Cambria E, Marttinen P, Yu PS.** A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition, and Applications. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021; 33(2): 494-514. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3070843.
- [10] **Pan JZ, Vetere G, Gomez-Perez JM, Wu H.** Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs in Large Organizations. Cham: Springer Cham, 2017. 266 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45654-6.
- [11] **Гатиатуллин А.Р., Прокопьев Н.А., Сулейманов Д.Ш.** Модель лингвистических графов знаний тюркских языков // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №3(53). С.366-378. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-366-378
- [12] **Gatiatullin A., Suleymanov D., Prokopyev N., Khakimov B.** About turkic morpheme portal // *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, 2780. P.226–243. EDN: ZNIQUO.
- [13] **Lyashevskaya, O. and Egor Kashkin,** FrameBank: A Database of Russian Lexical Constructions // International Joint Conference on the Analysis of Images, Social Networks and Texts, 2015. M.Y. Khachay et al. (Eds): AIST 2015, CCIS 542. P.1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-26123-2_34.

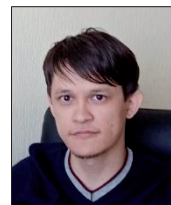
Сведения об авторах

Гатиатуллин Айрат Рафизович, 1972 г. рождения. Окончил Казанский государственный университет в 1994 г., к.т.н. (2002). Ведущий научный сотрудник Института прикладной семиотики Академии наук Республики Татарстан. В списке научных трудов более 90 работ. ORCID: 0000-0003-3063-8147; Author ID (РИНЦ): 161758; Author ID (Scopus): 56500678000. ayrat.gatiatullin@gmail.com✉



Мухамедшин Дамир Рафкатович, 1993 г. рождения. Окончил Институт вычислительной математики и информационных технологий Казанского Федерального университета в 2015 году. Научный сотрудник Института прикладной семиотики Академии наук РТ. В списке научных трудов более 20 работ. ORCID: 0000-0003-0078-9198; Author ID (РИНЦ): 1031142; Author ID (Scopus): 57194654368; Researcher ID (WoS): KPY-5366-2024. damirmuh@gmail.com.

Прокопьев Николай Аркадиевич, 1992 г. рождения. Окончил Институт вычислительной математики и информационных технологий Казанского Федерального университета в 2015 году. Научный сотрудник Института прикладной семиотики Академии наук РТ. В списке научных трудов около 40 работ. ORCID: 0000-0003-0066-7465; Author ID (РИНЦ): 999214; Author ID (Scopus): 57190803409; Researcher ID (WoS): S-3829-2016. nikolai.prokopyev@gmail.com.



Сулейманов Джавдет Шевкетович, 1955 г. рождения. Окончил механико-математический факультет Казанского государственного университета в 1977 г., к.т.н. (1986), д.т.н. (2000). Научный руководитель Института прикладной семиотики Академии наук РТ, академик АН РТ, профессор. Заслуженный деятель науки РТ, член Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ). В списке научных трудов более 300 работ в области прикладной семиотики, компьютерной и когнитивной лингвистики, искусственного интеллекта, электронной и социальной педагогики. Author ID (РИНЦ): 9142; Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. dvdts.lt@gmail.com.

Поступила в редакцию 13.06.2024, после рецензирования 4.10.2024. Принята к публикации 28.10.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-542-554

Electronic corpus of the Tatar language based on the model of linguistic knowledge graphs

© 2024, A.R. Gatiyatullin ✉, D.R. Mukhamedshin, N.A. Prokopyev, D.Sh. Suleymanov

Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Semiotics, Kazan, Russia

Abstract

The article presents a new version of the electronic corpus of the Tatar language, updated based on a linguistic knowledge graph model for Turkic languages. This new version of the corpus allows for information description across multiple linguistic levels: morphonological, syntactic, and semantic, through the use of knowledge graphs to represent linguistic data. This approach enhances corpus functionality, enabling searches that incorporate syntactic and semantic information. A distinctive feature of the electronic corpus implementation is that the model employed aligns closely with the structural and functional characteristics of Turkic languages and serves as a foundation for developing various software products for semantic text processing in Turkic languages. In particular, these products include the linguistic portal "Turkic Morpheme" and the new version of the Tatar language electronic corpus, "Tugan Tel."

Keywords: electronic corpus, knowledge graph, database management system, linguistic unit, turkic languages.

For citation: Gatiatullin AR, Mukhamedshin DR, Prokopyev NA, Suleymanov DSh. Electronic corpus of the Tatar language based on the model of linguistic knowledge graphs [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 542-554. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-542-554.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Fragment of the knowledge graph of the word form representation

Figure 2 – Interface for searching in the “Tugan tel” corpus by grammatical categories

Figure 3 – Fragment of the knowledge graph with analytical form representation

Figure 4 – Fragment of the knowledge graph with taxonomic structure

Figure 5 – Scheme of a graph implemented using the Memgraph DBMS

Figure 6 – Subgraph containing sentence, document, and document metadata nodes

Figure 7 – Subgraph containing sentence, clause, and syntaxeme nodes

Figure 8 – Subgraph containing syntaxemes, word forms, lemmas, morphemes, parts of speech, and semantic links nodes

Table 1 – Electronic corpora of Turkic languages

Table 2 – Electronic corpora of Turkic languages on the Sketch Engine platform (<https://www.sketchengine.eu/>)

References

- [1] **Aksan M, Aksan Y.** Linguistic Corpora: A View from Turkish. In: Oflazer, K., Saraçlar, M. (eds) Turkish Natural Language Processing. Theory and Applications of Natural Language Processing. 2018. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-90165-7_14.
- [2] **Salchak AY.** Electronic corpus of texts of the Tuvan language [In Russian]. *The New Research of Tuva*. 2012; 3(15): 110-114.
- [3] **Bazarbayeva ZM, Zharkynbekova ShK, Amanbayeva AZh, Zhumabayeva ZhT, Karshygayeva AA.** The National Corpus of Kazakh Language: Development of Phonetic and Prosodic Markers // *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*. 2023; 16(8): 1256-1270. EDN: IVPVAN.
- [4] **Sirazitdinov Z., Buskunbaeva L., Ishmukhametova A.** About linguistic corpora of the Bashkir language // Proceedings of the International Conference "Turkic languages processing" Turklang-2015 / Tatarstan Academy of Sciences L.N. Gumilyov Eurasian National University Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan Kazan Federal University Institute of Philology and Intercultural Communication. – Kazan, Russia: Tatarstan Academy of Sciences, 2015. P.269-275. EDN ZDGYTR.
- [5] **Mukhamedshin D., Gilmullin R., Khakimov B.** Search Engine Capabilities in the Corpus Data Management System // UBMK 2023 - Proceedings: 8th International Conference on Computer Science and Engineering, Burdur, Turkey; 13-15 September 2023, pp. 449–452. DOI: 10.1109/UBMK59864.2023.10286648.
- [6] **Suleymanov DS, Gilmullin RA, Gatiatullin AR, Prokopyev NA.** Cognitive potential of agglutinative languages in intelligent technologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 496-506. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-496-506.
- [7] **Hogan A, Blomqvist E, Cochez M, d'Amato C, de Melo G, Gutierrez C, Gayo JEL, Kirrane S, Neumaier S, Pollere A.** Knowledge graphs. ACM Computing Surveys (CSUR). 2021; 54(4): 1-37. DOI: 10.1145/3447772.
- [8] **Fensel D, Şimşek U, Angele K, Huaman E, Kärle E, Panasiuk O, Toma I, Umbrich J, Wahler A.** Knowledge Graphs: Methodology, Tools and Selected Use Cases. Cham: Springer Cham, 2020. 164 p. DOI: 10.1007/978-3-030-37439-6.
- [9] **Ji S, Pan S, Cambria E, Marttinen P, Yu PS.** A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition, and Applications. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021; 33(2): 494-514. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3070843.
- [10] **Pan JZ, Vetere G, Gomez-Perez JM, Wu H.** Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs in Large Organizations. Cham: Springer Cham, 2017. 266 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45654-6.
- [11] **Gatiatullin AR, Prokopyev NA, Suleymanov DS.** Model of linguistic knowledge graphs of Turkic languages [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 366-378. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-366-378.
- [12] **Gatiatullin A, Suleymanov D, Prokopyev N, Khakimov B.** About turkic morpheme portal // *CEUR Workshop Proceedings*, 2020; 2780: 226–243. EDN: ZNIQUO.

- [13] **Lyashevskaya O, Kashkin E.** FrameBank: A Database of Russian Lexical Constructions // International Joint Conference on the Analysis of Images, Social Networks and Texts, 2015. M.Y. Khachay et al. (Eds): AIST 2015, CCIS 542. P.1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-26123-2_34.
-

About the authors

Ayrat Rafizovich Gatiatullin (b. 1972) graduated from Kazan State University in 1994, PhD (2002). Leading researcher at the Institute of Applied Semiotics of Tatarstan Academy of Sciences. List of scientific works includes more than 60 works. ORCID: 0000-0003-3063-8147; Author ID (RSCI): 161758; Author ID (Scopus): 56500678000. ayrat.gatiatullin@gmail.com✉

Damir Rafkatovich Mukhamedshin (b. 1993) graduated from the Institute of Computational Mathematics and Information Technologies of Kazan Federal University in 2015. Researcher at the Institute of Applied Semiotics of Tatarstan Academy of Sciences. List of scientific works includes more than 20 works. ORCID: 0000-0003-0078-9198; Author ID (RSCI): 1031142; Author ID (Scopus): 57194654368; Researcher ID (WoS): KPY-5366-2024. damirmuh@gmail.com.

Nikolai Arkadievich Prokopyev (b. 1992) graduated from the Institute of Computational Mathematics and Information Technologies of Kazan Federal University in 2015. Researcher at the Institute of Applied Semiotics of Tatarstan Academy of Sciences. List of scientific works includes about 40 works. ORCID: 0000-0003-0066-7465; Author ID (RSCI): 999214; Author ID (Scopus): 57190803409; Researcher ID (WoS): S-3829-2016. nikolai.prokopyev@gmail.com.

Dzhavdet Shevketovich Suleymanov (b. 1955) graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Kazan State University in 1977, PhD (1985), Doctor of Technical Sciences (2000). Scientific Director of the Institute of Applied Semiotics of Tatarstan Academy of Sciences, Academician of Tatarstan Academy of Sciences, Professor. Honored Scientist of the Republic of Tatarstan, member of the Russian Association of Artificial Intelligence (RAAI). List of scientific works includes more than 300 works in the field of applied semiotics, computer and cognitive linguistics, artificial intelligence, and electronic and social pedagogy. Author ID (RSCI): 9142; Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. dvdt.slt@gmail.com.

Received June 13, 2024. Revised October 4, 2024. Accepted October 28, 2024.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-555-568



Разработка предметных графов знаний на основе семантического аннотирования табличных данных

© 2024, Н.О. Дородных ✉, А.Ю. Юрин

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
(ИДСТУ СО РАН), Иркутск, Россия

Аннотация

В статье описывается подход и программное средство для автоматизированного пополнения предметно-ориентированных графов знаний новыми фактами, извлечёнными из семантически аннотированных табличных данных. Для семантического аннотирования столбцов таблиц предлагается использовать комбинацию из трёх эвристических методов, использующих результаты распознавания именованных сущностей в ячейках, лексическое сопоставление и группировку характеристик. Предлагаемый подход реализован в виде специального обработчика, входящего в состав программной платформы *Talisman*. Представлен пример и экспериментальная оценка предлагаемого подхода на этапе семантического аннотирования столбцов с использованием тестового набора табличных данных, который включает шесть тематических категорий: «сотрудники организации», «открытые вакансии», «рынок автомобилей», «известные учёные», «продажа книг», «рейтинг теннисистов». В качестве метрик оценки использовались точность, полнота и F -мера. Итоговая оценка по всем шести категориям составила: точности – 79%, полноты – 63%, F -меры – 70%. Полученные результаты показывают перспективность использования разработанного подхода для пополнения предметно-ориентированных графов знаний новыми фактами, извлечёнными из семантически аннотированных табличных данных. Приведены ограничения предлагаемого подхода.

Ключевые слова: граф знаний, семантическая интерпретация таблиц, аннотирование таблиц, извлечение сущностей, пополнение графа знаний, табличные данные.

Цитирование: Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Разработка предметных графов знаний на основе семантического аннотирования табличных данных. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.555-568. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-555-568.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента России (проект СП-978.2022.5) и госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (№ госрегистрации: 121030500071-2).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Интеллектуальные информационно-аналитические системы активно применяются в сфере корпоративного поиска информации (например, *Microsoft SharePoint*¹, *Oracle Secure Enterprise Search*², *Elasticsearch*³ и др.), ведения баз знаний и анализа текстов (*Palantir*

¹ <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/sharepoint/collaboration>.

² <https://www.oracle.com/middleware/technologies/oses-downloads.html>.

³ <https://github.com/elastic/elasticsearch/releases/tag/v8.15.0>.

*Gotham*⁴, *IQPlatform*⁵, *Айтеко «X-files 2.0»*⁶ и др.), мониторинга СМИ и социальных сетей (*LexisNexis*⁷, *МедиаЛогия*⁸, *BrandAnalytics*⁹ и др.), конкурентной разведки (*Maltego*¹⁰, *Hensoldt Analytics*¹¹, *Виток-OSINT*¹² и др.), прогнозирования и аналитики данных (*SAS Analytics*¹³, *IBM Watson Studio*¹⁴, *PolyAnalyst Megaputer*¹⁵ и др.).

Для построения подобного рода систем могут быть использованы графы знаний (ГЗ), предназначенные для накопления и передачи знаний о реальном мире, при этом их узлы представляют интересующие объекты, а рёбра – отношения между этими объектами [1, 2]. Базовой структурной единицей ГЗ является триплет: *<субъект>*, *<предикат>*, *<объект>*. Каждая подобная сущность из этого триплета идентифицируется глобальным унифицированным идентификатором ресурса (*Uniform Resource Identifier, URI*) [3]. ГЗ могут быть масштабированы для обработки больших объёмов данных. ГЗ можно разделить на два типа: *глобальные кросс-доменные* ГЗ и *предметно-ориентированные* ГЗ. Первый тип включает такие международные проекты с открытым исходным кодом, как *DBpedia*¹⁶, *Wikidata*¹⁷, *Yago*¹⁸, *BabelNet*¹⁹ и проприетарные решения, такие как *Google Knowledge Graph*²⁰ и *Probase*²¹. Такие графы, как правило, содержат большое количество объектов из многих областей. Второй тип ориентируется на описание знаний, которые относятся к определённой конкретной области или предприятию. Предметные ГЗ могут поддерживать эффективный поиск знаний и являться основой для различных приложений [2, 3]. Использование ГЗ при построении интеллектуальных систем позволяет эффективно структурировать знания и выявлять скрытые связи и зависимости между различными понятиями, что бывает полезно для принятия решений или прогнозирования [4]. Однако разработка ГЗ является трудоёмкой задачей и может потребовать обработки больших объёмов данных, полученных из различных информационных источников (например, баз данных, электронных документов, веб-ресурсов) [5, 6]. Таким образом, исследования, ориентированные на автоматизацию построения ГЗ и пополнения их новыми фактами при решении практических, слабо формализованных задач в различных предметных областях (ПРО), являются актуальными.

Основной тенденцией здесь является использование различных информационных источников. Одним из таких источников являются таблицы [7]. В общем случае каждая строка таблицы представляет собой запись, а каждый столбец – атрибут или поле. Согласно [8] из таблиц, содержащихся как в веб-пространстве, так и в составе различных электронных документов, можно извлечь множество полезных фактов. Таблицы неоднородны по своей структуре и не сопровождаются явной семантикой, необходимой для автоматической интерпретации своего содержания. Это затрудняет активное практическое использование табличных данных (ТД) в автоматическом и автоматизированных режимах.

⁴ <https://www.palantir.com/platforms/gotham/>.

⁵ <https://iqmen.ru/iqplatform>.

⁶ <https://www.i-teco.ru/iskusstvennyyintellect/x-files-2-0/>.

⁷ <https://www.lexisnexis.com/en-us/gateway.page>.

⁸ <https://www.mlg.ru/>.

⁹ <https://brandanalytics.ru/>.

¹⁰ <https://www.maltego.com/>.

¹¹ <https://analytics.hensoldt.net/>.

¹² <https://norsi-trans.ru/catalog/osint/vitok-m/>.

¹³ https://www.sas.com/en_in/home.html.

¹⁴ <https://www.ibm.com/products/watson-studio>.

¹⁵ <https://www.megaputer.ru/>.

¹⁶ <https://www.dbpedia.org/>.

¹⁷ https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:Main_Page.

¹⁸ <https://yago-knowledge.org/>.

¹⁹ <https://babelnet.org/>.

²⁰ <https://blog.google/products/search/introducing-knowledge-graph-things-not/>.

²¹ <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/probase/>.

Подход к автоматизированному наполнению ГЗ сущностями на основе анализа таблиц был предложен в [9]. Особенностью этого подхода является возможность автоматического восстановления семантики ТД на основе применения гибридного метода, сочетающего в себе техники машинного обучения, векторных представлений и интуитивно понятных эвристик.

В данной работе предлагается специализировать предложенный общий подход к конкретной практической задаче извлечения фактов из ТД в рамках индустриальной цифровой платформы *Talisman*²², разработанной Институтом системного программирования имени В.П. Иванникова Российской академии наук (ИСП РАН). Платформа *Talisman* представляет собой набор связанных программных инструментов для автоматизации типовых задач обработки данных (сбор, интеграция, анализ, хранение, визуализация). Платформа обеспечивает быструю разработку аналитических систем, объединяющих информацию из внутренних баз данных и открытых источников сети Интернет.

1 Состояние исследований

Автоматическое создание предметно-ориентированных ГЗ и пополнение их новыми фактами невозможно без автоматического распознавания структуры и содержания ТД. Восстановлением подобного рода семантики занимается такое научное направление как *семантическая интерпретация (аннотирование)* таблиц [10]. Первые работы в данной области были направлены на сопоставление отдельных элементов таблиц с понятиями из ГЗ, онтологии или другого внешнего словаря [11, 12]. Семантическая интерпретация таблиц включает в себя четыре основные задачи [10]:

- *аннотирование ячеек* – сопоставление значений ячеек с сущностями (экземплярами классов) из целевого ГЗ (ЦГЗ);
- *аннотирование столбцов* – сопоставление отдельных столбцов таблицы с семантическими типами (классами) из ЦГЗ;
- *аннотирование отношений между столбцами* – сопоставление связей между столбцами со свойствами (предикатами) из ЦГЗ;
- *аннотирование таблицы* – сопоставление всей таблицы целиком с некоторым классом из ЦГЗ (обнаружение темы таблицы).

Развитие исследований в этой области можно разделить на два основных этапа:

Этап 1 (2010 – 2019 гг.). На данном этапе осуществлялась общая формулировка проблемы семантической интерпретации таблиц, определялись основные цели и задачи. Этап характеризуется появлением работ, направленных в основном на анализ естественно-языкового содержания и контекста таблиц с использованием методов сопоставления онтологий, поиска сущностей (как в глобальных ГЗ, так и в предметно-ориентированных онтологиях), связывания сущностей с элементами Википедии и представления в векторном пространстве сущностей ГЗ [13-16]. Здесь можно отметить итерационные методы на основе использования вероятностных графовых моделей [17, 18] и подходы на основе методов машинного обучения [17, 19, 20].

Этап 2 (2019 г. – по настоящее время) характеризуется ростом числа работ и получением результатов для отдельных задач семантической интерпретации таблиц. Появляются коммерческие решения по определению семантического типа столбцов таблиц, расширяющие функциональность систем подготовки и анализа данных, таких как *Microsoft Power BI*²³, *Trifacta*²⁴ и *Google Looker Studio*²⁵. На данном этапе большую популярность получили подходы, основанные на глубоком машинном обучении (например, *JHSTabEL* [21], *Sato* [22]), в т.ч. с использованием предобученных языковых моделей (например, *TURL* [23], *TaBERT* [24], *TABBIE* [25] и др.). С 2019 года ежегодно проходит соревнование *SemTab*²⁶, направленное на выявление решений для сопоставления ТД с ГЗ, в рамках которого сформулированы основные метрики и критерии оценки систем аннотирования

²² <http://talisman.ispras.ru>.

²³ <https://powerbi.microsoft.com>.

²⁴ <https://www.trifacta.com>.

²⁵ <https://lookerstudio.google.com>.

²⁶ <http://www.cs.ox.ac.uk/isg/challenges/sem-tab/>.

таблиц. Кроме того, появляется множество открытых наборов данных для тестирования производительности таких систем (например, *WebTables*²⁷, *WikiTables*²⁸ и др.).

Таким образом, за последние годы достигнуты значительные успехи в области исследований по автоматическому пониманию ТД. Однако наблюдается разрыв между эффективностью существующих решений на тестах и их применимостью на практике. Это обусловлено отсутствием качественных наборов размеченных обучающих данных и сложностью настройки существующих моделей, подходов и систем для конкретных ПрО и задач. В большинстве подходов отсутствует этап извлечения новых фактов из семантически аннотированных ТД и пополнения ими ЦГЗ. Это обуславливает актуальность разработки методологического и программного обеспечения, направленного на комплексное решение задач семантической интерпретации таблиц и извлечения фактов в конкретных ПрО.

2 Предлагаемый подход

2.1 Существующий задел

В работе [9] предложен подход к автоматическому извлечению конкретных сущностей (фактов) из таблиц и наполнению ими ЦГЗ. Особенностью этого подхода является возможность поддержки автоматизированного восстановления семантики таблиц на основе модели ПрО (онтологии на терминологическом уровне – *TBox*). Благодаря этому возможно задавать явную семантическую аннотацию для отдельных элементов таблицы (столбцов и связей между ними) и извлекать конкретные сущности из ячеек. При этом подход позволяет решить две задачи семантической интерпретации таблиц: аннотирование столбцов и аннотирование отношений между столбцами. Подход имеет ряд ограничений: ориентирован на обработку только реляционных таблиц, представленных в формате *CSV*; использует ГЗ общего назначения *DBpedia* для аннотирования исходных таблиц.

На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая пример семантического аннотирования таблицы и извлечения конкретных сущностей (фактов) из её строки. В примере использована таблица международного рейтинга Ассоциации теннисистов-профессионалов (*АТР*).

Рейтинг АТР. 24 июня 2024 г.

1	 Синнер	Италия	9890
2	 Джокович	Сербия	8360
3	 Алькарас	Испания	8130
4	 Зверев А.	Германия	6905
5	 Медведев	Россия	6445
6	 Рублёв	Россия	4420
7	 Хуркач	Польша	4235

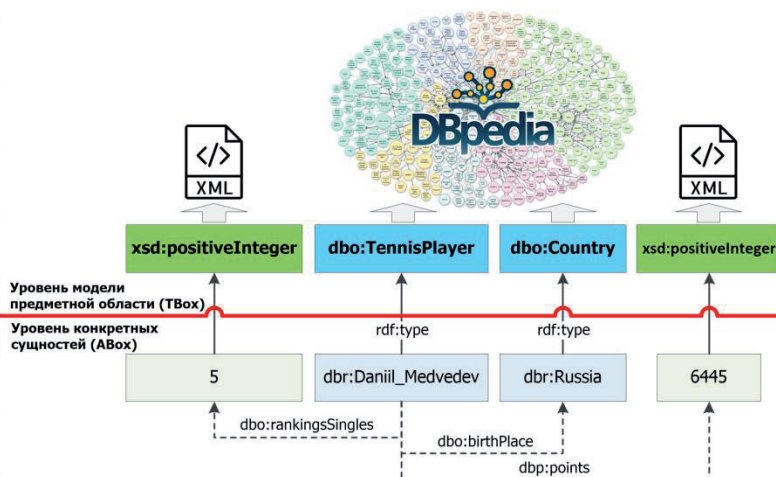


Рисунок 1 – Схема семантического аннотирования таблицы и извлечения фактов на основе подхода из [9]

²⁷ <https://webdatacommons.org/webtables/>.

²⁸ <https://paperswithcode.com/dataset/wikitables-turl/>.

2.2 Постановка задачи

В качестве входных данных рассматриваются вертикальные таблицы, представляющие собой массив данных, расположенных в форме столбцов (вертикальных колонок). Столбец может содержать заголовок (шапку). В таких таблицах столбцы могут быть двух типов:

- *категориальный столбец (столбец именованных сущностей)* содержит названия некоторых именованных сущностей;
- *литеральный столбец* содержит литеральные значения (например, даты, числа, URL-адреса).

Вертикальная таблица может быть ненормализованной, однако должна удовлетворять следующим двум предположениям (ограничениям):

Предположение 1. В обрабатываемых таблицах нет объединённых ячеек.

Предположение 2. Исходные таблицы обрабатываются независимо друг от друга.

В качестве ЦГЗ используется ГЗ платформы *Talisman KG* = $\{DM, F\}$, где *KG* – ГЗ платформы *Talisman*; *DM* – модель ПрО, задающая онтологическую схему с абстрактным описанием понятий и их отношений; *F* – набор конкретных сущностей (фактов), которые типизируются на основе модели ПрО. При этом $DM = \{CT, PT, PVT, BVT, RT\}$, где *CT* – тип концепта (например, *персона*, *организация*, *продукция*); *PT* – тип характеристики (например, *адрес проживания*, *рабочий телефон*, *дата рождения*); *PVT* – тип значения характеристики (например, *адрес*, *дата*, *расстояние*); *BVT* – базовый тип значения характеристики (например, *координаты*, *дата*, *интервал дат*, *строка* и т.д.); *RT* – тип связи, определённый между двумя типами концептов (например, «*работает в*», «*учится в*», «*является*»). $F = \{C, P, AV, R, M\}$, где *C* – концепт (например, *определённый человек*, *конкретная организация* или *продукт*); *P* – характеристика (свойство) концепта, представляющая интерес для конечных пользователей, характеристика может быть идентифицирующей (например, «*название*», которое однозначно характеризует конкретный объект); *AV* – конкретное атомарное значение характеристики (например, *возраст человека* или *номер мобильного телефона*); *R* – связь, задающая отношение между двумя концептами; *M* – упоминание, которое представляет собой фрагмент текста, прямо указывающий на объект, событие или понятие реального / виртуального мира, соответствующее некоторому концепту, характеристике или связи. Пример использования ГЗ *Talisman* приведён на рисунке 2.

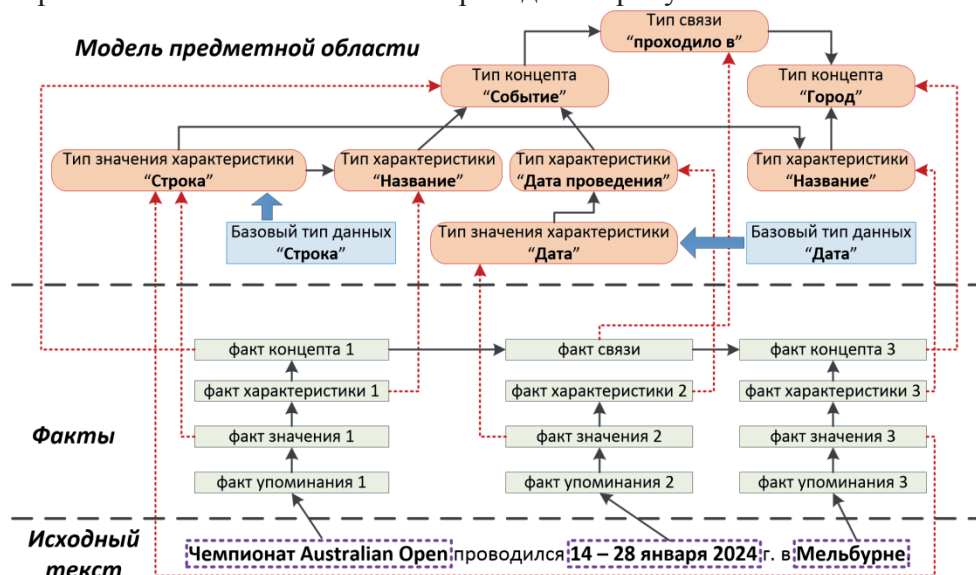


Рисунок 2 – Пример использования графа знаний платформы *Talisman*

Предлагаемый подход реализует семантическое аннотирование столбцов и отношений между ними, которое заключается в сопоставлении столбцам определённых *типов характеристик*, нахождении наиболее подходящего типа концепта на их основе, а также выявление *типов связей* между определёнными типами концептов.

2.3 Этапы подхода

Разработанный подход направлен на обработку *Talisman*-документов в формате *TDM* (*Talisman Document Model*) версии 1.0, которые могут содержать набор вертикальных таблиц. *TDM* используется в *Talisman* для унифицированного представления данных, извлечённых из файлов различных форматов (*PDF*, *DOCX*, *CSV*, *HTML*). Основные этапы предлагаемого подхода представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Основные этапы предлагаемого подхода

Этап 1: Предобработка таблиц. На данном этапе осуществляется распознавание именованных сущностей (*Named Entity Recognition – NER*) для каждой ячейки в исходной таблице. Для этой цели используется дообученная модель *XLM-RoBERTa* [26], которая распознаёт в тексте вхождение некоторых именованных сущностей (персон, компаний, местоположений и др.). Модель дообучалась на наборах данных: *CoNLL 2003 (English)*, *OntoNotes (English)*, *OntoNotes (Chinese)* и *DocRED (English)*. Определённые *NER*-метки именованных сущностей присваиваются каждой ячейке в исходной таблице, характеризуя содержащиеся в ней данные. В зависимости от присвоенной *NER*-метки из ячеек автоматически извлекаются *факты-упоминания* и *факты-значения*, соответствующие типу значения характеристик, определённому в модели ПрО. На данном шаге из ячеек могут быть извлечены предварительные *факты-характеристики* и *факты-концепты*. Данный этап выполняется средствами *семантического анализатора (IE)*, входящего в состав платформы *Talisman*.

Этап 2: Поиск типов кандидатов. Для каждого столбца формируется набор кандидатных типов характеристик, полученных из модели ПрО на основе определённых *фактов-упоминаний* и *фактов-значений*. Столбцы, для которых факты не были извлечены на предыдущем шаге, исключаются из последующей обработки таблицы.

Этап 3: Семантическое аннотирование столбцов. На данном этапе осуществляется выбор наиболее подходящего типа характеристики из множества кандидатов для присвоения его столбцу. Для этого используется специальный агрегированный метод состоящей из комбинации следующих эвристик.

- **Голосование большинством.** Данная эвристика является простым базовым решением, которое заключается в том, что наиболее подходящий тип из набора кандидатов назначается столбцу на основе прямого вывода из тех *фактов-характеристик*, которые уже были извлечены для ячеек столбца средствами семантического анализатора. Т.е. для каждого определённого *факта-характеристики* находится набор возможных типов, которым он соответствует. Далее подсчитывается количество (частота появления) каждого

типа-кандидата. Для приведения данного значения к диапазону от 0 до 1 применяется метод нормализации [27].

- *Сходство по заголовку.* Осуществляется лексическое сопоставление заголовка столбца с названиями типов характеристик из множества кандидатов на основе расстояния Левенштейна и в зависимости от этого расстояния даётся оценка каждому типу кандидата. Если в столбце выделены *факты-концепты* (на этапе предобработки), то название заголовка сравнивается не с названиями типов характеристик из множества кандидатов, а с названиями типов концептов, которые связаны с данными типами характеристик.
- *Группировка характеристик.* Данная эвристика основана на предположении, что в таблице может быть один или несколько категориальных столбцов, в которых семантический анализатор уже извлёк некоторые *факты-концепты* с идентифицирующими *фактами-характеристиками* (например, характеристика «название» для некоторого концепта *организации*). Для каждого категориального столбца подсчитывается количество возможных характеристик, которые располагаются в других не категориальных (литеральных) столбцах и относятся к данному концепту. Далее определяется, какому категориальному столбцу соответствует максимальное количество характеристик. Такому столбцу и столбцам с характеристиками соответствует оценка равная единице.

На основе этих эвристик определяется общая (агрегированная) оценка того, что определённый тип характеристики из набора кандидатов является наиболее подходящим для аннотирования столбца таблицы.

Этап 4. Извлечение фактов. На основе установленных аннотаций столбцов из таблицы извлекаются новые *факты-концепты*, *факты-значения*, *факты-упоминания*, *факты-характеристики* концептов. При этом извлечённые *факты-упоминания* включают значение всей ячейки целиком. Извлечение фактов осуществляется построчно слева направо. *Факты-характеристики* создаются только для самого левого категориального столбца в таблице. Если в таблице в качестве аннотации для нескольких категориальных столбцов определён один и тот же тип характеристики (например, если в таблице есть два столбца с персонами, а все остальные столбцы определены как некоторые характеристики персоны, то только для *фактов-концептов* из первого столбца создаются соответствующие характеристики). При этом идентифицирующие характеристики (названия) извлекаются всегда. На основе извлечённых *фактов-концептов* из таблицы также построчно извлекаются все возможные *факты-связи*, определяющие отношения между двумя концептами. Все извлечённые таким образом факты пополняют ЦГЗ *Talisman*.

2.4 Программная реализация

Предлагаемый подход реализован в форме специального обработчика «*tables-annotator*» на языке *Python* 3.10. Данный обработчик входит в состав подсистемы *Talisman Information Extraction (Talisman-IE)* и представляет собой программное средство (*REST-сервер*), выполняющее обработку входного *Talisman*-документа. Обработчик также получает на вход *JSON*-объект, задающий правила и/или ограничения (конфигурацию) трансформации входных документов в обработчике.

Конфигурация для обработчика «*tables-annotator*»:

```
{
  "table_indices": "<порядковые номера таблиц>",
  "column_indices": {
    "<порядковые номера таблиц>": "<порядковые номера столбцов>",
    ...
  },
  "header_numbers": [ <номер строки 1>, ..., <номер строки n> ]
}
```

Параметры конфигурации, опциональный блок:

- «*table_indices*» – задаёт номера таблиц, встречающихся в исходном документе, которые необходимо исключить из обработки. Для этого указывается строка, в которой через запятую могут быть указаны как отдельные порядковые номера таблиц, так и их диапазоны, например: «1, 2, 3, 5-8, 10». Если в диапазоне указать специальное значение «end», то отсчёт таблиц продолжится автоматически до конца документа, например: «1, 3, 5-end». Отсчёт таблиц в документе начинается с единицы;
- «*column_indices*» – задаёт номера столбцов, которые необходимо исключить из обработки в заданных таблицах. Для этого указывается словарь, где ключ – это номера таблиц или их диапазон, а значение – это номера столбцов или их диапазон, относящиеся к указанным таблицам. Данные номера таблиц и столбцов являются текстовыми значениями и составляются по такому же принципу, как и параметр «*table_indices*»;
- «*header_numbers*» – задаёт список номеров строк, являющихся заголовком таблицы. По умолчанию первая строка таблицы считается заголовком. Номера строк должны быть числовыми значениями, указываются без кавычек. Отсчёт строк в таблице начинается с единицы.

Если необходимо обработать все таблицы из документа и при возможности извлечь из них факты, то конфигурация по умолчанию не задаётся.

3 Пример

Разработанный обработчик «*tables-annotator*» использован для решения задачи автоматизированного наполнения предметно-ориентированных ГЗ платформы *Talisman* новыми фактами, извлечёнными из ТД. Тестирование разработанного обработчика производилось при анализе тестовых таблиц, собранных по категориям: «*сотрудники организации*», «*открытые вакансии*», «*рынок автомобилей*», «*известные учёные*», «*продажа книг*», «*рейтинг теннисистов*». Для формирования тестового набора ТД использовались следующие веб-ресурсы:

- сайты научных и образовательных учреждений (например, ИДСТУ СО РАН²⁹, Иркутский национальный исследовательский технический университет³⁰);
- банк вакансий Иркутской области³¹ и веб-сервис hh (Иркутск)³²;
- веб-сервис «Авито»³³;
- русскоязычная часть Википедии³⁴;
- веб-магазин «Лабиринт»³⁵;
- веб-сервис подсчёта рейтинга теннисистов по версии ATP³⁶.

Данные собирались из веб-таблиц и сохранялись в форме *DOCX*-документов. Среднее количество столбцов в собранных таблицах – 5, а среднее количество строк – 12.

Фрагмент модели ПрО, использованной в процессе семантического аннотирования таблиц и на этапе пополнения ТД, показан на рисунке 4. Данный ГЗ представлен в виде ориентированного графа, доступ к которому осуществляется с помощью интерфейса *GraphQL*³⁷. В модели описаны основные типы концептов, такие как «Персона» (NER-метки: *PERSON*, *PER*), «Организация» (NER-метки: *ORGANIZATION*, *ORG*), «Вакансия» (нет соответствующей NER-метки), «Автомобиль» (NER-метки: *PRODUCT*) и «Книга» (NER-метки: *WORK_OF_ART*).

На рисунке 5 показан пример обработанной исходной таблицы из категории «рейтинг теннисистов» (см. рисунок 1).

²⁹ <http://idstu.irk.ru>.

³⁰ <https://www.istu.edu>.

³¹ https://trudvsem.ru/vacancy/search?_regionIds=3800000000000.

³² <https://irkutsk.hh.ru>.

³³ <https://www.avito.ru>.

³⁴ <https://ru.wikipedia.org>.

³⁵ <https://www.labirint.ru>.

³⁶ <https://www.labirint.ru>.

³⁷ <https://live-tennis.eu/ru/atp-live-ranking>.

Рисунок 4 – Фрагмент модели предметной области из целевого графа знаний *Talisman*

tennis-players-table.docx

Информация по теннисистам:

Теннисист	Страна	Дата рождения	Очки	Место в рейтинге
Янник Синнер	Италия	16 августа 2001	9890	1
Новак Джокович	Сербия	22 мая 1987	8360	2
Карлос Алькарас	Испания	5 мая 2003	8130	3
Александр Зверев	Германия	апреля 1997	6905	4
Даниил Медведев	Россия	11 февраля 1996	6445	5

Чтение | Повторно обработать | Редактировать | [Иконки]

✓ X Название [Александр Зверев]

✓ X Дата рождения [Год, месяц | апр. 1997]

[+ Добавить характеристику]

✓ X [Персона] [OK-1389194 Даниил Медведев]

✓ X Название [Даниил Медведев]

✓ X Дата рождения [Дата | 11.02.1996]

Рисунок 5 – Фрагмент обработанной исходной таблицы из категории «рейтинг теннисистов» на платформе *Talisman*

Для получения экспериментальной оценки семантического аннотирования столбцов таблиц с помощью обработчика «*tables-annotator*» использовались: *точность* (*precision*), *полнота* (*recall*) и *F-мера* (*F1*):

$$precision = \frac{P}{C}, recall = \frac{P}{CN}, F1 = \frac{2 \times precision \times recall}{precision + recall},$$

где P – количество правильно аннотированных столбцов (идеальных аннотаций); C – количество аннотированных столбцов; CN – общее количество столбцов в исходной таблице.

Полученная оценка представлена в таблице 1. Анализ показал определяющее значение этапа распознавания именованных сущностей (Этап 1), в частности, исключение из процесса обработки столбцов, для которых не были определены *NER*-метки (например, для столбца с названием *открытой вакансии* для таблиц из категории «*вакансии*»), что приводит к низким оценкам.

Другими ограничениями разработанного подхода являются:

- обработка только вертикальных таблиц;

Таблица 1 – Экспериментальная оценка для таблиц из разных категорий

Категория таблиц	Точность	Полнота	F-мера
Сотрудники организации	1.00	0.80	0.89
Открытые вакансии	0.20	0.16	0.18
Рынок автомобилей	1.00	0.83	0.91
Известные ученые	0.75	0.75	0.75
Продажа книг	0.80	0.67	0.73
Рейтинг теннисистов	1.00	0.60	0.75
Итоговая оценка	0.79	0.63	0.70

- из ячеек таблицы извлекаются значения (упоминания) целиком (например, не извлекается отдельно «Имя», «Фамилия» и «Отчество» из ячейки с «ФИО»);
- не формируется одно значение из значений нескольких ячеек;
- не рассматриваются сложные составные значения характеристик;
- не извлекаются характеристики связей.

Заключение

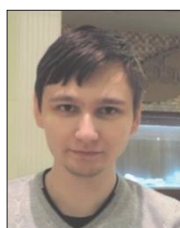
В статье представлен подход к автоматизированной разработке предметно-ориентированных ГЗ на основе семантического аннотирования ТД. Предлагаемый подход включает комбинацию эвристических решений для аннотирования столбцов таблиц и аннотирования отношений между столбцами. В качестве входных данных используются *Talisman*-документы, а в качестве ЦГЗ – ГЗ платформы *Talisman*. Подход реализован в форме специального модуля-обработчика «*tables-annotator*» для *Talisman-IE*.

Список источников

- [1] *Ji S., Pan S., Cambria E., Marttinen P., Yu P.S.* A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition and Applications // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol.33(2). P.494-514. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3070843.
- [2] *Hogan A., Blomqvist E., Cochez M., d'Amato C., Melo G.D., Gutierrez C., Gayo J.E.L., Kirrane S., Neumaier S., Polleres A., Navigli R., Ngomo A.-C.N., Rashid S.M., Rula A., Schmelzeisen L., Sequeda J., Staab S., Zimmermann A.* Knowledge Graphs // ACM Computing Surveys. 2021. Vol.54(4). P.1-37. DOI: 10.1145/3447772.
- [3] *Баклавски К.* Онтологический Саммит 2020. Коммюнике: Графы знаний / К. Баклавски, М. Беннет, Г. Берг-Кросс, Т. Шнайдер, Р. Шарма, Д. Сингер. Перевод с англ. Д. Боргест // Онтология проектирования. 2020. Т.10, №4(38). С.540-555. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-540-555.
- [4] *Гаврилова Т.А., Страхович Э.В.* Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге // Онтология проектирования. 2020. Т.10, №1(35). С.87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [5] *Martinez-Rodriguez J.L., Hogan A., Lopez-Arevalo I.* Information Extraction meets the Semantic Web: A Survey // Semantic Web. 2020. Vol.11. P.255-335. DOI: 10.3233/SW-180333.
- [6] *Zhang S., Balog K.* Web table extraction, retrieval, and augmentation: A survey // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. 2020. Vol.11(2). P.1-35. DOI: 10.1145/3372117.
- [7] *Bonfitto S., Casiraghi E., Mesiti M.* Table understanding approaches for extracting knowledge from heterogeneous tables // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2021. Vol.11(4). e1407. DOI: 10.1002/widm.1407.
- [8] *Lehmberg O., Ritze D., Meusel R., Bizer C.* A large public corpus of web tables containing time and context metadata // In: Proc. of the 25th Int. Conf. Companion on World Wide Web, 2016. P.75-76. DOI: 10.1145/2872518.2889386.
- [9] *Дородных Н.О., Юрин А.Ю.* Подход к автоматизированному наполнению графов знаний сущностями на основе анализа таблиц // Онтология проектирования. 2022. Т.12. №3(45). С.336-352. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-336-352.
- [10] *Liu J., Chabot Y., Troncy R.* From tabular data to knowledge graphs: A survey of semantic table interpretation tasks and methods // Journal of Web Semantics. 2023. Vol.76. 100761. DOI: 10.1016/j.websem.2022.100761.
- [11] *Limaye G., Sarawagi S., Chakrabarti S.* Annotating and Searching Web Tables Using Entities, Types and Relationships. In: Proc. VLDB Endowment. 2010. Vol.3. P.1338-1347. DOI: 10.14778/1920841.1921005.
- [12] *Mulwad V., Finin T., Syed Z., Joshi A.* Using linked data to interpret tables. In: Proc. the First International Conference on Consuming Linked Data (COLD'10). 2010. Vol.665. P.109-120. DOI: 10.5555/2878947.2878957.
- [13] *Bhagavatula C.S., Noraset T., Downey D.* TabEL: Entity Linking in Web Tables. In: Proc. the 14th International Semantic Web Conference (ISWC'2015). 2015. P.425-441. DOI: 10.1007/978-3-319-25007-6_25.
- [14] *Efthymiou V., Hassanzadeh O., Rodriguez-Muro M., Christophides V.* Matching web tables with knowledge base entities: From entity lookups to entity embeddings. In: Proc. of the 16th Int. Semantic Web Conf. (ISWC'2017). 2017. P.260-277. DOI: 10.1007/978-3-319-68288-4_16.
- [15] *Ritze D., Bizer C.* Matching web tables to DBpedia - A feature utility study. In: Proc. of the 20th Int. Conf. on Extending Database Technology (EDBT'17). 2017. P.210-221. DOI: 10.5441/002/EDBT.2017.20.

- [16] **Zhang Z.** Effective and efficient semantic table interpretation using TableMiner+. *Semantic Web*. 2017. Vol.8(6). P.921-957. DOI: 10.3233/SW-160242.
- [17] **Takeoka K., Oyamada M., Nakadai S., Okadome T.** Meimei: An efficient probabilistic approach for semantically annotating tables. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence*. 2019. Vol.33(1). P.281-288. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.3301281.
- [18] **Kruit B., Boncz P., Urbani J.** Extracting Novel Facts from Tables for Knowledge Graph Completion. *Proc. of the 18th Int. Semantic Web Conf. (ISWC'2019). Lecture Notes in Computer Science*. 2019. Vol.11778. P.364-381. DOI: 10.1007/978-3-030-30793-6_21.
- [19] **Chen J., Jimenez-Ruiz E., Horrocks I., Sutton C.** ColNet: Embedding the semantics of web tables for column type prediction. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence*. 2019. Vol.33(1). P.29-36. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.330129.
- [20] **Hulsebos M., Hu K., Bakker M., Zraggen E., Satyanarayan A., Kraska T., Demiralp Ç., Hidalgo C.** Sherlock: A Deep Learning Approach to Semantic Data Type Detection. In: *Proc. of the 25th ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2019. P.1500-1508. DOI: 10.1145/3292500.3330993.
- [21] **Xie J., Lu Y., Cao C., Li Z., Guan Y., Liu Y.** Joint Entity Linking for Web Tables with Hybrid Semantic Matching. *Proc. of the Int. Conf. on Computational Science. Lecture Notes in Computer Science*. 2020. Vol.12138. P.618-631. DOI: 10.1007/978-3-030-50417-5_46.
- [22] **Zhang D., Suhara Y., Li J., Hulsebos M., Demiralp C., Tan W.-C.** Sato: Contextual semantic type detection in tables. In: *Proc. the VLDB Endowment*. 2020. Vol.13(11). P.1835-1848. DOI: 10.14778/3407790.3407793.
- [23] **Deng X., Sun H., Lees A., Wu Y., Yu C.** TURL: Table Understanding through Representation Learning. *Proc. of the VLDB Endowment*. 2020. Vol.14(3). P.307-319. DOI: 10.14778/3430915.3430921.
- [24] **Yin P., Neubig G., Yih W.** TaBERT: Pretraining for Joint Understanding of Textual and Tabular Data. In: *Proc. the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2020. P.8413-8426. DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.745.
- [25] **Iida H., Thai D., Manjunatha V., Iyyer M.** TABBIE: Pretrained Representations of Tabular Data. In: *Proc. the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. 2021. P.3446-3456. DOI: 10.18653/v1/2021.naacl-main.270.
- [26] **Conneau A., Khandelwal K., Goyal N., Chaudhary V., Wenzek G., Guzmán F., Grave E., Ott M., Zettlemoyer L., Stoyanov V.** Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale // In: *Proc. the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2020. P.8440-8451. DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.747.
- [27] **Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu.** Knowledge Graph Engineering Based on Semantic Annotation of Tables. *Computation*. 2023. Vol. 11(9). 175. DOI: 10.3390/computation11090175.

Сведения об авторах



Дородных Никита Олегович, 1990 г. рождения. Окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрННТУ) (2012), к.т.н. (2018). Старший научный сотрудник ИДСТУ СО РАН. В списке научных трудов около 80 работ в области автоматизации создания интеллектуальных систем и баз знаний, получения знаний на основе преобразования концептуальных моделей и электронных таблиц. ORCID: 0000-0001-7794-4462; Author ID (RSCI): 979843; Author ID (Scopus): 57202323578; Researcher ID (WoS): E-8870-2014. nikidorny@icc.ru. ✉.

Юрин Александр Юрьевич, 1980 г. рождения. Окончил Иркутский государственный технический университет (2002), д.т.н. (2022). Заведующий лабораторией Информационно-телекоммуникационных технологий исследования техногенной безопасности ИДСТУ СО РАН, профессор Института информационных технологий и анализа данных ИрННТУ. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. Член редколлегии международного научного журнала «Computer, Communication & Collaboration». В списке научных трудов более 100 работ в области разработки систем поддержки принятия решений, экспертных систем и баз знаний, использования прецедентного подхода и семантических технологий при проектировании интеллектуальных диагностических систем. ORCID: 0000-0001-9089-5730; Author ID (RSCI): 174845; Author ID (Scopus): 16311168300; Researcher ID (WoS): A-4355-2014. iskander@icc.ru.



Поступила в редакцию 22.07.2024, после рецензирования 29.10.2024. Принята к публикации 1.11.2024.



Development of domain knowledge graph based on semantic annotation of tabular data

© 2024, N.O. Dorodnykh ✉, A.Yu. Yurin

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISDCT SB RAS), Irkutsk, Russia

Abstract

The article outlines an approach and software tool for the automated enrichment of domain-oriented knowledge graphs with new facts derived from semantically annotated tabular data. For semantic annotation of table columns, a combination of three heuristic methods is proposed, leveraging named entity recognition in cells, lexical matching, and feature grouping. This approach is implemented as a dedicated handler within the Talisman software platform. An example and experimental evaluation of the approach during the semantic annotation of columns are provided using a test set of tabular data across six thematic categories: "organization employees," "open vacancies," "car model market," "famous scientists," "book sales," and "tennis player rankings." Evaluation metrics included precision, recall, and F-measure, with final results across all six categories as follows: precision - 79%, recall - 63%, F-measure - 70%. These results highlight the potential of the developed approach for enriching domain-oriented knowledge graphs with new facts from semantically annotated tabular data. The limitations of the proposed approach are also discussed from semantically annotated tabular data. The paper also provides a number of limitations of the proposed approach.

Keywords: semantic web, knowledge graph, semantic table interpretation, table annotation, entity extraction, knowledge enrichment, tabular data.

For citation: Dorodnykh NO, Yurin AYu. Development of domain knowledge graph based on semantic annotation of tabular data [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 555-568. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-555-568.

Financial Support: The reported study was supported by the Council for Grants of the President of Russia (grant No. SP-978.2022.5) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project no. 121030500071-2 "Methods and technologies of a cloud-based service-oriented platform for collecting, storing and processing large volumes of multi-format interdisciplinary data and knowledge based upon the use of artificial intelligence, model-driven approach and machine learning").

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

List of figures and tables

Figure 1 - A scheme of semantic table annotation and fact extraction based on the proposed general approach

Figure 2 - An example of the Talisman platform knowledge graph

Figure 3 - Main stages of the proposed approach

Figure 4 - A fragment of a domain model from the Talisman knowledge graph

Figure 5 - A fragment of the processed source table from the "tennis players rankings" category on the Talisman platform

Table 1 - Experimental evaluation for tables from different categories

References

- [1] Ji S, Pan S, Cambria E, Marttinen P, Yu PS. A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition and Applications. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021; 33(2): 494-514. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3070843.
- [2] Hogan A, Blomqvist E, Cochez M, d'Amato C, Melo GD, Gutierrez C, Gayo JEL, Kirrane S, Neumaier S, Polleres A, Navigli R, Ngomo ACN, Rashid SM, Rula A, Schmelzeisen L, Sequeda J, Staab S, Zimmermann A. Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021; 54(4): 1-37. DOI: 10.1145/3447772.

- [3] **Baklawski K, Bennett M, Berg-Cross G, Schneider T, Sharma R, Singer D.** Ontology Summit 2020: Knowledge Graphs. Translation from English D. Borgest [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 4(38): 540-555. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-540-555.
- [4] **Gavrilova TA, Strakhovich EV.** Visual analytical thinking and mind maps for ontology engineering [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [5] **Martinez-Rodriguez JL, Hogan A, Lopez-Arevalo I.** Information Extraction meets the Semantic Web: A Survey. *Semantic Web*. 2020; 11: 255-335. DOI: 10.3233/SW-180333.
- [6] **Zhang S, Balog K.** Web table extraction, retrieval, and augmentation: A survey. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2020; 11(2): 1-35. DOI: 10.1145/3372117.
- [7] **Bonfitto S, Casiraghi E, Mesiti M.** Table understanding approaches for extracting knowledge from hetero-geneous tables. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2021; 11(4): e1407. DOI: 10.1002/widm.1407.
- [8] **Lehmberg O, Ritze D, Meusel R, Bizer C.** A large public corpus of web tables containing time and context metadata. In: *Proc. of the 25th Int. Conf. Companion on World Wide Web (Montréal, Québec, Canada, April 11-15, 2016)*. International World Wide Web Conferences Steering Committee, Republic and Canton of Geneva, Switzerland, 2016: 75-76. DOI: 10.1145/2872518.2889386.
- [9] **Dorodnykh NO, Yurin AY.** An approach and web-based tool for automated knowledge graph filling with entities based on table analysis [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(3): 336-352. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-336-352.
- [10] **Liu J, Chabot Y, Troncy R.** From tabular data to knowledge graphs: A survey of semantic table interpretation tasks and methods. *Journal of Web Semantics*. 2023; 76: 100761. DOI: 10.1016/j.websem.2022.100761.
- [11] **Limaye G, Sarawagi S, Chakrabarti S.** Annotating and Searching Web Tables Using Entities, Types and Relationships. *Proc. the VLDB Endowment*. 2010; 3: 1338-1347. DOI: 10.14778/1920841.1921005.
- [12] **Mulwad V, Finin T, Syed Z, Joshi A.** Using linked data to interpret tables. In: *Proc. the First International Conference on Consuming Linked Data (Shanghai, China, November 8, 2010)*. CEUR-WS, 2010: 109-120. DOI: 10.5555/2878947.2878957.
- [13] **Bhagavatula CS, Noraset T, Downey D.** TabEL: Entity Linking in Web Tables. In: *Proc. the 14th International Semantic Web Conference (Bethlehem, PA, USA, October 11-15, 2015)*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9366. Springer, Cham, 2015: 425-441. DOI: 10.1007/978-3-319-25007-6_25.
- [14] **Efthymiou V, Hassanzadeh O, Rodriguez-Muro M, Christophides V.** Matching web tables with knowledge base entities: From entity lookups to entity embeddings. In: *Proc. of the 16th Int. Semantic Web Conf. (Vienna, Austria, October 21-25, 2017)*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10587. Springer, Cham, 2017: 260-277. DOI: 10.1007/978-3-319-68288-4_16.
- [15] **Ritze D, Bizer C.** Matching web tables to DBpedia - A feature utility study. In: *Proc. of the 20th Int. Conf. on Extending Database Technology (Venice, Italy, March 21-24, 2017)*. OpenProceedings, 2017: 210-221. DOI: 10.5441/002/EDBT.2017.20.
- [16] **Zhang Z.** Effective and efficient semantic table interpretation using TableMiner+. *Semantic Web*. 2017; 8(6): 921-957. DOI: 10.3233/SW-160242.
- [17] **Takeoka K, Oyamada M, Nakadai S, Okadome T.** Meimei: An efficient probabilistic approach for semantically annotating tables. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence (Honolulu, Hawaii, USA, January 27, 2019)*, vol. 33(1). AAAI Press, 2019: 281-288. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.3301281.
- [18] **Kruit B, Boncz P, Urbani J.** Extracting Novel Facts from Tables for Knowledge Graph Completion. *Proc. of the 18th Int. Semantic Web Conf. (Auckland, New Zealand, October 26-30, 2019)*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 11778. Springer, Cham, 2019: 364-381. DOI: 10.1007/978-3-030-30793-6_21.
- [19] **Chen J, Jimenez-Ruiz E, Horrocks I, Sutton C.** ColNet: Embedding the semantics of web tables for column type prediction. *Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence (Honolulu, Hawaii, USA, January 27, 2019)*, vol. 33(1). AAAI Press, 2019: 29-36. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.330129.
- [20] **Hulsebos M, Hu K, Bakker M, Zraggen E, Satyanarayan A, Kraska T, Demiralp Ç, Hidalgo C.** Sherlock: A Deep Learning Approach to Semantic Data Type Detection. In: *Proc. of the 25th ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery & Data Mining (Anchorage, AK, USA, August 4-8, 2019)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 2019: 1500-1508. DOI: 10.1145/3292500.3330993.
- [21] **Xie J, Lu Y, Cao C, Li Z, Guan Y, Liu Y.** Joint Entity Linking for Web Tables with Hybrid Semantic Matching. *Proc. of the Int. Conf. on Computational Science (Amsterdam, The Netherlands, June 3-5, 2020)*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 12138. Springer Cham, 2020: 618-631. DOI: 10.1007/978-3-030-50417-5_46.
- [22] **Zhang D, Suhara Y, Li J, Hulsebos M, Demiralp C, Tan WC.** Sato: Contextual semantic type detection in tables. *Proc. the VLDB Endowment*. 2020; 13(11): 1835-1848. DOI: 10.14778/3407790.3407793.
- [23] **Deng X, Sun H, Lees A, Wu Y, Yu C.** TURL: Table Understanding through Representation Learning. *Proc. of the VLDB Endowment*. 2020; 14(3): 307-319. DOI: 10.14778/3430915.3430921.

- [24] **Yin P, Neubig G, Yih W.** TaBERT: Pretraining for Joint Understanding of Textual and Tabular Data. In: Proc. the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Online, 2020: 8413-8426. DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.745.
 - [25] **Iida H, Thai D, Manjunatha V, Iyyer M.** TABBIE: Pretrained Representations of Tabular Data. In: Proc. the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. Online, 2021: 3446-3456. DOI: 10.18653/v1/2021.naacl-main.270.
 - [26] **Conneau A, Khandelwal K, Goyal N, Chaudhary V, Wenzek G, Guzmán F, Grave E, Ott M, Zettlemoyer L, Stoyanov V.** Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale // In: Proc. the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Online, 2020: 8440-8451. DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.747.
 - [27] **Dorodnykh NO, Yurin AYu.** Knowledge Graph Engineering Based on Semantic Annotation of Tables. *Computation*. 2023; 11(9): 175. DOI: 10.3390/computation11090175.
-

About the authors

Nikita Olegovich Dorodnykh (b. 1990) graduated from the INRTU in 2012, PhD (2018). He is a senior associate researcher at ISDCT SB RAS. Co-author of about 80 publications in the field of computer-aided development of intelligent systems and knowledge bases, knowledge acquisition based on the transformation of conceptual models and tables. ORCID: 0000-0001-7794-4462; Author ID (RSCI): 979843; Author ID (Scopus): 57202323578; Researcher ID (WoS): E-8870-2014. nikidorny@icc.ru. ✉.

Alexander Yurievich Yurin (b.1980) graduated from the INRTU in 2002, Doctor of Science (2022). Head of the laboratory of Information and Telecommunication technologies for Research of Technogenic Security at the Institute of Technical University of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor at the Institute of Information Technologies and Data Analysis at the Irkutsk National Research Technical University. He is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence (RAAI), a member of the Editorial Board of the international scientific journal "Computer, Communication & Collaboration". The list of scientific works includes more than 100 scientific papers in the field of development of decision support systems, expert systems and knowledge bases, application of the case-based reasoning and semantic technologies in the design of diagnostic intelligent systems. ORCID: 0000-0001-9089-5730; Author ID (RSCI): 174845; Author ID (Scopus): 16311168300; Researcher ID (WoS): A-4355-2014. iskander@icc.ru.

Received July 22, 2024. Revised October 29, 2024. Accepted November 1, 2024.



Фокусированный сбор и обработка открытых данных социальных медиа

© 2024, И.О. Датъев ✉, А.М. Фёдоров, А.А. Ревякин

Институт информатики и математического моделирования им. В.А. Путилова
Кольского научного центра РАН (ИИММ КНЦ РАН), Апатиты, Россия

Аннотация

Рассматривается развитие технологий сбора данных и осложняющие этот процесс особенности. Представлены методы фокусировки различного уровня: от управления границами сканирования до использования различных свойств веб-страниц. В данной работе термин «фокусировка» используется для более точной передачи специфических особенностей процесса целенаправленного сбора и обработки открытых данных социальных медиа. Описываемый процесс является многоэтапным, и для его организации используются механизмы адаптивного управления, которые относительно заданной цели имеют разнонаправленный характер. В процессе управления задаваемые ограничения сужаются или расширяются, т.е. фокусируются на заданной цели. Представлен опыт проектирования архитектуры и программной реализации функций информационной системы, позволяющей производить автоматизированный фокусированный сбор и обработку открытых данных социальных медиа.

Ключевые слова: фокусированный веб-сканер, социальная сеть, информационная система, интеллектуальный анализ, методы фокусировки сбора данных.

Цитирование: Датъев И.О., Фёдоров А.М., Ревякин А.А. Фокусированный сбор и обработка открытых данных социальных медиа. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.569-581. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-569-581.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН Министерства науки и высшего образования РФ, темы НИР: «Методология создания информационно-аналитических систем поддержки управления региональным развитием, основанных на формирующем искусственном интеллекте и больших данных» (шифр темы FMEZ-2022-0007, номер государственного учёта 122022800551-0); «Методы и технологии создания интеллектуальных информационных систем для поддержки развития сложных динамических систем с региональной спецификой в условиях неопределённости и риска» (шифр темы FMEZ-2025-0053).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Объём данных и скорость их роста в Интернете привели к трудности фокусированного сбора данных. Первой технологией, позиционированной для сбора данных из глобальной сети, является *web scraping* [1] — технология получения данных путём извлечения их со страниц веб-ресурсов, которая чаще всего представляет собой автоматизированный процесс выполнения программным кодом *GET*-запросов¹ к целевому веб-ресурсу.

Наиболее известными сканирующими виртуальными роботами (ботами) являются: *Xenon*, *BingBot*, *Googlebot*, *Yandex*, *ChatGPT* и др. Кроме того, веб-сканирование предлагается в виде услуги: программное обеспечение как услуга или данные как услуга. Эти услуги позволяют автоматически собирать любые общедоступные данные в Интернете. Примером использования веб-сканирования является мониторинг цен на рынках электронной коммерции, позволяющий клиентам отслеживать ценовые стратегии своих конкурентов. Сканиро-

¹ Методы *HTTP* запроса. <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/HTTP/Methods>.

вание используется для агрегирования данных — процесса, позволяющего извлекать, преобразовывать, анализировать и визуализировать данные из нескольких источников.

Технологии сбора и обработки данных сети Интернет, а также некоторые особенности предоставления данных обсуждались в работах [2, 3]. К особенностям, осложняющим сбор данных, относятся динамически загружаемый и дублирующий контент, а также защита от ботов. Некоторые веб-ресурсы используют для защиты от ботов методы обнаружения и блокировки с помощью определённых признаков [4]: несвойственная человеку скорость взаимодействия с элементами интерфейса; повторяющиеся однотипные действия; использование ссылок-приманок, которые содержатся только в коде веб-сайта и не видны обычным пользователям. Способы блокировки ботов состоят в следующем: запрет доступа к ресурсу с определённого IP-адреса; выдача страницы с сообщением об ошибке вместо страницы с запрошенным контентом; запрет доступа для идентификатора пользователя-злоумышленника при попытке авторизации на веб-ресурсе.

Дублирование веб-страниц в пределах домена бывает частичным или полным [3]. Полное дублирование связано с использованием инструментов управления данными на сайте и появлением документов-дублей, имеющих различный URL. Частичное дублирование встречается при применении инструментов управления данными на сайте (использование фильтрации и сортировок) — наиболее сложное для выявления, особенно если дублированные фрагменты текста перемешаны между собой или с фрагментами уникального текста.

1 Методы фокусировки при обработке веб-документов

Фокусированный сканер — это сканер, который собирает веб-страницы, удовлетворяющие определённому свойству, расставляя приоритеты на границе сканирования и управляя процессом исследования гиперссылок. Ограничения могут быть простыми и чёткими, например, сканировать страницы только определённого домена, или нечёткими, например, сканировать страницы о футболе или сканировать страницы с большими значениями рейтинга. Термин «фокусированный сканер» вместе с классификатором текста предложены в работе [5], а машинное обучение для определения границ сканирования применено в [6]. Машинное обучение и сбор данных об определённой предметной области (ПрО), в т.ч. с использованием графовых моделей, развивались в работах [7, 8].

Помимо, управления границами сканирования, для фокусировки могут использоваться и другие свойства веб-страниц. Темы страницы — важное свойство, которое привело к появлению термина «тематический сканер» [6, 9]. Сбор данных также может производиться по заданной эмоциональной окраске текста — тональности [10]. В [11] показана важность информации о пространственном расположении объектов на веб-странице. В [12] выделены три типа сегментации: визуальная, лингвистическая и денситометрическая. Визуальная сегментация [13] на основе алгоритма машинного зрения различает разделы веб-страницы. Лингвистическая сегментация основана на использовании языковых единиц (слов, слогов, предложений) в качестве статистических показателей для выявления структурных закономерностей в тексте. Денситометрическая сегментация [12] присваивает каждому веб-ресурсу плотность текста (определяется как результат деления количества токенов на количество строк). Денситометрическая сегментация работает хорошо, как визуальная сегментация, и быстро, как лингвистическая.

В *семантическом сканере* для фокусировки используется информация о семантике, чаще всего — онтологии ПрО для представления тематических карт и связывания веб-страниц с соответствующими онтологическими концепциями, что позволяет производить категоризацию веб-документов [14, 15]. Онтологии могут автоматически обновляться в процессе ска-

нирования [16]. Однако при использовании онтологии ПрО необходимо привлечение экспертов ПрО для формирования концептов и отношений. В работе [17] предложено вместо онтологии ПрО выполнять фокусировку с помощью схемы представления знаний, которая генерируется для каждого веб-документа и хранится в базе знаний [18]. Схема представления знаний менее выразительна, чем онтология ПрО (не определяет никаких правил или ограничений в отношении данных), но не зависит от ПрО и сохраняет преимущество использования технологий *Semantic Web*², таких как *Resource Description Framework (RDF) Schema* - набор классов и свойств для модели представления знаний, составляющий основу для описания онтологий с использованием расширенного *RDF*-словаря для структуры *RDF*-ресурсов³.

Целью применения методов фокусировки является повышение объёма обладающих определёнными характеристиками собранных данных и сокращение времени сбора с учётом необходимости обхода блокировок со стороны администраторов веб-ресурсов. В фокусированных сканерах для повышения эффективности сбора данных всё чаще используются алгоритмы из области искусственного интеллекта⁴.

2 Система фокусированного сбора открытых данных

Концептуальная схема технологии фокусировки сбора данных представлена на рисунке 1.

Разработанная информационная система (ИС) позволяет собирать данные с определённых веб-ресурсов (социальных медиа), генерировать отчёты различных типов, сравнивать данные друг с другом и масштабировать. ИС можно разделить на две части: серверную и интерфейсную.



Рисунок 1 – Концептуальная схема технологии фокусировки сбора данных
*(A) обозначает переход к детальному представлению методов фокусировки данных – показана на рисунке 5)

2.1 Архитектура ИС

ИС представляет собой несколько взаимодействующих через сеть компонентов. Каждый компонент выполнен в виде отдельного докер-контейнера⁵, что позволяет размещать компоненты на различных физических серверах. Все используемые контейнеры запускаются на одном сервере. Положительным эффектом от использования докер-контейнеров является возможность оперативно развернуть систему на любом физическом сервере, имеющем до-

² *Semantic Web Activity*. <http://www.w3.org/2001/sw>.

³ *Resource Description Framework (RDF) Schema Specification*. <http://www.w3.org/TR/2000/CR-rdf-schema-20000327>.

⁴ *70 Top AI Web Crawler Tools*. <https://topai.tools/s/web-crawler>.

⁵ Докер-контейнер — стандартизированный, изолированный и портативный пакет программного обеспечения.

статочной оперативной и дисковой памяти. Исключение составляет база данных (БД) *MongoDB*⁶, расположенная на сервере ИИММ КНЦ РАН.

Формирование каждого контейнера задаётся инструкциями в *Dockerfile*, который определяет структуру и конфигурацию контейнера. Этот файл содержит все необходимые инструкции для создания и настройки образа контейнера, включая установку зависимостей, настройку среды выполнения и другие параметры. Такой подход обеспечивает изоляцию и независимость каждого компонента системы, а также упрощает процесс их разработки, тестирования и серверного размещения.

В настоящее время система размещается на двух отдельных физических серверах. На основном сервере развернуты все компоненты системы и организован доступ для администраторов верхнего уровня. На резервном сервере организован доступ для работы операторов системы, в функции которых не входит конфигурирование системы, а только работа с потоками собираемых данных. Различная функциональная компоновка серверов обеспечивается запуском нужного подмножества докер-контейнеров.

2.2 Основные компоненты ИС

Серверная часть приложения реализована на основе библиотеки для создания веб-серверов. В процессе работы автоматически генерируется и разворачивается инструмент документирования и тестирования.

База данных. В ИС использована СУБД *MongoDB*. БД содержит следующие коллекции:

- *Users* – список зарегистрированных пользователей;
- *GlobalSettings* – глобальные настройки системы;
- *Tasks* – список задач;
- *Dialogs* – список диалогов (чатов) из социальных сетей;
- *DialogsHistory* – список историй взаимодействия с коллекцией *Dialogs*;
- *Posts* – список постов из социальных сетей;
- *Messages* – список исходящих сообщений, отправленных через систему;
- *Notifications* – список оповещений для пользователей (*Users*);
- *Themes* – список тем для поиска ключевых слов / фраз внутри постов (*Posts*).

Все коллекции представляют собой набор данных, связанных друг с другом с помощью уникальных идентификаторов.

Selenium – инструмент для автоматизации действий веб-браузера, используется для автоматизированного тестирования приложений. *Selenium* разворачивает виртуальный браузер *Firefox* на сервере, позволяет сохранять данные сессии, эмулировать действия реального пользователя посредством управления курсором и клавиатурой. В результате из веб-документа выделяется необходимый контент и записывается в БД.

Клиентская часть представляет собой оптимизированное веб-приложение для отображения интерфейсов системы.

Варианты использования ИС представлены на рисунке 2. В ИС разработаны и программно реализованы следующие роли пользователей: Админ, Суперадмин, Наблюдатель.

Админ доступны все инструменты для конфигурирования мониторинга социальных сетей. Роль Суперадмина расширена относительно Админ управлением пользователями – создание, удаление, назначение ролей пользователям, а также конфигурирование мониторинга каждого из них. Роль Наблюдателя позволяет просматривать результаты мониторинга, сконфигурированного для Наблюдателя пользователем Суперадмин.

⁶ *MongoDB* — документоориентированная система управления базами данных (СУБД) с открытым исходным кодом.

2.3 Интеграция ИС с социальными медиа

При проектировании программного модуля эмуляции действий пользователя для сбора данных социальных сетей выделены следующие этапы (рисунок 3):

- 1) *Авторизация пользователя* в мессенджере. После ввода пароля может быть получен QR-код или запрошен код безопасности. После успешной авторизации создаётся и сохраняется сессия веб-браузера с авторизованными данными пользователя.
- 2) *Получение списка диалогов*. Загружаются все диалоги пользователя, для каждого диалога извлекается его название и добавляется в список.
- 3) *Получение сообщений из диалогов*. Извлекаются текстовые сообщения и добавляются в список для каждого диалога.
- 4) *Завершение сессии*.

Программный модуль эмуляции пользователя производит временные задержки между различными действиями пользователя. Это необходимо для учёта технических особенностей реализации социальных сетей. Разные этапы каждой задачи занимают разное количество времени в зависимости от характеристик и текущего состояния Интернет-соединения, производительности и загруженности серверов социальной сети, количества задач, производительности и загруженности серверов, на которых развернута ИС. Основные изменяемые модельные параметры эмуляции соответствуют паузам на рисунке 3. Варьирование значениями этих параметров позволяет повысить процент успешно собранных данных и избежать блокировок со стороны социальной сети. Дополнительная сложность сбора данных с помощью эмуляции действий пользователя заключается в периодической подмене кодовых имен объектов, размещённых на веб-странице, производимой социальной сетью. Эта особенность преодолевается посредством использования неизменных названий объектов для последующей идентификации вспомогательных веб-объектов.

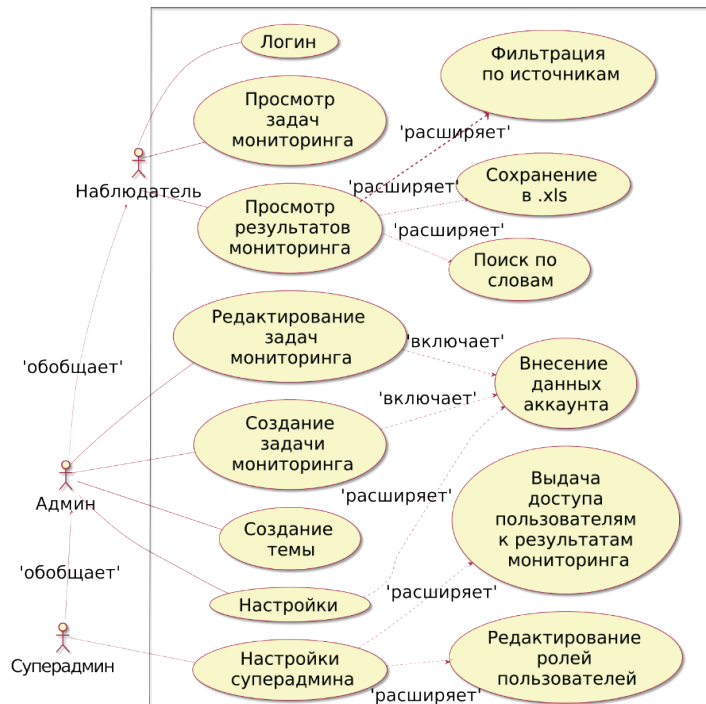


Рисунок 2 – Диаграмма использования системы фокусированного сбора и обработки открытых данных

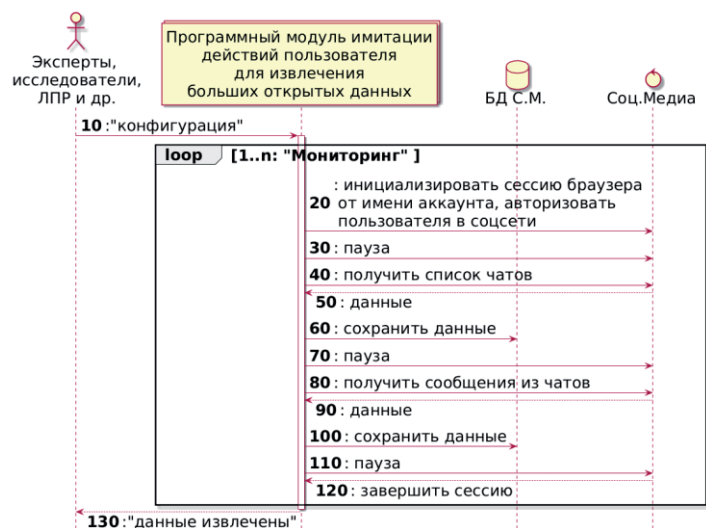


Рисунок 3 – Диаграмма последовательности. Логика работы модуля эмуляции действий пользователя

Пример интерфейса ИС в виде фрагмента ленты сообщений социальных сетей представлен на рисунке 4.

3 Проектирование и реализация алгоритмов фокусировки

Разработанная ИС предназначена для организации мониторинга информационного пространства различных веб-ресурсов. Модульная архитектура системы позволяет при необходимости нарастить её потенциал и расширить границы обрабатываемого информационного пространства. Возможности ИС нацелены на работу с определённым множеством ресурсов.

На рисунке 5 представлены методы фокусировки сбора данных (см. рисунок 1).

Классификация алгоритмов фокусировки. Для конфигурации описываемой ИС применены следующие варианты фокусировки:

- 1 ограничение области поиска: выбранное подмножество социальных сетей;
- 2 ограничение объёма извлекаемых данных: только открытые источники;
- 3 анализ адресов (ссылок): работа только с подходящими адресами;
- 4 тематическая фокусировка: ключевые слова и тематические группы слов.

Используемые варианты обеспечивают ограничение обрабатываемого информационного пространства. Первые два - концептуальные - задают общие ограничения, которые на этапе проектирования системы влияют на выбор потенциально используемых в работе подходов, инструментов и технологий. Третий и четвёртый уровни - оперативные - предполагают получение эффектов от фокусировки в процессе непосредственной работы ИС, сконфигурированной с теми или иными параметрами. Перечисленные способы фокусировки используются в данной работе и представлены на рисунке 6 в виде *UML*-диаграммы вариантов использования.

Фокусировка на открытых данных социальных медиа определяется на этапе проектирования архитектуры системы. Фокусировка на заданной тематической повестке (например, «ЖКХ» или «здравоохранение») или на заданном уровне тональности (например, «позитив») определяется конкретной конфигурацией модулей системы, непосредственно обрабатывающих данные.

Эффекты от фокусировок можно использовать для уменьшения объёмов сохраняемых данных, увеличения скорости их обработки и для фильтрации данных перед их размещением в разных хранилищах или для обработки разными агентами.

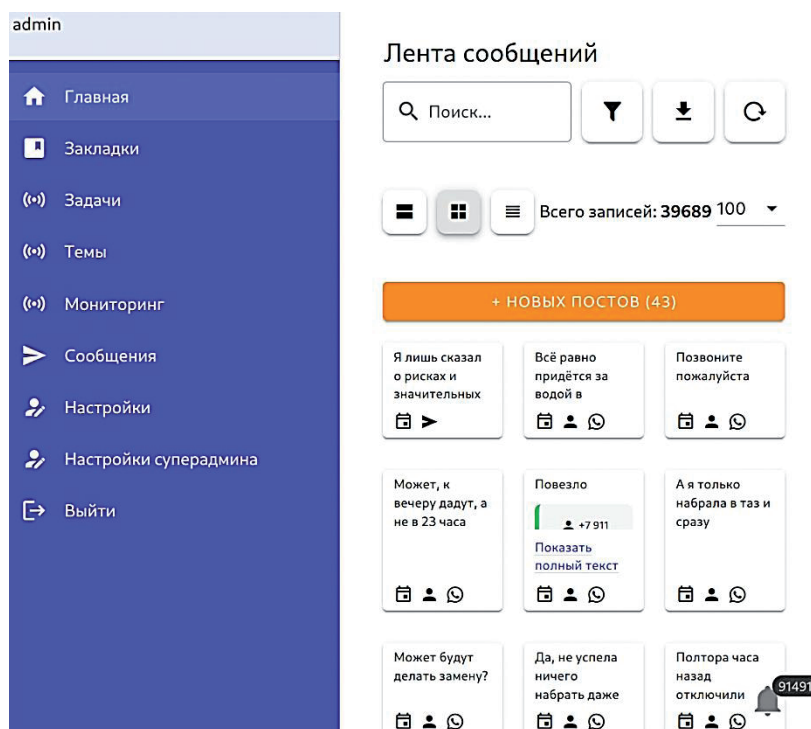


Рисунок 4 – Фрагмент клиентского приложения ленты сообщений социальных сетей

Первая фокусировка – социальные сети. В рамках решаемых задач запланирован тематический анализ высказываний пользователей сети Интернет, которые они оставляют в виде реплик в чатах и комментариев к публикациям. Существует много виртуальных площадок, на которых пользователи могут обмениваться сообщениями. Наилучшими источниками для получения таких данных являются социальные сети и мессенджеры. Для отработки технологий мониторинга сформированы структуры данных, программные и пользовательские интерфейсы, позволяющие организовать единый подход к различным источникам.

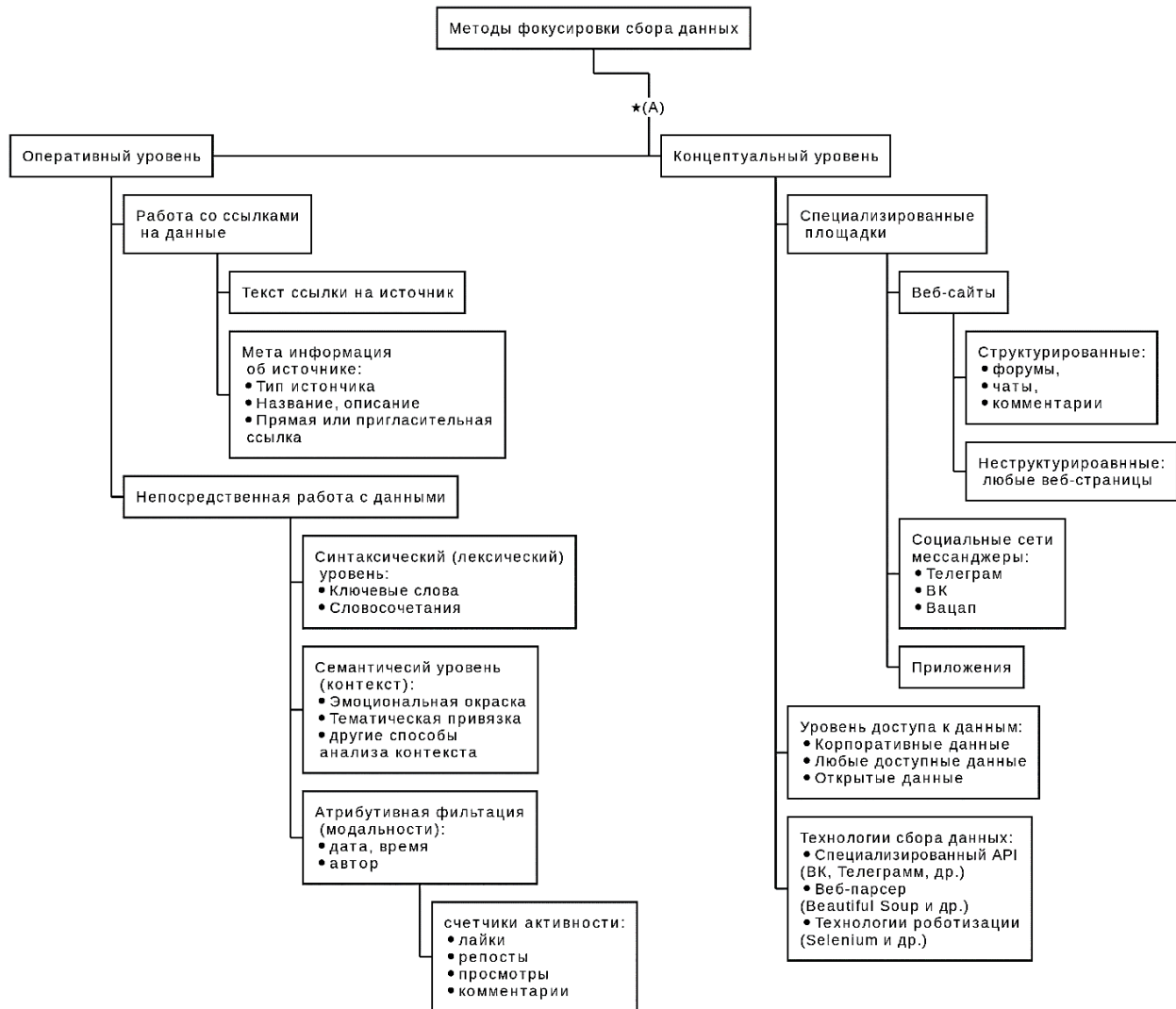


Рисунок 5 – Методы фокусировки сбора данных

Вторая фокусировка – открытые источники. Задача по исследованию социального дискурса на основе сообщений в социальных сетях имеет свою специфику. Такие исследования ориентированы на то, что сообщения в виртуальном пространстве социальных сетей отражают реальные настроения в обществе. Однако в общем случае виртуальное информационное пространство предполагает наличие в нём, помимо людей, виртуальных акторов (ботов или технических аккаунтов), действующих по заранее заданным алгоритмам и преследующих определённые цели. Количество и активность этих виртуальных сущностей может формировать повестку дискурса, статистически влияя на голоса реальных пользователей. Потенциально подвержены большему влиянию виртуальных акторов открытые площадки.

Наличие процедур проверки подлинности участников дискуссии сокращает влияние виртуальных факторов на реальный дискурс. Организация работы виртуальной площадки невозможна без работы средств автоматизации, поэтому степень открытости виртуальной площадки пропорциональна степени потенциального влияния на неё этих средств.

Фокусировка на открытых источниках позволяет направить работу ИС на извлечение и обработку данных из этих источников, и не тратить силы и средства на преодоление систем защиты и организацию других действий по проникновению на закрытые площадки.

В дополнение к концептуальной фокусировке используются оперативные алгоритмы фокусировки. В частности, предусматривается проверка источников из заданного списка на предмет соответствия ряду условий. В простом случае — это заранее сформированный перечень ссылок. В ИС также используется задание списка источников в виде сохранённых в аккаунте подписок на эти источники, который со временем может изменяться. Оперативные алгоритмы фокусировки учитывают эту особенность следующими способами.

Проверка типа ресурса. Типология ресурсов определяет размещаемый пользовательский контент. В случае с изучением социального дискурса интерес представляют ресурсы, на которых пользователи имеют возможность от своего имени публиковать собственные тексты и писать к ним комментарии.

Проверка прямой ссылки на ресурс. На некоторых виртуальных площадках доступ к определённым ресурсам осуществляется только через прямое приглашение или по пригласительной ссылке. Проверка сочетания указанных факторов позволяет провести фокусировку мониторинга на таких источниках.

Проверка названий ресурсов. В рамках задачи по исследованию дискурса на виртуальных площадках ставятся подзадачи, связанные с тематической фильтрацией обрабатываемых источников. В большинстве случаев названия таких источников отражают их тематическую направленность. В зависимости от первоначального списка источников данный способ фокусировки позволяет потенциально сократить время обработки данных.

Основным эффектом от применения описанного вида фокусировки является сокращение количества фактически обрабатываемых ресурсов, что приводит к экономии времени, затрачиваемого на их мониторинг.

Третья фокусировка – тематическая фильтрация. Данный способ фокусировки основан на лексическом анализе текстов. На базовом уровне темы задаются с помощью ключевых слов и их групп – тематических наборов. Наличие одного из слов в анализируемом тексте относит его к соответствующей теме. Одной из сложностей в данном случае является задание как можно более полного множества словоформ, отражающих отслеживаемую тему. На основе тематической окраски текстов производится дальнейшая их обработка - сохранение в БД, запись в ленту сообщений и оповещений, визуальная подсветка при отображении и др.

В общем случае, аналогично тематической фильтрации, можно организовать фокусировку по любым другим поставленным в соответствие тексту атрибутивным данным. Одной из особенностей текстов социальных сетей является их тесная связь с дополнительной информацией: автор, дата публикации, счётчики активности (комментарии, просмотры и др.), мультимедийные приложения и др.



Рисунок 6 – Диаграмма использования.
Конфигурирование фокусировки сбора данных

Компоненты текстов и их атрибуты в различных сочетаниях широко используются для кластеризации, классификации и других способов дифференциации текстов. Например, некоторые алгоритмы тематического моделирования используют в своей работе модальности текста, т.е. их сопутствующие атрибуты [19]. В результате финальные тематические распределения вычисляются на основе текстов и на основе их атрибутов в соответствии с заданными пропорциями. В данной работе представленная фокусировка применялась только в отношении тематической фильтрации текстов социальных сетей. Полученные в данном исследовании результаты представлены на рисунке 7.

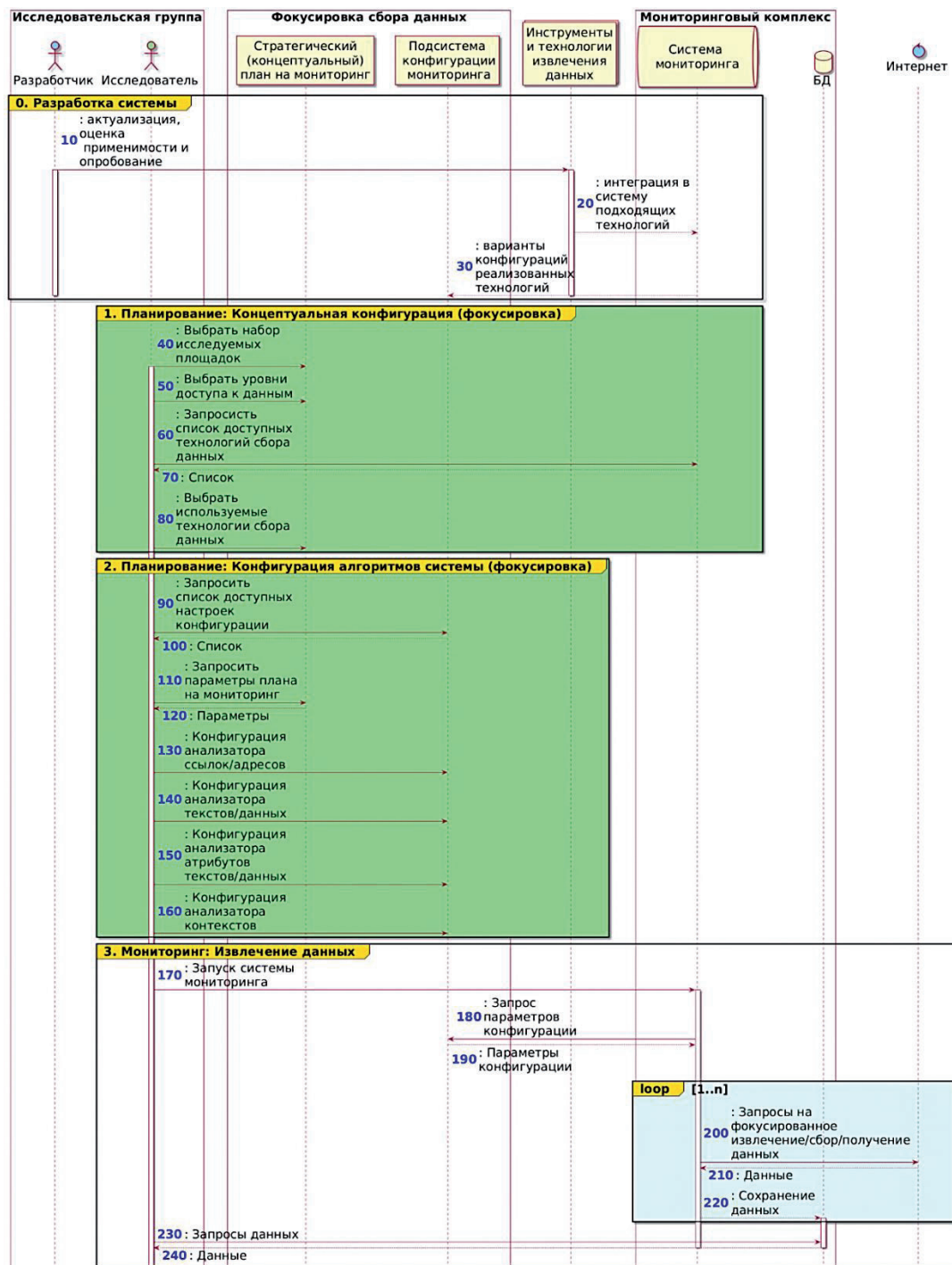


Рисунок 7 – Схема фокусировки сбора данных

Заключение

Представлен опыт проектирования ИС фокусированного сбора открытых данных онлайн-новых социальных сетей. Разработаны и реализованы алгоритмы фокусированного сбора данных, которые представлены в многоуровневой форме.

Список источников

- [1] *Boeing G., Waddell P.* New Insights into Rental Housing Markets across the United States: Web Scraping and Analyzing Craigslist Rental Listings // Journal of Planning Education and Research. 2016. DOI:10.1177/0739456X16664789. arXiv:1605.05397.
- [2] *Кулешов С.В., Зайцева А.А., Левашкин С.П.* Технологии и принципы сбора и обработки неструктурированных распределенных данных с учетом современных особенностей предоставления медиа-контента // Информатизация и связь. 2020. № 5. С.22-28. DOI 10.34219/2078-8320-2020-11-5-22-28. EDN FMQNTT.
- [3] *Кулешов С.В., Зайцева А.А.* Феноменологическое описание процессов сбора и обработки интернет-документов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т.66, № 12. С.1002-1010. DOI:10.17586/0021-3454-2023-66-12-1002-1010.
- [4] *Москаленко А.А., Лапоница О.Р., Сухомлин В.А.* Разработка приложения веб-скрапинга с возможностями обхода блокировок // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т.15, №2. С.413-420. DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.413-420.
- [5] *Soumen Chakrabarti.* Focused Web Crawling, in the Encyclopedia of Database Systems. Dynamic topic models // In: ICML '06: Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. New York, NY, USA, ACM, 2006. P.113–120. DOI:10.1145/1143844.1143859.
- [6] *Soumen Chakrabarti, Martin van den Berg, Byron Dom.* Focused crawling: a new approach to topic-specific Web resource discovery // Computer Networks, Volume 31, Issues 11–16, 1999, P.1623-1640. DOI: 10.1016/S1389-1286(99)00052-3.
- [7] Using Reinforcement Learning to Spider the Web Efficiently / Jason Rennie and Andrew McCallum. ICML 1999.
- [8] *Diligenti M., Coetzee F., Lawrence S., Giles C.L., and Gori M.* (2000). Focused crawling using context graphs Archived 2008-03-07 at the Wayback Machine // In Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Databases (VLDB). P.527-534, Cairo, Egypt.
- [9] *Taylan D., Poyraz M., Akyokus S. and Ganiz M.C.* Intelligent focused crawler: Learning which links to crawl // 2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Istanbul, Turkey. 2011. P.504-508. DOI: 10.1109/INISTA.2011.5946150.
- [10] *Tianjun Fu, Ahmed Abbasi, Daniel Zeng, and Hsinchun Chen.* 2012. Sentimental Spidering: Leveraging Opinion Information in Focused Crawlers // ACM Trans. Inf. Syst. 30, 4, Article 24 (November 2012), 30 pages. DOI: 10.1145/2382438.2382443.
- [11] *Yu Y.B., Huang S.L., Tashi N., Zhang H., Lei F., Wu L.Y.* A Survey about Algorithms Utilized by Focused Web Crawler // J. Electron. Sci. Technol. 2018, 16, 129. DOI:10.11989/JEST.1674-862X.70116018.
- [12] *Kohlschütter C., Nejdl W.* A densitometric approach to web page segmentation // Proceedings of the 17th ACM conference on Information and knowledge management, New York. 2008. P.1173-1182.
- [13] *Sun Y., Jin P., Yue L.* A Framework of a Hybrid Focused Web Crawler // Future Generation Communication and Networking Symposia, 2008. FGCNS '08. Second International Conference, Sanya, 2008. P.50-53.
- [14] *Hassan T., Cruz C., Bertaux A.* Ontology-based Approach for Unsupervised and Adaptive Focused Crawling // In Proceedings of the International Workshop on Semantic Big Data, Chicago, IL, USA, 19 May 2017. ACM: New York, NY, USA, 2017. P.21–26.
- [15] *Boukadi K., Rekik M., Rekik M., Ben-Abdallah H.* FC4CD: A new SOA-based Focused Crawler for Cloud service Discovery // Computing 2018, 100, P.1081-1107. DOI:10.1007/s00607-018-0600-2.
- [16] *Dong H., Hussain F.K.* SOF: A semi-supervised ontology-learning-based focused crawler // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 25(12). (August 2013). P.1623-1812.
- [17] *Hernandez J., Marin-Castro H.M., Morales-Sandoval M.* A Semantic Focused Web Crawler Based on a Knowledge Representation Schema // Applied Sciences. 2020; 10(11):3837. DOI:10.3390/app10113837.
- [18] *Krótkiewicz M., Wojtkiewicz K., Jodłowiec M.* Towards Semantic Knowledge Base Definition // In Biomedical Engineering and Neuroscience / Huneke, W.P., Paszkiel, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018. P.218–239.
- [19] *Датъев И.О., Федоров А.М.* Аддитивная регуляризация при тематическом моделировании текстов сообществ онлайн-новых социальных сетей. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.186-199. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-186-199.

Сведения об авторах



Датьев Игорь Олегович 1981 г. рождения. Окончил Кольский филиал Петрозаводского государственного университета (2004). К.т.н. (2011). В ИИММ КНЦ РАН старший научный сотрудник, учёный секретарь. Автор более 100 научных работ в области разработки моделей и технологий для региональных информационно-коммуникационных систем. Author ID (РИНЦ): 180256; Author ID (Scopus): 56070103900; Researcher ID (WoS): J-1839-2018. i.datyev@ksc.ru. ✉

Фёдоров Андрей Михайлович 1978 г. рождения. Окончил Кольский филиал Петрозаводского государственного университета (2000). К.т.н. (2005). В ИИММ КНЦ РАН ведущий научный сотрудник, заместитель директора по научной работе (с 2017 г.). Доцент кафедры информатики и вычислительной техники в филиале Мурманского арктического университета (МАУ) в г. Апатиты. Область научных интересов сосредоточена на разработке моделей и технологий информационной поддержки для регионального управления. Author ID (RSCI): 4285-9780; Author ID (Scopus): 57203929412; Researcher ID (WoS): D-5859-2016. a.fedorov@ksc.ru.



Ревякин Андрей Андреевич 1992 г. рождения. Окончил Запорожский национальный технический университет (2014). Магистрант первого курса филиал МАУ в г. Апатиты по специальности 09.04.02 Информационные системы и технологии. Программист ИИММ КНЦ РАН. Руководитель отдела *Frontend* разработки в компании *Happy Job* (Москва). Область научных интересов сосредоточена в разработке информационных систем с большими массивами данных, открытыми источниками информации. Author ID (RSCI): Author ID (ORCID): 0009-0006-3170-3990. andrewreviakin@yandex.ru.

Поступила в редакцию 08.07.2024, после рецензирования 02.10.2024. Принята к публикации 28.10.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-569-581

Focused collection and processing of open social media data

© 2024, I.O. Datyev ✉, A.M. Fedorov, A.A. Reviakin

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Center RAS (IIMM KSC RAS), Apatity, Russia

Abstract

The article addresses the development of data collection technologies and the complexities that challenge this process. Methods for focusing at various levels are discussed, ranging from managing scanning boundaries to leveraging diverse properties of web pages. Here, the term "focusing" is used to accurately reflect the specific characteristics of targeted data collection and processing of open social media data. This process is multi-stage, employing adaptive control mechanisms that adjust dynamically toward the specified objective. During control, these defined constraints are either narrowed or broadened to align with the target goal. The article also presents insights from the design of an information system's architecture and software, enabling automated, focused collection and processing of open social media data.

Keywords: *focused web crawler, social network, information system, intelligent analysis, data collection focusing methods.*

For citation: Datyev IO, Fedorov AM, Reviakin AA. Focused collection and processing of open social media data [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 569-581. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-569-581.

Financial Support: The work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Topic title: Methodology for creating information and analytical systems to support the management of regional development based on formative artificial intelligence and big data (reg.n. 122022800551-0). Subsequent topic title: Methods

and technologies for creating intelligent information systems to support the development of complex dynamic systems with regional specifics under conditions of uncertainty and risk (FMEZ-2025-0053).

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

List of figures

Figure 1 – Conceptual diagram of focused data collection technology

Figure 2 – Use case diagram. Information system for focused scrapping, processing and analyzing of open data

Figure 3 – Sequence diagram. Logic of operation of the software module for emulating user actions

Figure 4 – Fragment of the client application of the social networking feed

Figure 5 – Methods for focusing data collection

Figure 6 – Use case diagram. Configuring data collection focus

Figure 7 – Data collection focus scheme

References

- [1] **Boeing G, Waddell P.** New Insights into Rental Housing Markets across the United States: Web Scraping and Analyzing Craigslist Rental Listings. *Journal of Planning Education and Research*. 2016. DOI:10.1177/0739456X16664789. arXiv:1605.05397.
- [2] **Kuleshov SV, Zaitseva AA, Levashkin SP.** Technologies and principles of collecting and processing unstructured distributed data taking into account modern features of providing media content [In Russian]. *Informatization and Communication*. 2020; 5: 22-28. DOI 10.34219/2078-8320-2020-11-5-22-28. EDN FMQNTT.
- [3] **Kuleshov SV, Zaitseva AA.** Phenomenological description of the processes of collecting and processing Internet documents [In Russian]. *Izv. universities Instrumentation*. 2023; 66(12): 1002-1010. DOI:10.17586/0021-3454-2023-66-12-1002-1010.
- [4] **Moskalenko AA, Laponina OR, Sukhomlin VA.** Development of a web scraping application with the ability to bypass blocking [In Russian]. *Modern information technologies and IT education*. 2019; 15(2): 413-420. DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.413-420.
- [5] **Chakrabarti S.** Focused Web Crawling, in the Encyclopedia of Database Systems. Dynamic topic models. In: *ICML '06: Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. New York, NY, USA, ACM. 2006. P.113–120. DOI:10.1145/1143844.1143859.
- [6] **Chakrabarti S, van den Berg M, Dom B.** Focused crawling: a new approach to topic-specific Web resource discovery. *Computer Networks*, 1999; 31(11–16): 1623-1640. DOI: 10.1016/S1389-1286(99)00052-3.
- [7] Using Reinforcement Learning to Spider the Web Efficiently. Jason Rennie and Andrew McCallum. *ICML 1999*.
- [8] **Diligenti M, Coetzee F, Lawrence S, Giles CL, Gori M.** Focused crawling using context graphs Archived 2008-03-07 at the Wayback Machine. In *Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Databases (VLDB)*, Cairo, Egypt. 2000. P. 527-534.
- [9] **Taylan D, Poyraz M, Akyokus S, Ganiz MC.** Intelligent focused crawler: Learning which links to crawl. 2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Istanbul, Turkey. 2011. P. 504-508. DOI: 10.1109/INISTA.2011.5946150.
- [10] **Tianjun Fu, Ahmed Abbasi, Daniel Zeng, Hsinchun Chen.** 2012. Sentimental Spidering: Leveraging Opinion Information in Focused Crawlers. *ACM Trans. Inf. Syst.* 2012; 30, 4, Article 24. 30 p. <https://doi.org/10.1145/2382438.2382443>.
- [11] **Yu YB, Huang SL, Tashi N, Zhang H, Lei F, Wu LY.** A Survey about Algorithms Utilized by Focused Web Crawler. *J. Electron. Sci. Technol.* 2018; 16, 129. DOI:10.11989/JEST.1674-862X.70116018.
- [12] **Kohlschütter C, Nejdl W.** A densitometric approach to web page segmentation. *Proceedings of the 17th ACM conference on Information and knowledge management*, New York. 2008. P. 1173-1182.
- [13] **Sun Y, Jin P, Yue L.** A Framework of a Hybrid Focused Web Crawler. *Future Generation Communication and Networking Symposia 2008 (FGCNS '08)*. Second International Conference, Sanya. 2008. P. 50-53.
- [14] **Hassan T, Cruz C, Bertaux A.** Ontology-based Approach for Unsupervised and Adaptive Focused Crawling. In *Proceedings of the International Workshop on Semantic Big Data*, Chicago, IL, USA, 19 May 2017. ACM: New York, NY, USA. 2017. P. 21–26.
- [15] **Boukadi K, Rekik M, Ben-Abdallah H.** FC4CD: A new SOA-based Focused Crawler for Cloud service Discovery. *Computing*. 2018; 100. P.1081–1107. DOI:10.1007/s00607-018-0600-2.
- [16] **Dong H, Hussain FK.** SOF: A semi-supervised ontology-learning-based focused crawler. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2013; 25(12): 1623-1812.

- [17] **Hernandez J, Marin-Castro HM, Morales-Sandoval M.** A Semantic Focused Web Crawler Based on a Knowledge Representation Schema. *Applied Sciences*. 2020; 10(11):3837. DOI:10.3390/app10113837.
 - [18] **Krótkiewicz M, Wojtkiewicz K, Jodłowiec M.** Towards Semantic Knowledge Base Definition. In *Biomedical Engineering and Neuroscience*. Huneke, W.P., Paszkiel, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland. 2018. P. 218–239.
 - [19] **Datyev IO, Fedorov AM.** Additive regularization in topic modeling of texts from communities of online social networks [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12, 2(44): 186-199. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-186-199.
-

About the authors

Igor Olegovich Datyev (b. 1981) graduated from the Kola branch of Petrozavodsk State University in 2004. Candidate of Technical Sciences (2011). At the IIMM KSC RAS, he is a senior research and scientific secretary. Author of more than 100 scientific papers in the field of developing models and technologies for regional information and communication systems. Author ID (RSCI): 180256; Author ID (Scopus): 56070103900; Researcher ID (WoS): J-1839-2018. i.datyev@ksc.ru ✉.

Andrei Mikhailovich Fedorov (b. 1978) graduated from the Kola branch of the Petrozavodsk State University (2000). Candidate of Technical Sciences (2005). At the IIMM KSC RAS, he is a leading researcher, deputy director for research work (since 2017). Associate Professor at the Department of Informatics and Computer Engineering at the Murmansk Arctic University (MAU) branch in Apatity. Research interests focus on the development of models and technologies of information support for regional management. Author ID (RSCI): 4285-9780; Author ID (Scopus): 57203929412; Researcher ID (WoS): D-5859-2016. a.fedorov@ksc.ru.

Andrey Andreevich Reviakin (b. 1992) graduated from Zaporozhye National Technical University (2014). First-year master's student of the Murmansk Arctic University branch in Apatity, specialty 09.04.02 Information systems and technologies. Programmer at the IIMM KSC RAS. Head of Frontend Development Department at Happy Job (Moscow). The area of scientific interests is concentrated in the development of big data information systems, and open sources of information. Author ID (RSCI): Author ID (ORCID): 0009-0006-3170-3990. andrewreviakin@yandex.ru.

Received July 08, 2024. Revised October 2, 2024. Accepted October 28, 2024.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-582-594



Интерактивное приложение, реализующее метод уверенных суждений на массовой программной платформе

© 2024, С.В. Смирнов

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,

Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

Аннотация

В статье рассматриваются функциональные возможности и архитектура интерактивного приложения, предназначенного для поддержки принятия многокритериальных решений на основе метода уверенных суждений С.А. Пиявского. Приводится описание отдельных составляющих этого метода, которые необходимы для раскрытия темы статьи в форме, ориентированной на компьютерное представление данных и знаний. Рассматриваемое приложение обеспечивает хранение и доступ к банку универсальных коэффициентов важности частных критериев и реализует ядро информационной методики принятия решений, основанной на методе уверенных суждений. Методика включает следующие этапы: формирование списка альтернативных решений с оценками каждого из них по набору частных количественных критериев; построение политики выбора, определяющей упорядоченность частных критериев по важности для лица, принимающего решение; нормализация постановки многокритериальной задачи в соответствии с базовой оптимизационной математической моделью; оценивание каждого альтернативного решения в рамках этой модели; отбор лучших альтернативных решений. Приложение автоматически согласовывает создание и редактирование списка альтернативных решений с определением границ варьирования политикой выбора и объединяет все этапы решения обратными связями через пользователя. Функциональное наполнение рассматриваемого приложения представлено схемой взаимосвязи основных активностей приложения и их продуктов и *UML*-диаграммой вариантов использования приложения. Архитектура приложения описана в виде интеллект-карты. Приложение реализовано на платформе табличного процессора *Excel* и языка программирования *VBA*. Основной целью такого выбора было обеспечение доступности и облегчение освоения передовой методики принятия многокритериальных решений широким кругом пользователей, использующих *Excel* в своей профессиональной работе.

Ключевые слова: многокритериальные решения, метод уверенных суждений, архитектура интерактивного приложения, массовая программная платформа.

Цитирование: Смирнов С.В. Интерактивное приложение, реализующее метод уверенных суждений на массовой программной платформе. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14 №4(54). С.582-594. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-582-594.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Памяти С.А. Пиявского посвящается

Введение

Метод уверенных суждений (МУС) для принятия многокритериальных решений – это одно из ярких и значимых открытий в богатом научном наследии профессора Семёна Аврамовича Пиявского (05.08.1941-25.12.2023). В наиболее доступной и продуктивной форме

этот метод был представлен в серии научных статей, опубликованных в журнале «Онтология проектирования» [1-4], а также в более широком контексте принятия многокритериальных решений в цифровой среде — в монографии [5].

Автору этой статьи посчастливилось не только быть учеником С.А. Пиявского в студенческие годы, но и тесно сотрудничать с ним в последние десятилетия в самарском Координационном совете по работе с одарённой молодежью в сфере науки и техники [6, 7] и, конечно же, в редколлегии журнала «Онтология проектирования».

Непосредственно участвуя в процессе подготовки к публикации статей [1–3] и слыша сеговотавания Семёна Авраамовича на необходимость скрупулёзной работы в *Excel* при выполнении надлежащих расчётов, автор этих строк оптимистично отвечал, что видит возможность нетрудоёмкой автоматизации основных функциональных задач обсуждавшейся методики по образцу программной лаборатории для онтологического анализа данных *OntoWorker* [8]. Однако, если последний проект был успешно завершён [9], то разработка системы целостной поддержки принятия решений на основе МУС так и осталась при жизни С.А. Пиявского в планах (так, в книге [5] архитектуре потенциального программного комплекса посвящено лишь несколько строк).

Эта статья сообщает о том, что обязательство наконец выполнено, и очерчивает функциональное наполнение и архитектурные решения, принятые в апробированной версии интерактивного приложения *PSA (Piyavsky Semyon Avraamovich)*, реализующего МУС на массовой программной платформе. В качестве такой платформы использован табличный процессор *Excel*, который хорошо известен широкому кругу пользователей и помимо многих присущих ему достоинств характеризуется весьма удобным для разработчиков и пользователей единством среды хранения данных и создания пользовательских приложений [10, 11].

1 Порядок подготовки исходных данных и решения задачи многокритериального выбора альтернатив

Функциональные возможности *PSA*-приложения отражает рисунок 1, где показана схема взаимосвязи этапов и продуктов приложения, включая обратные связи, поддерживаемые через пользователя (предполагается, что благодаря автоматизации основных действий им может быть непосредственно лицо, принимающее решение).

- 2, 4, 6, 8 – акты осмысления пользователем, находящимся на определённом этапе решения задачи многокритериального выбора во множестве альтернатив с помощью МУС (далее *PSA*-задача), либо результата очередного, либо какого-то из предшествующих этапов решения. Фигуру пользователя, которая занимает в двухдольной структуре схемы место «продукта», можно интерпретировать как изменённое состояние его «сознающего ума» [12] вследствие полученных результатов на определённом этапе решения *PSA*-задачи.
- 1 – формирование и редактирование соответствия «альтернативы – частные критерии» (АЧК), которое представляет собой основу многозначного контекста *PSA*-задачи

$$(A, F, D, I, g), \quad (1)$$

где: $A = \{a_i\}_{i=1,\dots,m}$ – множество альтернативных решений (альтернатив), из которых пользователь должен сделать выбор, $m \geq 2$; $F = \{f_j\}_{j=1,\dots,n}$ – множество частных количественных критериев, характеризующих каждую альтернативу, $n \geq 2$ (способ «нумеризации» качественной шкалы в рамках МУС предложен в [1, 5]); $D \subseteq D^* = \cup_{j=1,\dots,n} D_j$, D_j – домен значений частного критерия f_j ; I – тернарное отношение между A , F и D , определённое для всех пар из $A \times F$; $g: F \rightarrow \{\langle \text{min} \rangle, \langle \text{max} \rangle\}$ – функция, значение которой определяет направление оптимизации каждого частного критерия.

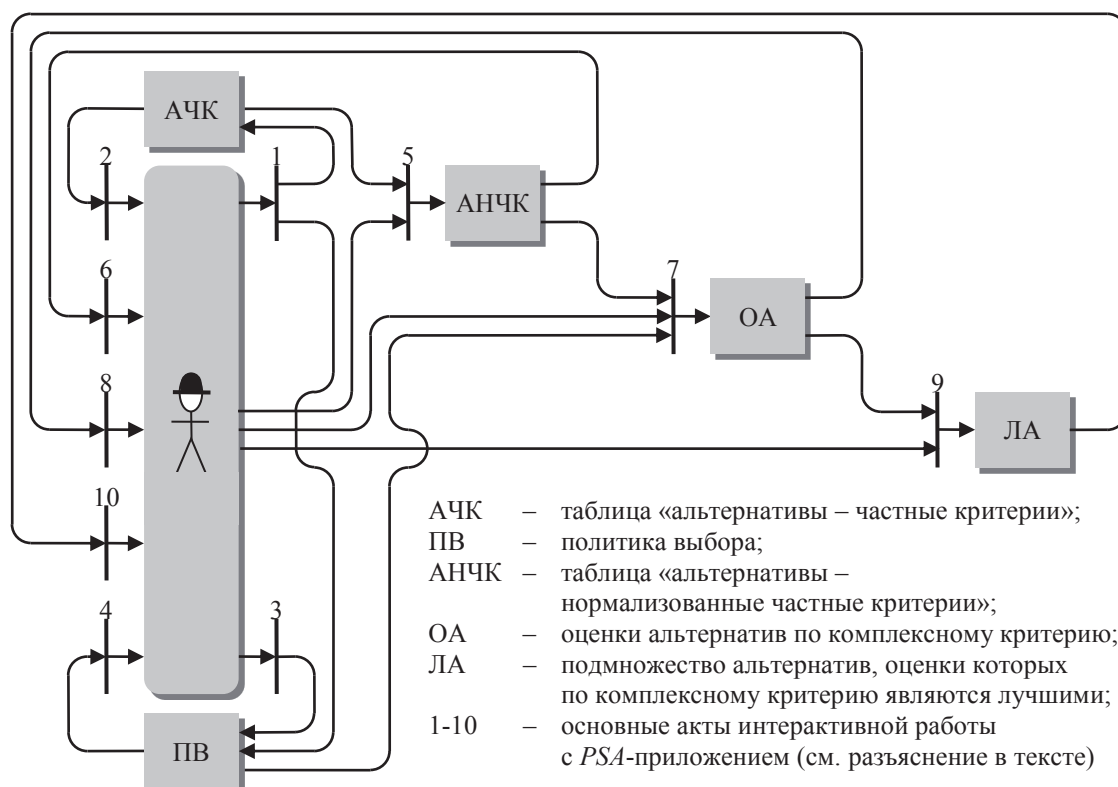


Рисунок 1 – Схема взаимосвязи активностей и продуктов PSA-приложения

- 3 – формирование и редактирование *политики выбора* (ПВ) пользователя, которую определяет кортеж

$$(R, F, S, c), \quad (2)$$

где: $R = \{r_i\}_{i=1, \dots, n}$ – группы важности частных критериев (критерии, отнесённые к группе r_k , для пользователя важнее, чем отнесённые к группе r_l при $k > l$); $S: R \times F \rightarrow \{\text{True}, \text{False}\}$, $S = (s_{ij})_{i=1, \dots, m; j=1, \dots, n}$ – сюръекция такая, что $\text{True} \in \{s_{lj}\}_{j=1, \dots, n}$ и $\forall p > q: \text{True} \notin \{s_{qj}\}_{j=1, \dots, n} \rightarrow \text{True} \notin \{s_{pj}\}_{j=1, \dots, n}$; c – лингвистическая константа, значение «L» которой требует использовать при скаляризации PSA-задачи средневзвешенную (или линейную, Лапласа), а значение «G» – гарантирующую (или минимаксную, Чебышёва-Гермейера) свёртку частных критериев.

- 5 – нормализация контекста PSA-задачи в соответствии с базовой оптимизационной математической моделью, отличающейся одинаковым направлением оптимизации для всех частных критериев (когда предпочтительными являются их минимальные значения) и масштабированием доменов критериев таким образом, что $D \subseteq [0, 1]$. Продукт этапа – соответствие «альтернативы – нормализованные частные критерии» (АНЧК).
- 7 – вычисление *оценок альтернатив* (ОА) в соответствии с заданной ПВ по комплексному критерию в виде свёртки частных критериев с весами – универсальными коэффициентами важности частных критериев [1-5].
- 9 – выявление упорядоченного подмножества k или более *лучших альтернатив* (ЛА) $A_{(k)} \subseteq A$, $k \leq m$, оценки которых по комплексному критерию меньше, чем у альтернатив из $A \setminus A_{(k)}$.

Прагматический аспект функциональности PSA-приложения демонстрирует диаграмма UML [13], описывающая реализованные варианты использования приложения (рисунок 2):

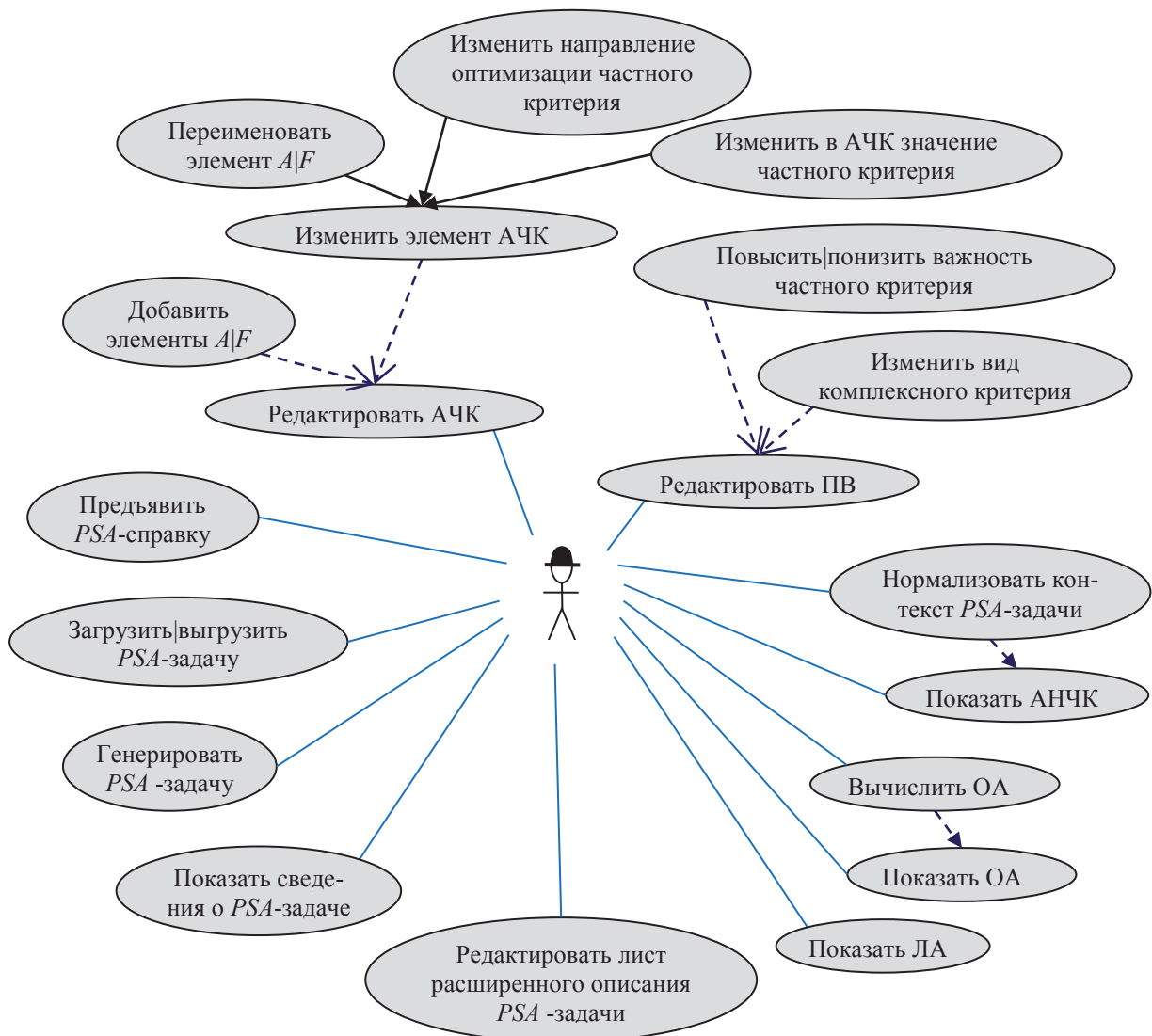


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования PSA-приложения:

— - коммуникация; - - включение; - - расширение; — - обобщение

- формирование многозначного контекста и ПВ PSA-задачи в виде соответствий АЧК и «группы важности – частные критерии» соответственно;
- нормализация исходного многозначного контекста PSA-задачи, включая возможность показа АНЧК;
- вычисление ОА согласно заданной ПВ по комплексному критерию, включая возможность показа полученного результата;
- выявление и показ ЛА с выбором мощности соответствующего подмножества;
- документирование PSA-задачи на листе расширенного описания (ЛРО), включённом в Excel-книгу, размещающую эту задачу;
- получение сведений о параметрах многозначного контекста и ПВ PSA-задачи;
- генерация в демонстрационных целях PSA-задачи со случайно выбираемыми параметрами многозначного контекста (1) и ПВ (2) с возможностью субъективной коррекции таких параметров;
- взаимодействие с файловой системой компьютера для загрузки и выгрузки PSA-задачи, хранящейся в виде Excel-книги с фиксированной структурой;

- получение справочной информации о МУС и его реализации в *PSA*-приложении.

2 Архитектура *PSA*-приложения

Разработанное приложение представляет собой защищённую *Excel*-книгу (*PSA*-книгу), включающую набор рабочих листов, часть из которых жёстко структурирована. Эти *PSA*-листы используются для табличного представления многозначного контекста и ПВ *PSA*-задачи, показа результатов её решения, хранения таблиц универсальных коэффициентов важности критериев и различной сопровождающей информации *PSA*-задачи. Листы, хранящие универсальные коэффициенты важности критериев, скрыты и недоступны пользователю, между другими листами *PSA*-книги можно свободно перемещаться.

Интеллект-карта [14, 15] на рисунке 3 даёт представление об архитектуре *PSA*-приложения.

- Для ввода, редактирования и отображения многозначного контекста *PSA*-задачи (1) и ПВ пользователя (2) используются «бесконечно» расширяющиеся рабочие листы «Альтернативы» и «Политика выбора», зонная организация которых показана на рисунке 4.

На листе «Альтернативы» это зонирование регламентирует табличное представление отношения I между альтернативами A (зона 1), частными критериями F (зона 2) и ОА частными критериями D (зона 5). Кроме того, в зоне 2 реализуется табличное представление функции $g(f)$.

На листе «Политика выбора» установленное зонирование определяет табличное представление соответствия S между группами важности частных критериев R (зона 1) и частными критериями F (зона 2), при этом зона 5 размещает знаки инцидентности соответствия S . Наконец, в зоне 0 располагается значение лингвистической константы c , которое определяет вид комплексного критерия, используемого для ОА.

Содержание рассматриваемых листов защищено, и его изменение возможно только специализированными сервисами, интерфейс к которым осуществляется с помощью различных контекстных меню специализированных зон листов «Альтернативы» и «Политика выбора».

На всех *PSA*-листах для вызова контекстных меню служит процедура обработки события *BRC* («*Before Right Click*»), которая в случае зонной организации листов используется ещё и для идентификации зоны, где пользователь кликнул правой кнопкой мыши.

- Листы «2», «3», ..., «10» размещают рассчитанные в [1-5] таблицы универсальных коэффициентов важности частных критериев для случаев, когда их количество в *PSA*-задаче равно соответственно 2, 3, ..., 10 (таким образом, рассматриваемая версия *PSA*-приложения способна поддерживать принятия многокритериальных решений не более чем при десяти частных критериях альтернатив).
- Лист «Справка» содержит справочную информацию о *PSA*-приложении, включая используемые термины и определения, описание его архитектуры и функциональных возможностей. Контекстное меню листа ограничивается навигационными задачами по содержанию справки.
- Лист «ЛРО» служит для размещения любой информации (тексты, рисунки, мультимедиа и т.п.), сопровождающей загруженную *PSA*-задачу. Контекстное меню листа позволяет в частности временно снимать его защиту, открывая пользователю возможность редактировать содержание этого листа с помощью всего инструментария *Excel*.

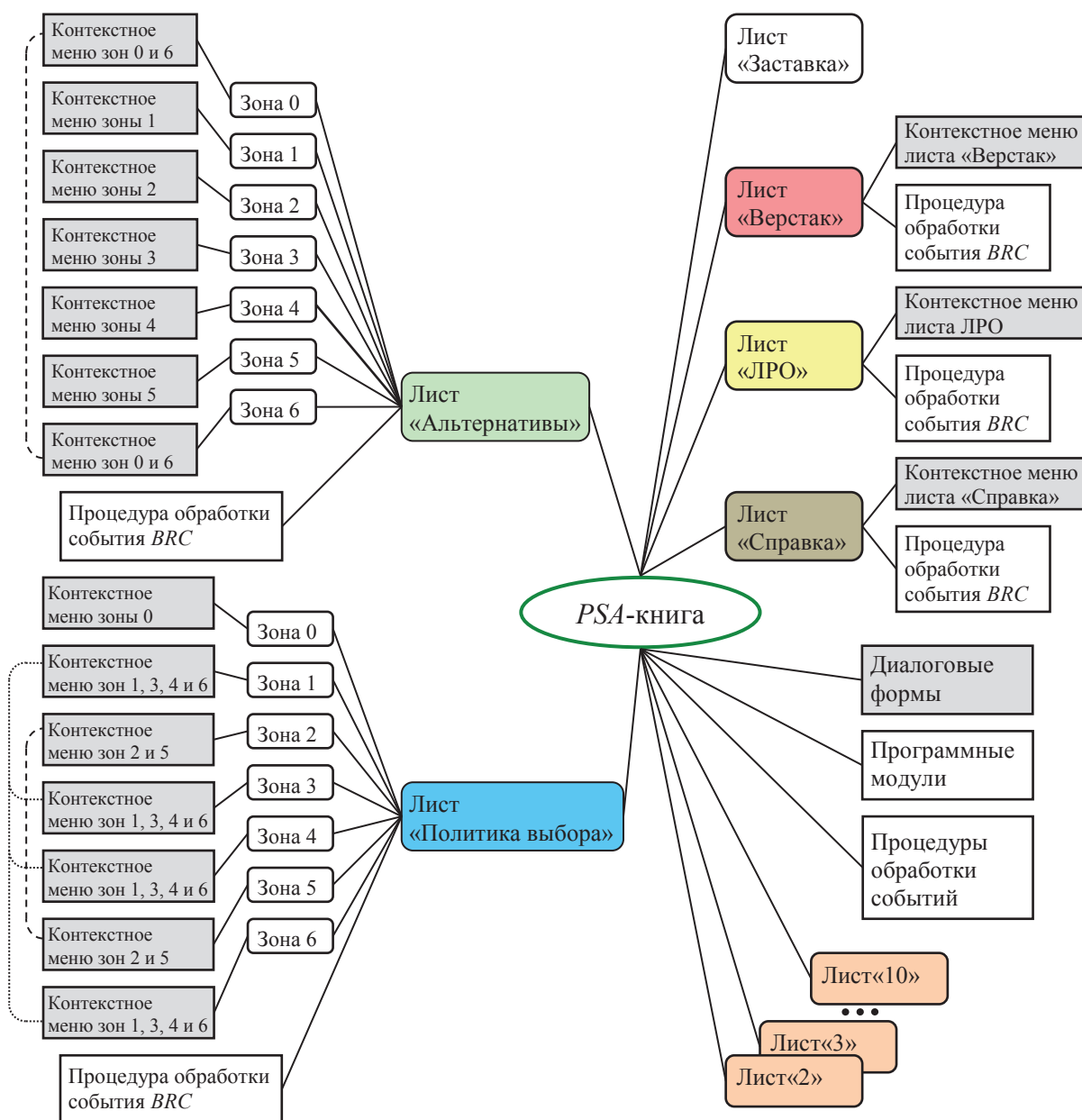


Рисунок 3 – Архитектура PSA-приложения

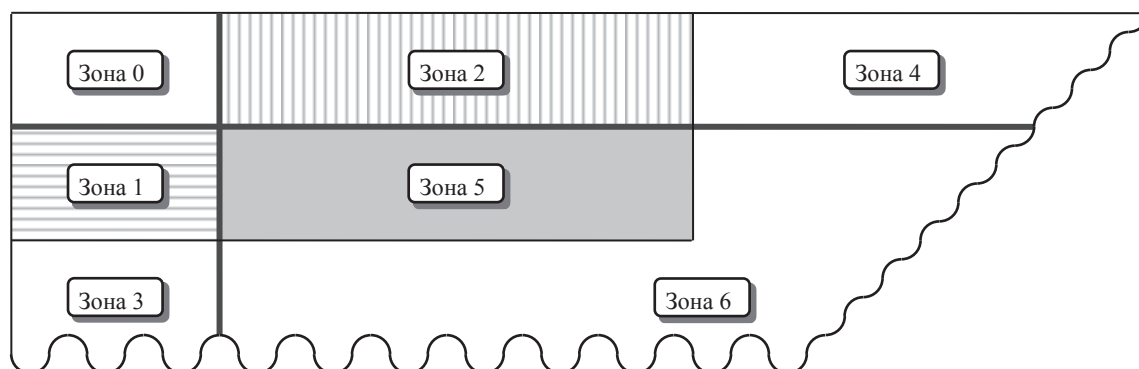


Рисунок 4 – Зонная организация рабочих листов «Альтернативы» и «Политика выбора» PSA-книги.
 В ходе работы зоны 1, 5 могут иметь нулевую высоту, а зоны 2, 5 – нулевую ширину

- На листе «Верстак» отображаются результаты решения *PSA*-задачи. Контекстное меню листа предоставляет доступ к аналитическим функциям *PSA*-приложения, а одна из прочих опций этого меню позволяет снять защиту листа «Верстак», чтобы его можно было редактировать стандартными инструментами *Excel*.
- Лист «Заставка» выполняет декоративную функцию и появляется при открытии *PSA*-книжки прежде, чем будет развернут основной в приложении лист «Альтернативы».
- Наряду с контекстными меню интерактивное взаимодействие пользователя и *PSA*-приложения поддерживается с помощью диалоговых форм, а одностороннее – от функциональных сервисов приложения к пользователю – с помощью сообщений.
- Функциональные сервисы *PSA*-листов объединены в одноимённые программные модули *PSA*-книжки. К ним добавлен модуль, содержащий описания разделяемых переменных и сервисов.
- Процедуры обработки событий *PSA*-книжки служат для реализации надлежащих реакций на её открытие, закрытие и сохранение результатов.

3 Пример работы *PSA*-приложения

Апробация *PSA*-приложения проводилась путём сравнения результатов решения задач многокритериального выбора на основе МУС, произведённых в [1-5] в известном смысле «вручную». Несовпадения в выборе ЛА не обнаружены, а наблюдавшиеся иногда незначительные расхождения численных ОА можно отнести на погрешности вычислений, которые вызываются использованием различных типов данных, иным порядком ведения расчётов и различием правил округления результатов.

Несмотря на этот опыт, здесь для демонстрации работы *PSA*-приложения исходные данные задачи многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив взяты из статьи [16], где задача решалась *методом косвенных предпочтений* (МКП), и пригодность МУС в подобных случаях была поставлена под сомнение.

В [16] рассматривается задача сравнения по тактико-техническим характеристикам (ТТХ) боевых самолётов, принимавших участие в индийском тендере *MMRCA* (2011 г.). На рисунке 5 приведён фрагмент скриншота листа «Альтернативы» *PSA*-книжки, где отражён многозначный контекст этой многокритериальной задачи в формате (1).

На рисунке 6 дан фрагмент скриншота листа «Политика выбора», где интерпретирована и зафиксирована согласно (2) описанная в [16] точка зрения на отношение «предпочтительности» на множестве частных критериев – показателей ТТХ самолётов, – а также вид комплексного критерия альтернатив – «обобщённой эффективности» самолётов как средневзвешенной свёртки ТТХ.

Фрагменты скриншотов листа «Верстак», где представлены продукты этапов решения рассматриваемой задачи многокритериальной оценки обобщённой эффективности самолётов, представлены на рисунках 7 и 8.

При нормализации *PSA*-задачи направление оптимизации всех частных критериев за исключением «Стоимость, млн. \$ (2011 г.)» инвертировано, и значения всех частных критериев линейно масштабированы для их представления величинами из отрезка [0, 1] (рисунок 7).

Полученные с использованием *PSA*-приложения МУС-оценки обобщённой эффективности всех самолётов, рассматривавшихся в тендере *MMRCA*, показаны на фрагменте скриншота листа «Верстак» на рисунке 8а, а рисунок 8б демонстрирует скриншот набора лучших трёх самолётов и их обобщённые оценки.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		max	max	max	max	max	max	min	max	max	
2		Боевая нагрузка, т	Управляемый вектор тяги, есть/нет	Скороподъёмность, м/с	Максимальная взлётная масса, т	Максимальное число Маха на высоте	Практический потолок, км	Стоимость, млн. \$ (2011 г.)	Тяговооружённость, TWR	Масса топлива, т	
3	Dassault Rafale	9,500	0,000	305,000	24,500	1,800	15,240	124,000	1,030	4,700	
4	Eurofighter Typhoon	7,500	0,000	315,000	23,500	2,250	19,810	120,000	1,180	5,000	
5	F-16 IN Super Viper	7,800	0,000	254,000	21,800	2,000	18,000	50,000	1,100	3,370	
6	F/A-18E/F Super Hornet	8,050	0,000	228,000	29,900	1,800	15,000	55,000	0,930	6,780	
7	JAS 39 NG(IN)	5,300	0,000	255,000	14,300	2,000	15,240	48,000	1,180	3,360	
8	МиГ-35	7,000	100,000	330,000	23,500	2,250	17,500	45,000	1,100	4,800	
9											

Рисунок 5 – Фрагмент скриншота листа «Альтернативы» *PSA*-книги, описывающий контекст задачи принятия многокритериального решения

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	L	Боевая нагрузка, т	Управляемый вектор тяги, есть/нет	Скороподъёмность, м/с	Максимальная взлётная масса, т	Максимальное число Маха на высоте	Практический потолок, км	Стоимость, млн. \$ (2011 г.)	Тяговооружённость, TWR	Масса топлива, т	
2	ГрВ 1								X	X	
3	ГрВ 2							X			
4	ГрВ 3						X				
5	ГрВ 4					X					
6	ГрВ 5				X						
7	ГрВ 6			X							
8	ГрВ 7		X								
9	ГрВ 8	X									
10											

Рисунок 6 – Фрагмент скриншота листа «Политика выбора» *PSA*-книги, описывающий распределение частных критериев по группам важности и указывающий вид их свёртки при определении комплексного критерия

	Боевая нагрузка, т	Управляемый вектор тяги, есть/нет	Скороподъёмность, м/с	Максимальная взлётная масса, т	Максимальное число Маха на высоте	Практический потолок, км	Стоимость, млн. \$ (2011 г.)	Тяговооружённость, TWR	Масса топлива, т
Dassault Rafale	0,000	1,000	0,245	0,346	1,000	0,950	1,000	0,600	0,608
Eurofighter Typhoon	0,476	1,000	0,147	0,410	0,000	0,000	0,949	0,000	0,520
F-16 IN Super Viper	0,405	1,000	0,745	0,519	0,556	0,376	0,063	0,320	0,997
F/A-18E/F Super Hornet	0,345	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,127	1,000	0,000
JAS 39 NG(IN)	1,000	1,000	0,735	1,000	0,556	0,950	0,038	0,000	1,000
МиГ-35	0,595	0,000	0,000	0,410	0,000	0,480	0,000	0,320	0,579

Рисунок 7 – Фрагмент скриншота листа «Верстак» *PSA*-книги, описывающий нормализованный контекст *PSA*-задачи многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив

Dassault Rafale	0,483
Eurofighter Typhoon	0,469
F-16 IN Super Viper	0,594
F/A-18E/F Super Hornet	0,626
JAS 39 NG(IN)	0,861
МиГ-35	0,278

а)

МиГ-35	0,278
Eurofighter Typhoon	0,469
Dassault Rafale	0,483

б)

Рисунок 8 – Фрагменты скриншотов листа «Верстак» *PSA*-книги, описывающие альтернативы и их оценки комплексным критерием в виде средневзвешенной (линейной, *L*) свёртки частных критериев: а) все рассматриваемые альтернативы и их оценки; б) три лучшие альтернативы

Таким образом, ранжирование альтернатив, полученных на основе МУС, полностью совпало с аналогичным результатом, полученным МКП в статье [16], и это показывает поверхностную оценку МУС, данную в этой работе.

В таблице 1 сопоставляются величины МКП- и МУС-оценок альтернатив.

Таблица 1 – Показатели самолётов, полученные методами косвенных предпочтений и уверенных суждений

Самолёт	Оценки в однородной 100-бальной шкале с учётом весов [16]	Оценки, отображённые в [0, 1] в случае использования оптимизационной модели «минимизация комплексного критерия» и сопоставлении 0 - лучшему выбору, а 1 - худшему	
		Метод косвенных предпочтений	Метод уверенных суждений
МиГ-35	73,69	0,000	0,000
Eurofighter Typhoon	58,88	0,219	0,328
Dassault Rafale	44,80	0,568	0,352
F-16 IN Super Viper	42,79	0,608	0,542
F/A-18E/F Super Hornet	37,89	0,704	0,597
JAS 39 NG(IN)	22,85	1,000	1,000

Для такого сопоставления бальная шкала, использованная в [16], инвертирована и линейно масштабирована для представления оценок величинами из отрезка [0, 1] так, что лучшему решению сопоставлен нуль, а худшему – единица. Аналогичному масштабированию подвергнуты МУС-оценки (рисунок 8а) обобщённой эффективности самолётов.

На рисунке 9 ожидаемо проявляются следствия оригинальных допущений, положенных в основу МУС и МКП для устранения имманентной неопределённости в постановке задач многокритериального выбора [5]. Сопоставление линейных трендов рядов оценок альтернатив позволяет указать на более «осторожную» тактику МУС в этом вопросе.

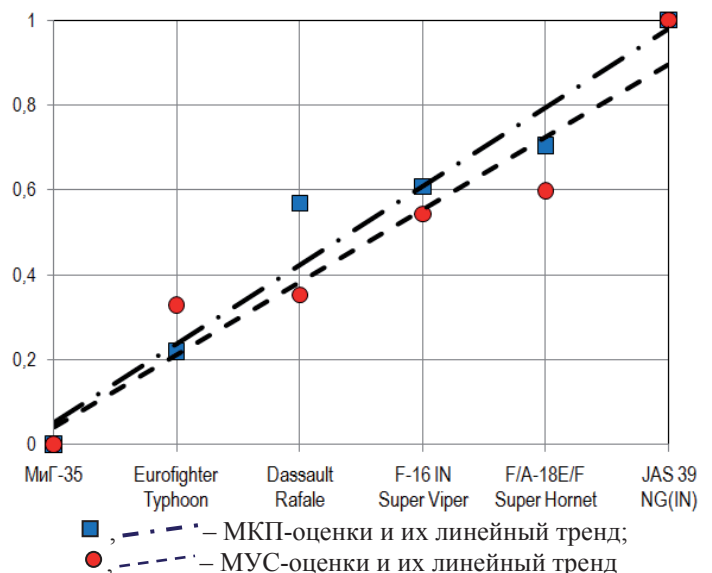


Рисунок 9 – Линейные тренды упорядоченных рядов оценок самолётов методами косвенных предпочтений и уверенных суждений

Заключение

Актуальность расширенной информационно-аналитической поддержки уникального по простоте использования МУС для принятия многокритериальных решений, разработанного С.А. Пиявским, не вызывает сомнения. В статье предложен вариант решения этой задачи, отличающийся доступностью для освоения широким кругом пользователей.

Научная новизна предложенного решения заключается в замене классической формулировки оптимизационной задачи теоретико-множественным описанием исходных данных этой задачи, включая ПВ в МУС при многокритериальном выборе на конечном множестве альтернатив. Кроме того, показана сопоставимость результатов, получаемых МУС с одним из других апробированных методов поддержки принятия многокритериальных решений.

Практическая значимость выполненной работы состоит в реализации МУС на массовой программной платформе. Использованные при этом проектные решения потенциально пригодны для создания различных аналитических приложений в табличных процессорах, подобных *Excel*.

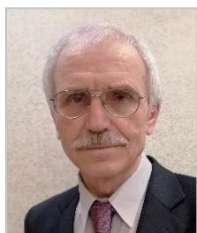
Резервом развития разработанного приложения является добавление средств автоматизации для количественной оценки качественных частных критериев альтернатив на основе МУС, а также расширение банка универсальных коэффициентов важности критериев для увеличения количества частных критериев альтернатив, учитываемых при принятии решений.

Список источников

- [1] **Пиявский С.А.** Как «нумеризовать» понятие «важнее» // *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №4. С.414-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435.
- [2] **Пиявский С.А.** Вычислительные аспекты формирования универсальных таблиц коэффициентов важности критериев // *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №3. С. 284-295. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-284-295.
- [3] **Пиявский С.А.** Метод универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №3. С.449-468. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-449-468.
- [4] **Пиявский С.А.** Формулы для вычисления универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №2. С.282-298. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [5] **Пиявский С.А., Малышев В.В.** Новые методы принятия многокритериальных решений в цифровой среде. М.: Наука, 2022. 370 с.
- [6] **Акопов Г.В., Загребова Л.Е., Камальдинова З.Ф., Овчинников Д.Е., Пиявский С.А., Смирнов С.В., Шаврин В.Ю.** Проблемы формирования региональной научно-образовательной развивающей среды в сфере науки, техники и технологий // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIX международной конф. (12-15 сентября 2017 г., Самара, Россия)*. Самара: ООО «Офорт», 2017. С. 273-280.
- [7] **Пиявский С.А.** Онтология направляемого развития научных способностей молодежи. Часть 1: основные понятия и модели // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №3. С. 405-423. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-405-423.
- [8] **Семенова В.А., Смирнов В.С., Смирнов С.В.** *OntoWorker: программная лаборатория для онтологического анализа данных* // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVII международной конф. (22-25 июня 2015 г., Самара, Россия)*. Самара: СамНЦ РАН, 2015. С.382-393.
- [9] **Семенова В.А., Смирнов С.В.** Функциональное наполнение и архитектура программной лаборатории для онтологического анализа данных // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. Т.31, №2. С.85-100. DOI: 10.14498/tech.2023.2.7.
- [10] **Гарнаев А.Ю., Рудикова Л.В.** *Microsoft Office Excel 2010: разработка приложений*. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 528 с.
- [11] **Уокенбах Дж.** *Excel 2010: профессиональное программирование на VBA*. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. 994 с.
- [12] **Чалмерс Д.** *Сознающий ум: в поисках фундаментальной теории*. М.: URSS, 2019. 512 с.
- [13] **Иванов Д.Ю., Новиков Ф.А.** *Моделирование на UML*. СПб.: Наука и техника, 2010. 640 с.

- [14] **Бьюзен Т., Бьюзен Б.** Интеллект-карты. Практическое руководство. Минск: Попурри, 2010. 368 с.
- [15] **Гаврилова Т.А., Страхович Э.В.** Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге // Онтология проектирования. 2020. Т.10, №1. С.87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [16] **Корнеев В.П.** Метод косвенных предпочтений формирования весов критериев с многоуровневой структурой // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4. С.580-596. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-580-596.

Сведения об авторе



Смирнов Сергей Викторович, 1952 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт им. С.П. Королёва в 1975 г., д.т.н. (2002). Главный научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН, профессор Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта, Международной ассоциации по онтологиям и их приложениям (IAOA). В списке научных трудов более 200 работ в области прикладной математики, компьютерного моделирования, создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (RSCI): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. smirnov@iccs.ru

Поступила в редакцию 16.08.2024. После рецензирования 22.10.24. Принята к публикации 28.10.2024.

Памяти нашего коллеги

Прошло чуть меньше года после ухода из реальной жизни в иной мир нашей памяти нашего коллеги, стоявшего у истоков создания журнала, и активного участника одноименного научного семинара профессора Пиявского Семёна Авраамовича (1941-2023).

Семён Авраамович окончил факультет летательных аппаратов Куйбышевского авиационного института (1964), аспирантуру Московского авиационного института (1967), профессор (1995), д.т.н. (2001), Почетный работник высшей школы РФ, академик Академии наук о Земле и Академии нелинейных наук. Опубликовал более 450 научных работ в области системного анализа, методов оптимизации и принятия решений, математического моделирования, образовательных систем и технологий. Основные научные результаты: онтологии образовательного процесса, методы многокритериальной оптимизации, принятия решений в условиях неустраняемой неопределённости, оптимизации многоцелевых летательных аппаратов; теория многоцелевых систем, компьютерная технология технического творчества, теория оптимального управления развитием научных способностей молодежи и др.

Своими знаниями и энергией, которые Семён Авраамович черпал у отцов-основателей информационных технологий и искусственного интеллекта в СССР, он активно делился со своими учениками. На архивных снимках ещё молодой С.А. Пиявский обсуждает свои идеи с академиками АН СССР Гермогеном Сергеевичем Поспеловым (1914-1998) и Никитой Николаевичем Моисеевым (1917-2000).





An interactive application implementing the confident judgments method on a mass software platform

© 2024, S.V. Smirnov

*Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Science,
Institute for the Control of Complex Systems of the Russian Academy of Science, Samara, Russia
Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russia*

Abstract

The article examines the functionality and architecture of an interactive application designed to support multi-criteria decision-making using S.A. Piyavsky's confident judgment method. It provides a description of key components of this method essential for presenting the topic in a computer-oriented format for data and knowledge representation. The application stores and provides access to a bank of universal importance coefficients for specific criteria and serves as the core of an information methodology for decision-making based on the confident judgment method. This methodology includes the following stages: compiling a list of alternative solutions with evaluations by a set of specific quantitative criteria; establishing a selection policy that orders criteria by importance for the decision-maker; normalizing the multi-criteria problem statement in line with a foundational optimization model; evaluating each alternative solution within this model; and selecting the optimal alternatives. The application automatically coordinates the creation and editing of the list of alternative solutions according to variation boundaries set by the selection policy, integrating all solution stages with user feedback. The application's functionality is represented by a diagram linking the main activities and their outcomes, along with a UML diagram of application use cases. The architecture of the application is presented as a mind map. The application is implemented on the Excel platform using VBA programming language, chosen to ensure accessibility and support the development of advanced multi-criteria decision-making methods for a broad user base who use Excel in their professional work.

Keywords: *multi-criteria decisions, confident judgment method, interactive application architecture, mass software platform.*

For citation: *Smirnov SV. An interactive application implementing the confident judgments method on a mass software platform [In Russian]. Ontology of designing. 2024; 14(4): 582-594. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-582-594.*

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

List of figures and tables

- Figure 1 - Diagram of the relationship between activities and products of the PSA application
- Figure 2 - PSA application use case diagram: communication; inclusion; extension; generalization
- Figure 3 - PSA application architecture
- Figure 4 - Zonal organization of the "Alternatives" and "Choice Policy" worksheets of the PSA-workbook
- Figure 5 - Screenshot of the "Alternatives" worksheets from the PSA-workbooks describing the context of the multi-criteria decision-making task
- Figure 6 - Screenshot of the "Choice Policy" worksheet from the PSA-workbook describing the distribution of partial criteria by importance groups and indicating the type of their convolution when defining a complex criterion
- Figure 7 - Screenshot of the "Workbench" worksheet from the PSA-workbook describing the normalized context of a multi-criteria decision-making task
- Figure 8 - Fragments of screenshots of the PSA-workbooks "Workbench" worksheet describing alternatives and their ratings by a complex criterion in the form of a weighted average (linear, L) convolution of partial criteria: a) all considered alternatives and their ratings; b) the three best alternatives
- Figure 9 - Linear trends of ordered series of aircraft ratings using indirect preferences and confident judgments methods
- Table 1 - Aircraft indicators obtained by indirect preferences and confident judgments methods

References

- [1] **Piyavsky SA.** How do we digitize the concept of «more important» [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(4): 414-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435.
- [2] **Piyavsky SA.** Computational aspects of establishing universal tables of criterion's importance [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(3): 284-295. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-284-295.
- [3] **Piyavsky SA.** Method of universal coefficients for the multi-criteria decision making [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(3): 449-468. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-449-468.
- [4] **Piyavsky SA.** Forms for calculation of universal coefficients when adopting multiple critical decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(2): 282-298. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [5] **Piyavsky SA, Malyshev VV.** New methods for making multi-criteria decisions in a digital environment [In Russian]. Moscow: Nauka; 2022. 391 p.
- [6] **Akopov GV, Zagrebova LE, Kamaldinova ZF, Ovchinnikov DE, Piyavsky SA, Smirnov SV, Shavrin VYu.** Problems of formation of regional scientific and educational developing environment in the sphere of science, engineering and technology [In Russian]. In: Complex Systems: Control and Modeling Problem, proc. of the XIX Int. Conf. (Samara, Russia, 2017, September 12-15). Samara: Ofort; 2017: 273-280.
- [7] **Piyavsky SA.** Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part 1: Basic concepts and models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(3): 405-423. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-405-423.
- [8] **Semenova VA, Smirnov VS, Smirnov SV.** OntoWorker: Program Laboratory for Ontological Data Analysis [In Russian]. In: Complex Systems: Control and Modeling Problem, proc. of the XVII Int. Conf. (Samara, Russia, 2015, June 22-25). Samara: Samara Scientific Center of RAS; 2015: 382-393.
- [9] **Semenova VA, Smirnov SV.** Functional content and architecture of software laboratory for ontological data analysis [In Russian]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2023; 31(2): 85-100.
- [10] **Garnaev AY, Rudikova LV.** Microsoft Office Excel 2010: Application Development [In Russian]. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2011. 528 p.
- [11] **Walkenbach J.** Excel 2010: power programming with VBA [In Russian]. Moscow: LLC “Williams”, 2011. 994 p.
- [12] **Chalmers D.** The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory [In Russian]. Moscow: URSS, 2019. 512 p.
- [13] **Ivanov DY, Novikov FA.** Modeling in UML [In Russian]. St. Petersburg: Nauka i tekhnika, 2010. 640 p.
- [14] **Buzan T, Buzan B.** Mind maps. Practical guide [In Russian]. Minsk: Poppuri, 2010. 368 p.
- [15] **Gavrilova TA, Strakhovich EV.** Visual analytical thinking and mind maps for ontology engineering [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [16] **Korneenko VP.** Method of indirect preferences for forming criterion weights with a multi-level structure [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 580-596. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-580-596.

About the author

Sergey Victorovich Smirnov (b. 1952) graduated from the Korolyov Aerospace Institute (Kuibyshev-city) in 1975, D. Sc. Eng. (2002). Chief Researcher at Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, professor at Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics. He is a member of Russian Association of Artificial Intelligence and International Association for Ontology and its Applications. He is a co-author of more than 200 publications in the field of applied mathematics, computer modeling, and the creation of intelligent decision support systems. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (RSCI): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. smirnov@iccs.ru

Received August 16, 2024. Revised October 22, 2024. Accepted October 28, 2024.



Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника

© 2024, В.Г. Мокрозуб ✉, А.А.М. Альсаиди

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Аннотация

На примере кожухотрубчатого теплообменника описывается создание онтологии предметной области, позволяющей в зависимости от теплоносителя (аммиак, метанол), технологических условий теплообмена (давление, температура) и геометрических параметров теплообменника (диаметр аппарата) выбрать тип теплообменника (с неподвижными трубными решётками, с компенсатором, с U-образными трубками). Онтология предназначена для использования при проектировании химико-технологических систем на этапе их аппаратурного оформления. Представлена функциональная модель, описывающая основные стадии и информационные потоки аппаратурного оформления химико-технологических систем. Каждая стадия аппаратурного оформления осуществляется с помощью информационной модели, позволяющей преобразовать входной информационный поток в выходной. Описана информационная модель выбора типа теплообменника. Модель представлена продукционными правилами и состоит из операторов определения: материала элементов теплообменника в зависимости от теплоносителя, исполнения по материалу, типа теплообменника. Прототип описанной информационной модели реализован в редакторе онтологий *Protégé*. Приведена онтология и пример запроса на определение типа теплообменника при заданном теплоносителе и технологических параметрах процесса теплообмена. Данные для создания онтологии взяты из нормативных проектных документов. Сделан вывод о целесообразности использования онтологического подхода при создании «умных» проектных документов, в том числе стандартов и технических условий, которые понятны человеку и компьютеру.

Ключевые слова: химическое производство, технологические аппараты, теплообменник, проектирование, функциональная модель, информационная модель, онтология, принятие решений.

Цитирование: Мокрозуб В.Г., Альсаиди А.А.М. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С.595-606. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Химическое производство представляет собой набор соединённых в определённой последовательности технологических аппаратов (далее аппаратов), в которых выполняются технологические операции или стадии (химические превращения, нагрев, сушка и др.), необходимые для производства определённого продукта. Этот набор аппаратов называется химико-технологической системой (ХТС). Процесс проектирования химических производств включает ряд этапов, среди которых [1]:

- аппаратурное оформление ХТС;
- размещение аппаратов и трассировка трубопроводов в производственном помещении;
- расписание работы ХТС и графики ремонтов аппаратов;
- технико-экономические расчёты.

Аппатурное оформление ХТС заключается в выборе или проектировании таких аппаратов, которые позволяют получить заданное количество продукта за заданное время с минимальными затратами. При этом необходимо определить тип аппарата, который позволит выполнить технологические операции или стадии, и его основные размеры.

Вопросы разработки систем поддержки принятия решений (СППР) при проектировании химических производств рассматриваются в различных публикациях (см., например, [1-4]), но задачам определения типа аппаратов на этапе аппаратурного оформления ХТС уделяется недостаточное внимание. Связано это, прежде всего:

- с большим количеством разнообразных процессов (химические, механические, тепловые, гидродинамические), присутствующих в ХТС, и типов аппаратов, в которых эти процессы реализуются [5];
- с отсутствием формального описания процесса выбора типа аппарата, хотя нормативные документы (стандарты, технические условия и др.) содержат рекомендации по применению аппаратов, и есть условия для создания «умных стандартов», которые можно использовать в СППР.

Созданию «умных стандартов» (*SMART*-стандартов) посвящен ряд публикаций: предпосылки появления понятия «*SMART*-стандарт» [6], особенности и перспективы развития национальной системы *SMART*-стандартизации [7], архитектура и форматы данных в *SMART*-стандартах [8], мировые тенденции развития *SMART*-стандартизации [9]. В России создан проектный технический комитет 711 (ПТК711) «Умные (*SMART*) стандарты» [10] и разрабатываются национальные стандарты, один из которых опубликован [11], другие находятся в доработке после публичного обсуждения [7].

Основой для создания *SMART*-стандартов может стать онтология предметной области (ПрО), т.к. в стандартах описываются объекты, процессы и другие сущности ПрО (наименования понятий ПрО согласно [12]), свойства сущностей и связи между сущностями и их свойствами (отношения между наименованиями понятий [12]). По сути стандарты являются неформализованной онтологией. В [13] рассматривается подход к разработке онтологии на основе стандартов; модель представления онтологии ПрО на основе графовых баз данных описана в [14]; модель комплексной поддержки разработки СППР представлена в [15]; создание онтологий в области машиностроения описано в работах [16, 17]; обзор существующих способов формирования онтологии ПрО при моделировании представлен в [18]; обзор подходов к автоматизации работ с онтологическими ресурсами описан в статье [19].

Целью настоящей статьи является описание создания СППР для определения типа кожухотрубчатого теплообменника (КТ) на этапе проектирования ХТС. В основе СППР лежит онтология ПрО, которая составлена на основе технических условий [20].

СППР при проектировании ХТС создаётся на основе функциональной модели (ФМ), в которой определяются решаемые задачи, информационные потоки и информационные модели (ИМ), преобразующие входные информационные потоки в выходные.

1 ФМ аппаратурного оформления ХТС

Аппаратурное оформление ХТС заключается в:

- определении типов аппаратов на каждой стадии технологического процесса;
- расчёте определяющих размеров и числа аппаратов на каждой стадии (например, для ёмкостного аппарата определяющим размером является объём, для теплообменника поверхность теплообмена);
- конструировании аппаратов на определённых стадиях и разработке технологии изготовления аппаратов.

Функциональная диаграмма верхнего уровня задачи разработки аппаратурного оформления ХТС представлена на рисунке 1. В техническом задании (*tz*) представлены исходные данные на разработку аппаратурного оформления ХТС:

- перечень стадий технологического процесса;

- свойства веществ на каждой стадии;
- параметры процессов каждой стадии (температура, время, расходные нормы используемых веществ и др.).

Техническая документация аппаратного оформления ХТС (pr) включает:

- спецификацию аппаратов;
- конструкторскую документацию на аппараты;
- технологическую документацию на изготовление сконструированных аппаратов.

Управляющими воздействиями (C) являются нормативные документы, регламентирующие условия применения аппаратов, методы технологического расчёта, нормативные документы на конструирование и разработку технологии изготовления аппаратов.

Диаграмма A0 процесса проектирования ХТС представлена на рисунке 2. Основными функциональными блоками диаграммы являются:

- выбор типов аппаратов для каждой стадии;
- расчёт определяющих размеров аппаратов;
- разработка конструкторской и технологической документации отдельных аппаратов.

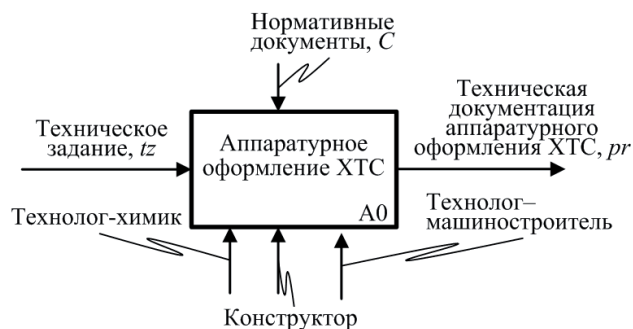


Рисунок 1 – Диаграмма верхнего уровня проектирования химико-технологической системы

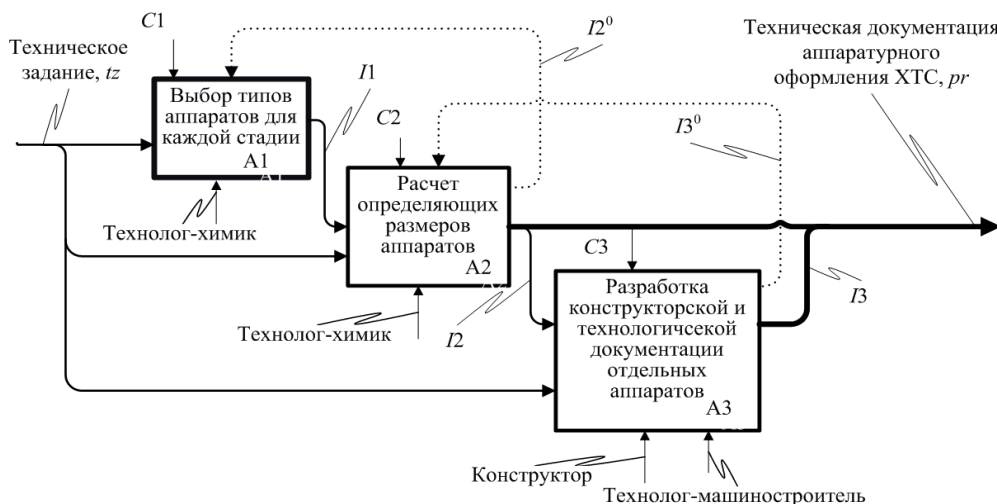


Рисунок 2– Диаграмма A0 процесса проектирования химико-технологической системы

Информационные потоки диаграммы A0:

- $I1$ – типы аппаратов на каждой стадии ХТС;
- $I2$ – определяющие размеры и число аппаратов на каждой стадии;
- $I3$ – конструкторско-технологическая документация изготовления аппаратов;
- $C1$ – нормативные документы, регламентирующие условия применения аппаратов;
- $C2$ – нормативные документы технологического расчёта аппаратов;
- $C3$ – конструкторские и технологические нормативные документы;
- $I2^0, I3^0$ – обратные связи; $C = C1UC2UC3$; $pr = I1UI2UI3$.

В блоке A1 на основании характеристик обрабатываемых веществ и параметров технологического процесса осуществляется выбор типов аппаратов для каждой стадии.

Например, для стадии выпарки, если выпариваемый раствор сильно агрессивный и высококипящий, то выбирается барботажный выпарной аппарат, а для сильнопенящегося термочувствительного раствора наиболее подходящим является пленочный выпарной аппарат. При выборе КТ, если разность температур теплоносителей не превышает 30°C , выбирается КТ с неподвижными трубными решётками.

В блоке А2 для выбранных в блоке А1 типов аппаратов на основании производительности ХТС, времени выполнения операций стадии и нормативных расходов веществ определяется основной размер аппарата и число аппаратов на каждой стадии.

В блоке А3 на основании определяющего размера аппарата разрабатывается конструкторская и технологическая документация аппарата, включающая:

- технологический расчёт аппарата;
- прочностной расчёт элементов аппарата;
- разработку чертежей общего вида, сборочных единиц и деталей;
- разработку спецификации аппарата;
- маршрутные и операционные карты изготовления отдельных деталей;
- нормы расходов материалов;
- карты сборок и др.

ФМ (FM), описывающую преобразование входного информационного потока tz в выходной pr с использованием ИМ (IM) можно записать в виде $FM : tz UC \xrightarrow{IM} pr$. Под IM здесь понимается «формальная модель ограниченного набора фактов, понятий или инструкций, предназначенная для удовлетворения конкретному требованию» [21]. В данном случае:

- «конкретное требование» – получение проектной документации;
- понятия – аппарат, температура, давление;
- факты – температура равна 100°C , давление равно $0,3\text{ МПа}$;
- инструкция – если разность температур теплоносителей в КТ больше 40°C , то необходимо использовать температурный компенсатор.

FM и IM представляют собой следующие кортежи:

$$FM = \langle FM1, FM2, FM3 \rangle, IM = \langle IM1, IM2, IM3 \rangle,$$

где $FM1$ – ФМ выбора типов аппаратов для каждой стадии;

$FM2$ – ФМ расчёта определяющих размеров аппаратов;

$FM3$ – ФМ разработки конструкции и технологии изготовления отдельных аппаратов;

$IM1$ – ИМ выбора типов аппаратов для каждой стадии;

$IM2$ – ИМ расчёта определяющих размеров аппаратов;

$IM3$ – ИМ разработки конструкции и технологии изготовления отдельных аппаратов;

$$FM1 : tz UC1 UI2^0 \xrightarrow{IM1} I1; FM2 : tz UI1 UC2 UI3^0 \xrightarrow{IM2} I2; FM3 : tz UI2 UC3 \xrightarrow{IM3} I3.$$

2 Формальное описание ИМ выбора типа аппаратов

ИМ, предназначенная для определения типа аппарата химических производств в зависимости от свойств обрабатываемых веществ, определяется как кортеж $OP = \langle P, T, G \rangle$, где P – таксономия типов аппаратов (КТ, труба в трубе); T – таксономия свойств обрабатываемых веществ (температура, давление, обрабатываемые вещества); G – правила, связывающие вершины дерева аппаратов с вершинами дерева свойств обрабатываемых веществ.

Таксономия аппаратов $P = (PV, PR)$, $PV = \{pv_i, i = 0..I\}$ – множество типов и подтипов аппаратов; $PR = \{pr_{km}, k \in 1..I, m \in 1..I, k \neq m\}$ – связи типа класс–подкласс (например, «КТ – теплообменник с неподвижными трубными решётками»).

Пример таксономии аппаратов в виде графа (дерева) представлен на рисунке 3.

Таксономия свойств обрабатываемых веществ $T = (TV, TR)$, $TV = \{tv_j, j = 0..J\}$ – множество свойств обрабатываемых веществ; $TR = \{tr_{km}, k \in 1..J, m \in 1..J, k \neq m\}$ – связи типа класс–подкласс (например, «Температура – Температура максимальная»). Пример таксономии свойств обрабатываемых веществ в виде графа представлен на рисунке 4.

Ультраграф $G = (GPT, GR)$ связей вершин $PV = \{pv_i, i = 0..I\}$ дерева аппаратов (стоки) с вершинами $TV = \{tv_j, j = 0..J\}$ дерева свойств обрабатываемых веществ (истоки), $GPT \subset PV \cup TV$ – множество вершин ультраграфа, $GR = \{gr_k, k = 1..K\}$ – множество рёбер ультраграфа, $gr_k(Y_k)$ – k -ое ребро ультраграфа, Y_k – множество вершин, инцидентных k -му ребру ультраграфа, $Y_k \subset GPT$, $Y_k = \{pv_l, TV1\}$, $pv_l \in PV$ – вершина дерева аппаратов (сток), $TV1 \subset TV$ – множество вершин из дерева свойств обрабатываемых веществ (истоки), $TV1 = \{tv_c, c \in J\}$.

Ребро ультраграфа представляет собой правило (продукцию) вида «Если ..., то ...», которая формально запишется как $\exists \bigcap_{c \in J \subset J} tv_c \Rightarrow pv_l$.

Графическая интерпретация правила (ребра ультраграфа) «Если температура от -40^0 до 350^0 , то тип теплообменника ТН или ТК» представлена на рисунке 5. При этом вершины «Температура максимальная» и «Температура минимальная» являются истоком, а вершины «ТН» и «ТК» – стоком, что показано стрелками на ребре gr_1 .

3 ИМ выбора типа КТ (ИМ1)

ИМ ИМ1 составлена на основе данных [20], где:

$Sr = \{sr_{isr}\}$, $isr = 1..Isr$ – множество возможных теплоносителей, $Sr = \{\text{Аммиак, Спирт метиловый, Толуол, Уксусная кислота, Ацетон, ...}\}$;

$Tr = \{tr_{itp}\}$, $itp = 1..Itp$ – множество возможных типов теплообменников, $Tr = \{\text{ТН, ТК, ТП, ТУ, ХН, ХК, ХП, ХУ}\}$, ТН – теплообменник с неподвижно закреплёнными трубными решётками, ТК – теплообменник с температурными компенсаторами на кожухе, ТП – теплообменник с «плавающей» головкой, ТУ – теплообменник с U-образными трубами, ХН – холодильник с неподвижно закреплёнными трубными решётками, ХК – холодильник с температурными компенсаторами на кожухе, ХП – холодильник с «плавающей» головкой, ХУ – холодильник с U-образными трубами;

Теплообменники, PV

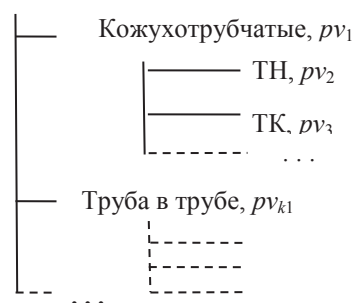


Рисунок 3 – Пример таксономии аппаратов

Свойства обрабатываемых веществ, TV

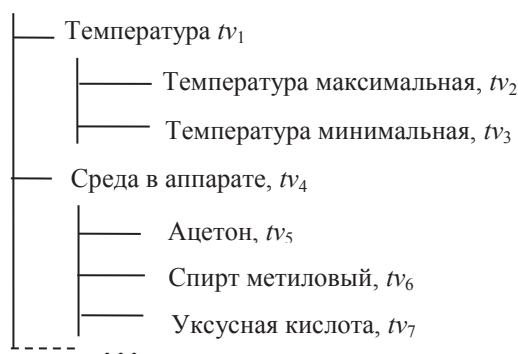
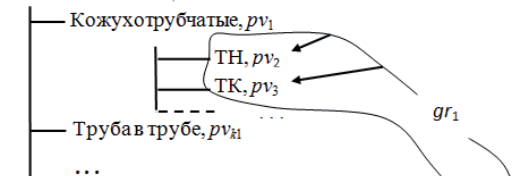


Рисунок 4 – Пример таксономии свойств обрабатываемых веществ

Теплообменники, PV



Параметры технологического процесса, TV

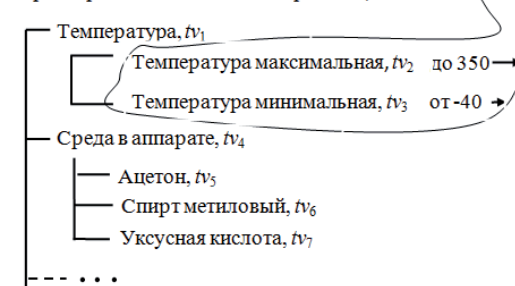


Рисунок 5 – Графическая интерпретация правила вида «Если ... то ...»

$Mt = \{mt_{imt}\}, imt = 1..Imt$ – множество возможных материалов элементов теплообменника, $Mt = \{\text{Ст3, 9Г2С, Сталь 20, 12Х18Н10Т, Х17Н13М2Т, Х18Н10Т, Х18Н12М2Т, Х18Н12М3Т, ...}\}$;

$E = \{e_{ie}\}, ie = 1..Ie$ – множество элементов теплообменника, $E = \{\text{кожух, крышки, трубы, трубные решётки, перегородки, ...}\}$;

$M = \{m_{im}\}, im = 1..Im$ – множество возможных исполнений по материалу, $M = \{M1, M3, M8, M9, ..., M24\}$, например,

$M1$: кожух – Ст3сп; крышки – Ст3сп, 16ГС; трубы – сталь 10, сталь 20; трубная решётка – 16ГС; перегородки – Ст3сп; ...

$M10$: кожух – 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М; крышки – 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М; трубы – 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М; трубная решётка – 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М; перегородки – 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М;

$Pt = \{pt_{ipt}\}, ipt = 1..Ipt$ – давление в трубах, $Pt = \{0.6, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0\}$;

$Pk = \{pt_{ipk}\}, ipk = 1..Ipk$ – давление в кожухе, $Pk = \{0.6, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0\}$;

Dt – допускаемая разность температур кожуха и труб;

Tt – температура трубы;

Tk – температура кожуха;

$Dv = \{dv_{idv}\}, idv = 1..Idv$ – диаметр кожуха внутренний, $Dv = \{400, 600, 800, 1000, 1200, 1400\}$;

$Dn = \{dn_{idn}\}, idn = 1..Idn$ – диаметр кожуха наружный (задаётся при малых диаметрах), $Dn = \{159, 273, 325, 426, 630\}$;

$Tmax$ – максимальная температура теплоносителя;

$Tmin$ – минимальная температура теплоносителя;

$Me = \{Mk, Mkr, Mt, Mtr, Mp\}$ – материалы элементов теплообменника, соответственно: Mk – кожуха, Mkr – камеры распределительной, Mt – труб, Mtr – трубной решётки, Mp – перегородки.

С учётом введённых обозначений ИМ определения типа теплообменника описывается выражениями:

$$Me = Fm(sr), \quad (1)$$

$$m = Fmt(Me), \quad (2)$$

$$tp = Ftp(m, Tt, Tk, Dv, Dn, P, Dt), \quad (3)$$

где Fm – оператор определения материала элементов теплообменника в зависимости от теплоносителя, Fmt – оператор определения исполнения по материалу, Ftp – оператор определения типа теплообменника.

Операторы Fm , Fmt , Ftp представлены в виде правил (продукций). Например:

Fm : ЕСЛИ $sr = \text{Спирт метиловый}$, ТО $Mk = 09Г2С$ И $Mkr = 09Г2С$ И $Mt = 09Г2С$ И $Mtr = 09Г2С$ И $Mp = 09Г2С$;

Fmt : ЕСЛИ $Mk = \text{Ст3сп}$ И ($Mkr = \text{Ст3сп}$ ИЛИ $Mkr = 16ГС$) И ($Mt = \text{сталь 10}$ ИЛИ $Mt = \text{сталь 20}$) И $Mtr = 16ГС$ И $Mp = \text{Ст3сп}$, ТО $mt = M1$;

Ftp : ЕСЛИ $Tt < 250$ И ($Dn = 159$ ИЛИ $Dn = 273$ ИЛИ $Dn = 325$) И ($P = 1,6$ ИЛИ $P = 2,5$ ИЛИ $P = 4,0$) И ($m = M8$ ИЛИ $m = M10$) И $Dt \leq 20$, ТО $tp = \text{ТН}$.

4 Реализация ИМ выбора типа КТ

Прототип ИМ выбора типа КТ разработан в редакторе онтологий *Protege*, рисунки 6-11.

Основными классами сущностей (*Classes*) являются: Среда, Материал, Исполнение по материалу, Типы теплообменников (рисунок 6). Свойства объектов (*Objekt property*): Имеет исполнение по материалу, Материал камеры распределительной, Материал кожуха, Материал перегородок, Материал решётки трубной, Материал труб (рисунок 7). Данные (*Data properties*): Внутренний диаметр кожуха, Давление, Наружный диаметр кожуха, Разность температуры кожуха и труб, Температура кожуха, Температура труб (рисунок 8).

Пример определения материала элементов теплообменника в зависимости от теплоносителя, оператор Fm , выражение (1) (см. рисунок 9).

Пример правила определения исполнения теплообменника по материалу в зависимости от материала элементов, оператор Fmt , выражение (2) (см. рисунок 10).

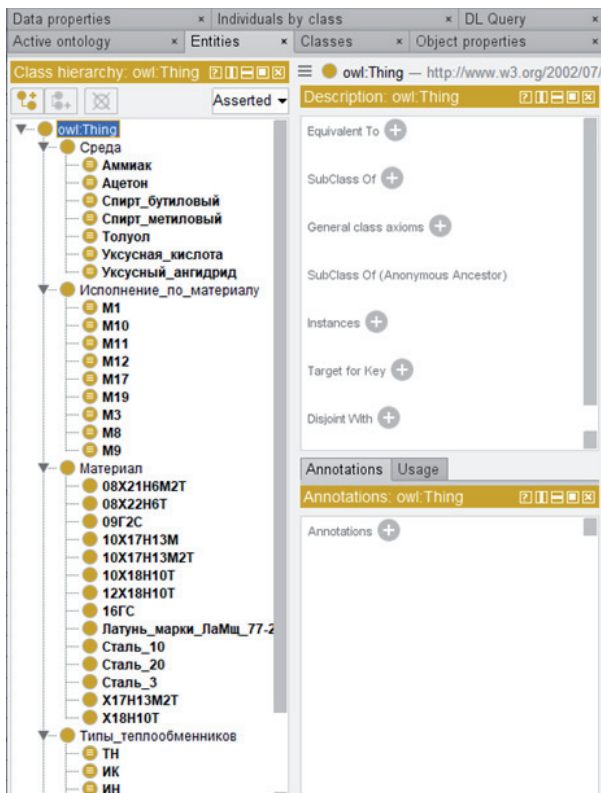


Рисунок 6 – Классы сущностей

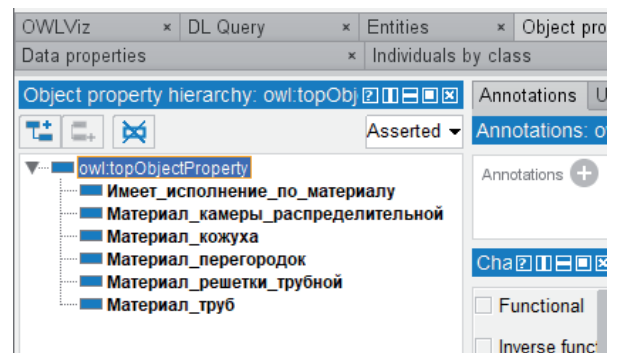


Рисунок 7 – Свойства объектов

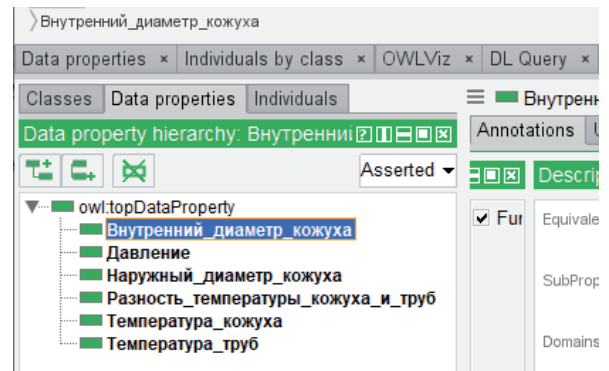
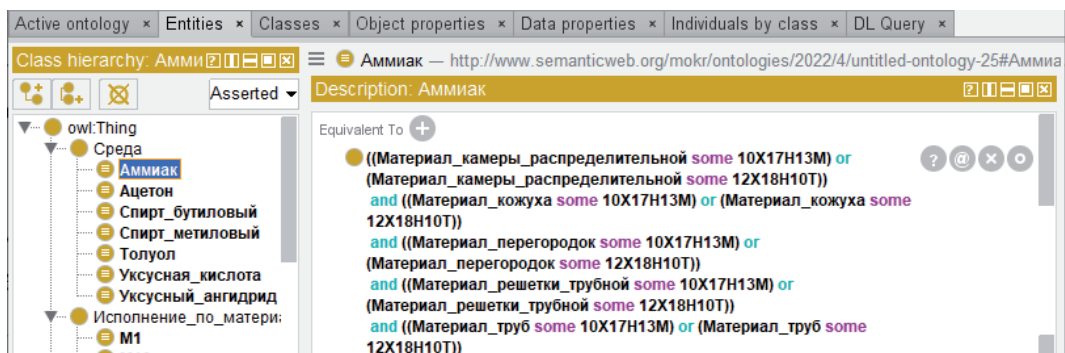


Рисунок 8 – Данные

Рисунок 9 – Пример определения материала элементов теплообменника в зависимости от теплоносителя, оператор Fm , выражение (1)

Пример правила определения типа теплообменника в зависимости от исполнения по материалу и условий эксплуатации, оператор Ft , выражение (3) (см. рисунок 11).

Пример запроса на определение типа теплообменника приведён на рисунке 12.

Заключение

СППР при проектировании ХТС включает разработку:

- 1) функциональной диаграммы проектирования ХТС;

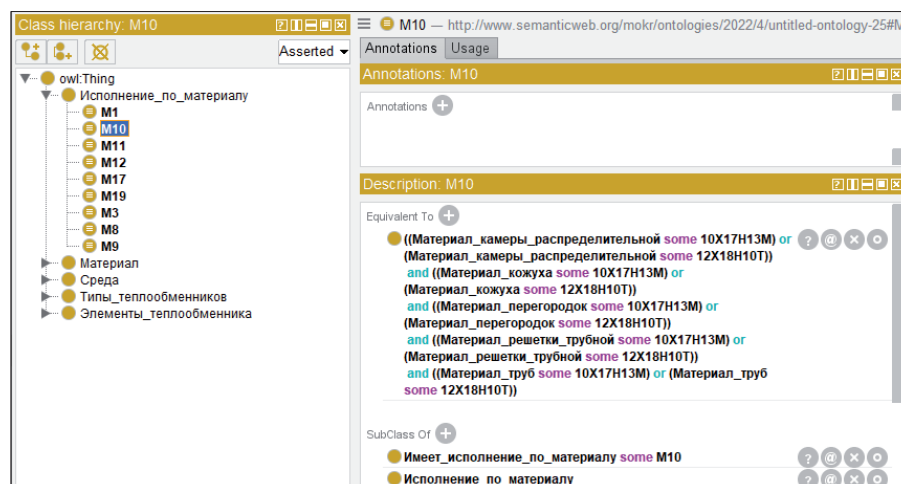


Рисунок 10 – Пример определения исполнения теплообменника по материалу в зависимости от материала элементов, оператор *Fmt*, выражение (2)

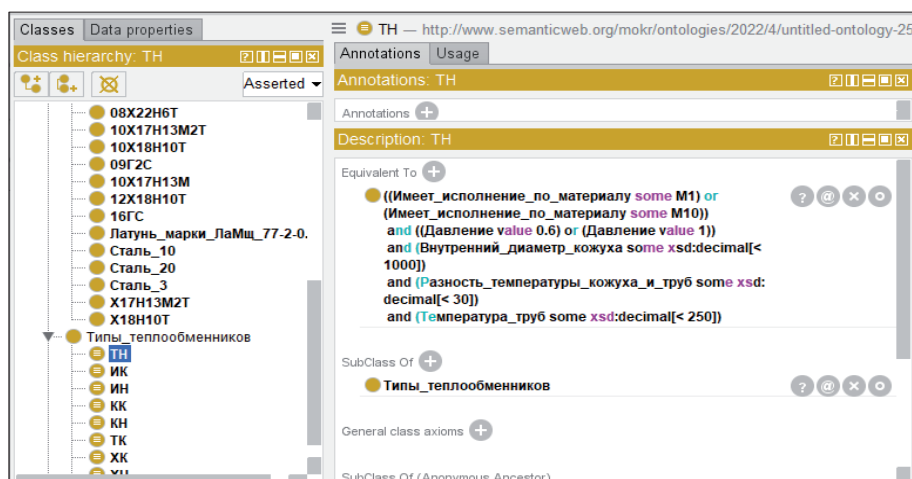


Рисунок 11 – Пример правила определения типа теплообменника в зависимости от исполнения по материалу и условий эксплуатации, оператор *Ft*, выражение (3)

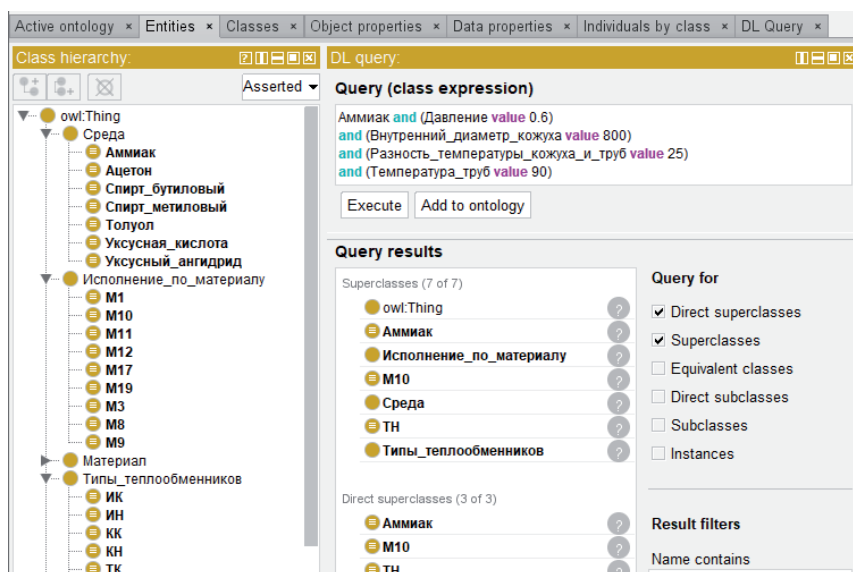


Рисунок 12 – Пример запроса на определение типа теплообменника

- 2) ФМ процесса проектирования ХТС (теоретико-множественное описание функциональной диаграммы) и определение ИМ, реализующих процессы проектирования ХТС;
- 3) ИМ процессов проектирования ХТС;
- 4) компьютерной реализации ИМ.

Представленная онтология выбора типа КТ создана по техническим условиям [20]. Описанный подход может быть использован не только при разработке СППР при проектировании технических объектов, но и при создании *SMART*-стандартов, *SMART*-технических условий и других нормативных документов.

Список источников

- [1] **Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Михайлова П.Г.** Современное состояние в области анализа, синтеза и оптимального функционирования многоассортиментных цифровых химических производств: аналитический обзор. *Теоретические основы химической технологии*. 2021. Т.55, №2. С.154-187. DOI: 10.31857/S0040357121010061.
- [2] **Нургалеев Р.К., Шинкевич А.И.** Применение инструментов моделирования в рамках функционирования "умного" нефтехимического производства. *Computational Nanotechnology*. 2021. Т.8, №1. С.46-58. DOI: 10.33693/2313-223X-2021-8-1-46-58.
- [3] **Богомолов Б.Б., Болдырев В.С., Зубарев А.М., Мешалкин В.П., Меньшиков В.В.** Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической технологии. *Теоретические основы химической технологии*. 2019. Т.53, №5. С.483-492. DOI: 10.1134/S0040357119050026.
- [4] **Мешалкин В.П., Панина Е.А.** Методология разработки специализированной онтологии по химической технологии реактивов и особо чистых веществ. *Доклады Академии наук*. 2018. Т.479, №5. С.527-531. DOI: 10.7868/S0869565218110117.
- [5] Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств / под общ. ред. А.С. Тимонина. – 2-е изд., перераб., испр. и доп. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия. 2022. 948 с.
- [6] **Денисова О.А., Дмитриева С.Ю.** SMART-стандарты: нормативные документы для цифровой экономики будущего. *Стандарты и качество*. 2023. № 6. С.42-44. EDN: BDDOZZ.
- [7] **Денисова О.А., Дмитриева С.Ю.** SMART-стандартизация в России. *Стандарты и качество*. 2023. № 7. С.42-46. EDN: WFFRQP.
- [8] **Дмитриева С.Ю., Кубишин О.И., Керимова В.В.** Архитектура и форматы данных в SMART-стандартах: введение. *Стандарты и качество*. 2024. № 3. С.34-38. EDN: MERNEN.
- [9] **Денисова О.А., Дмитриева С.Ю.** ПТК 711 «Умные (SMART) стандарты»: подводим промежуточные итоги. *Стандарты и качество*. 2024. № 6. С.62-67. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-6-128-24.
- [10] Проектный технический комитет 711 «Умные (SMART) стандарты» URL: <https://www.gostinfo.ru/pages/Standardization/ptk711>.
- [11] ПНСТ 864-2023. Умные (SMART) стандарты. Общие положения. Дата введения 2024-02-01. URL: https://allgosts.ru/35/020/pnst_864-2023.
- [12] ГОСТ Р 59277 2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. Дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ 2021. 16 с.
- [13] **Максимов Н.В., Широков В.И., Шаманин А.Ю.** Подход к разработке онтологии для предметной области электроэнергетики на основании стандартов ISO 15926, IEC 61970. *Автоматизация процессов управления*. 2019. №2(56). С.59-66. EDN: IBOXMW.
- [14] **Лисин В.А., Серый А.С., Сидорова Е.А.** Модель представления онтологии предметных областей на основе графовых баз данных. *Вестник Новосибирского государственного университета*. Серия: Информационные технологии. 2022. Т.20, №4. С.24-38. DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-4-24-38.
- [15] **Загоруйко 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] **Полетаева Е.В., Горлов И.В.** Решение задач синтеза производственных систем на основе онтологии предметной области машиностроения // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. 2019. №2(2). С.40-50. EDN: JVLHRM.
- [17] **Полетаева Е.В., Горлов И.В.** Реализация обработчика онтологии предметной области машиностроения. *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. 2023. № 4(20). С.76-83. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-4-76-83.

- [18] Антонов А.А., Быков А.Н., Чернышев С.А. Обзор существующих способов формирования онтологии предметной области при моделировании. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2021. Т.6, №22. С.12-17. EDN: WMBSEO.
- [19] Шищенко М.А. Подходы к автоматизации работ с онтологическими ресурсами. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.256-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2256-269.
- [20] ТУ 3612-024-00220302-02. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. ОАО «ВНИИнефтемаш». 2002. 112 с.
- [21] ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. Дата введения 1999-09-22. М: ИПК Издательство стандартов 1999. 16 с.

Сведения об авторах



Мокрозуб Владимир Григорьевич, 1952 г. рождения. Окончил Тамбовский институт химического машиностроения (1974), д.т.н. (2018), профессор (2011). Заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» Тамбовского государственного технического университета. Член-корреспондент Российской академии естественных наук. В списке научных трудов более 200 работ в области САПР и управления предприятиями машиностроительного и химического профиля. ORCID: 0000-0001-6483-8732; AuthorID (РИНЦ): 174837; AuthorID (Scopus): 56976333700; ResearcherID (WoS): GRX-9215-2022. mokrozubv@yandex.ru.



Альсаиди Аббас Атван Мохавс, 1984 г. рождения. Окончил Политехнический университет Бухареста (2017), магистр (2023). Аспирант Тамбовского государственного технического университета кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». В списке научных трудов семь работ. ORCID: 0009-0001-4084-2152; Author ID (Scopus): 57463110000. abbas.atwan@gmail.com.

Поступила в редакцию 30.07.2024, после рецензирования 25.09.2024. Принята к публикации 30.09.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606

Decision support system for selecting the type of shell-and-tube heat exchanger

© 2024, V.G. Mokrozub✉, A.A.M. Alsaiddi

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract

The article discusses the development of an ontology for the subject area using a shell-and-tube heat exchanger as an example. This ontology enables the selection of the type of heat exchanger (fixed tube sheets, compensator, U-shaped tubes) based on the coolant (ammonia, methanol), heat exchange process conditions (pressure, temperature), and the geometric parameters of the heat exchanger (device diameter). The ontology is designed for use in the hardware design phase of chemical-engineering systems. A functional model is presented that outlines the key stages and information flows in the hardware design of chemical-engineering systems. Each design stage utilises an information model, converting the input information flow into an output one. The article describes an information model for selecting the type of heat exchanger, represented by production rules, which includes operators for determining the material of the heat exchanger elements based on the coolant, material-specific design, and the type of heat exchanger. A prototype of the described information model is implemented in the Protégé ontology editor. The ontology and an example query for determining the type of heat exchanger for a given coolant and heat exchange process parameters are provided. The data for creating the ontology are sourced from regulatory design documents. The article concludes that an ontological ap-

proach is feasible for creating "smart" design documents, including standards and technical specifications comprehensible to both humans and computers.

Keywords: chemical production, process equipment, heat exchanger, designing, functional model, information model, ontology, decision making.

For citation: Mokrozub V.G., Alsaidi A.A.M. Decision support system for selecting the type of shell-and-tube heat exchanger [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 595-606. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606.

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

List of figures

Figure 1 – High-level design diagram of a chemical-engineering system

Figure 2 – A0 diagram of the chemical-engineering system design process

Figure 3 – Example of apparatus taxonomy

Figure 4 – Example of properties taxonomy of processed substances

Figure 5 – Graphical interpretation of the "If ... then ..." rule

Figure 6 – Entity classes

Figure 7 – Properties of objects

Figure 8 – Data

Figure 9 – Example of determining the material of the heat exchanger elements depending on the coolant, *Fm* operator, expression (1)

Figure 10 – Example of determining the heat exchanger design on the material of the elements, *Fmt* operator, expression (2)

Figure 11 – Example of the rule for determining the type of heat exchanger depending on the material and operating conditions, operator *Ft*, expression (3)

Figure 12 – Example of a request to determine the type of heat exchanger

References

- [1] **Egorov AF, Savitskaya TV, Mikhailova PG.** The current state in the field of analysis, synthesis and optimal functioning of multiassortment digital chemical industries: an analytical review [In Russian]. *Theoretical foundations of chemical technology*. 2021; 55(2): 154-187. DOI: 10.31857/S004035712101006.
- [2] **Nurgaliev RK, Shinkevich AI.** Application of modeling tools in the framework of the functioning of "smart" petrochemical production [In Russian]. *Computational Nanotechnology*. 2021; 8(1): 46-58. DOI: 10.33693/2313-223X-2021-8-1-46-58.
- [3] **Bogomolov BB, Boldyrev VS, Zubarev AM, Meshalkin VP, Menshikov VV.** Intelligent logic and information algorithm for choosing energy-efficient chemical technology [In Russian]. *Theoretical foundations of chemical technology*. 2019; 53(5): 483-492. DOI: 10.1134/S0040357119050026.
- [4] **Meshalkin V.P., Panina E.A.** Methodology for the development of specialized ontology on chemical technology of reagents and especially pure substances [In Russian]. *Reports of the Academy of Sciences*. 2018; 479(5): 527-531. DOI: 10.7868/S0869565218110117.
- [5] Equipment for oil and gas processing, chemical and petrochemical industries: textbook [In Russian]. under the general editorship of A.S. Timonin. Moscow; Vologda: Infra-Engineering. 2022. 948 p.
- [6] **Denisova OA, Dmitrieva SYu.** SMART-standards: normative documents for the digital economy of the future [In Russian]. *Standards and quality*. 2023; 6: 42-44.
- [7] **Denisova OA, Dmitrieva SYu.** SMART-standardization in Russia [In Russian]. *Standards and quality*. 2023; 7: 42-46.
- [8] **Dmitrieva SYu, Kubyshkin OI, Kerimova VV.** Architecture and data formats in SMART standards: introduction [In Russian]. *Standards and Quality*. 2024; 3: 34-38.
- [9] **Denisova O.A., Dmitrieva S.Yu.** PTK 711 «Smart standards»: summing up the interim results [In Russian]. *Standards and quality*. 2024; 6: 62-67. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-6-128-24.
- [10] Project Technical Committee 711 «Smart standards» [In Russian]. URL: <https://www.gostinfo.ru/pages/Standardization/ptk711>.
- [11] PNST 864-2023. SMART standards. General provisions [In Russian]. Date of introduction 2024-02-01.
- [12] GOST R 59277 2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems [In Russian]. Date of introduction 2021-03-01. Moscow: Standartinform 2021. 16 p.

- [13] **Maksimov NV, Shirokov VI, Shamanin AYu.** An approach to the development of ontology for the subject area of electric power industry based on ISO 15926, IEC 61970 standards [In Russian]. *Automation of management processes*. 2019; 2(56): 59-66. EDN: IBOXMW.
 - [14] **Lisin VA, Seriy AS, Sidorova EA.** A model for representing the ontology of subject areas based on graph databases [In Russian]. *Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technology*. 2022; 20(4): 24-38. DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-4-24-38.
 - [15] **Zagorulko GB.** A 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] **Poletaeva EV, Gorlov IV.** Solving the problems of synthesis of production systems based on the ontology of the subject area of mechanical engineering [In Russian]. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Technical Sciences*. 2019; 2(2): 40-50. EDN: JVLHRM.
 - [17] **Poletaeva E.V., Gorlov I.V.** Implementation of the ontology handler of the subject area of mechanical engineering [In Russian]. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Technical Sciences*. 2023; 4(20): 76-83. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-4-76-83.
 - [18] **Antonov A.A., Bykov A.N., Chernyshev S.A.** Review of existing methods for forming domain ontology in modeling [In Russian]. *International Journal of Information Technology and Energy Efficiency*. 2021; 6(22): 12-17. EDN: WMBSEO.
 - [19] **Shishenkov M.A.** Approaches to automating processes of working with ontological resources [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 256-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2256-269.
 - [20] TU 3612-024-00220302-02. Shell-and-tube heat exchangers with fixed tube grids and shell-and-tube heat exchangers with a temperature compensator on the casing [In Russian]. JSC «VNIIneftemash». 2002. 112 p.
 - [21] GOST R ISO 10303-1-99. Production automation systems and their integration. Presentation of product data and exchange of this data. Part 1. General concepts and fundamental principles [In Russian]. Date of introduction 1999-09-22. Moscow: IPK Publishing House of Standards 1999. 16 p.
-

About the authors

Vladimir Grigoryevich Mokrozub (b. 1952) graduated from the Tambov Institute of Chemical Engineering (TIKHM) in 1974, Doctor of Technical Sciences (2018), Professor (2011). Head of the Department of Computer Integrated Systems in Mechanical Engineering at the Tambov State Technical University. Corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences. The list of scientific papers includes more than 200 works in the field of CAD and management of engineering and chemical enterprises. ORCID: 0000-0001-6483-8732; Author ID (RINA): 174837; Author ID (Scopus): 56976333700; Researcher ID (WoS): F-8418-2017. mokrozubv@yandex.ru. ✉.

Abbas Atwan Mohaves Alsaidi (b. 1984) graduated from the Polytechnic University of Bucharest in 2017, Master's degree (2023). Postgraduate student at the Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering of the Tambov State Technical University. The list of scientific works includes about 7 works. ORCID: 0009-0001-4084-2152; Author ID (Scopus): 57463110000. abbas.atwan@gmail.com.

Received July 30, 2024. Revised September 25, 2024. Accepted September 30, 2024.



Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений¹

© 2024, В.Б. Чечнев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация

Для принятия решений требуется подробная проработка и анализ путём оценки и сравнения различных альтернативных вариантов решений. Такие задачи характеризуются наличием нескольких критериев, по которым происходит сравнение. Вариативность параметров и условий принятия решения послужили причиной создания большого числа методов, способствующих эффективному осуществлению этого процесса. Известно несколько сотен многокритериальных методов принятия решений. При их практическом использовании сложно произвести отбор наиболее подходящего метода. В связи с этим, работы по анализу, классификации и систематизации многокритериальных методов принятия решений являются актуальными и востребованными, так как на них опираются лица, принимающие решения, и разработчики систем поддержки принятия решений. В большинстве классификаций акцентируется внимание на методологиях и целях методов, оставляя без рассмотрения присущие им ограничения. В статье делается попытка систематизировать основные многокритериальные методы принятия решений с учётом их ограничений. В работе проведён анализ наиболее распространённых методов и их классификаций. По результатам выявленных ограничений предложена классификация многокритериальных методов принятия решений и правила для их отбора. Применение данного подхода может позволить повысить обоснованность выбора методов и, как следствие, эффективность принимаемых решений.

Ключевые слова: методы принятия решений, поддержка принятия решений, многокритериальная оценка, многокритериальные задачи, формализация предпочтений.

Цитирование: Чечнев В.Б. Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С. 607-624. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Процесс принятия решений (ПР) всегда связан с оценкой большого количества факторов и рассмотрения возможных альтернатив, поэтому его можно определить как сложный интеллектуальный процесс, целью которого является выбор оптимального решения на основе различных критериев, определяемых лицом, принимающим решение (ЛПР). Основной сложностью в выборе одной из альтернатив является то, что критерии оценки зачастую конфликтуют между собой, что в большинстве случаев делает невозможным выбор решения, превосходящего все остальные по каждому из критериев [1]. Поэтому для ПР ЛПР используют один или комбинацию из нескольких многокритериальных методов ПР (ММПР).

ММПР разрабатывались в трудах отечественных и зарубежных авторов в различных областях. Например, среди отечественных исследователей можно отметить: решение многокритериальных задач линейного программирования (академик С.В. Емельянов [2]); задачи

¹ Редакция вновь даёт дорогу молодым авторам, которые смело берутся за обзорные статьи. Во втором номере журнала за этот год был опубликован обзор подходов к автоматизации работ с онтологическими ресурсами, подготовленный молодым научным сотрудником М.А. Шишенковым. Представляемый на суд читателям обзор по методам принятия решений со многими критериями призван повысить эффективность принимаемых решений. Редакция ожидает получить обратную связь от читателей и новые работы в этой области с той же целью, которую для себя обозначил молодой автор. *Прим. ред.*

оптимального управления (академик Н.Н. Моисеев [3]); многокритериальную оптимизацию с ранжированием критериев по важности (профессор Е.С. Вентцель [4]); ММПР при конструировании машин и механизмов (И.М. Соболев и Р.Б. Статников [5]); методы свёртки критериев в многокритериальных задачах оптимизации (профессор Ю.Б. Гермейер [6]); методы сравнения важности неоднородных критериев и групп критериев (профессор В.В. Подиновский [7]) и др. По данным научной электронной библиотеки *elibrary.ru*, а также публикациям [8, 9] в последние годы наблюдается рост статей по ММПР.

Целью данного исследования является систематизация ММПР и разработка их классификации, которая могла бы повысить эффективность выбора ММПР при создании специализированного программного обеспечения (ПО) для систем поддержки ПР (СППР). Для достижения цели необходимо провести анализ существующих ММПР, их основных классификаций и выявить ключевые ограничения ММПР.

1 Основные ММПР

1.1 Определение области исследования

Опыт по созданию ММПР позволил накопить большой объём различных моделей, подходов и целых семейств методов [8]. Известно более 200 ММПР и их количество продолжает расти [9, 10]. Целесообразным является рассмотрение наиболее распространённых на практике ММПР, где измеряемым показателем распространённости принято число научных работ о методе (см. таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Наиболее часто используемые многокритериальные методы принятия решений (согласно [8])

Оригинальное название метода	Перевод	Количество научных статей с методом
<i>Fuzzy sets</i> [11]	Нечёткие множества	1471
<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)</i> [12]	Метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	939
<i>Analytic Network Process (ANP)</i> [13]	Метод анализа сетей	281
<i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)</i> [14]	Лаборатория испытаний и оценки ПР	227
<i>Best-Worst Method (BWM)</i> [15]	Метод лучшего-худшего	174
<i>Visekriterijumska Kompromisno Rangiranje (VIKOR)</i> [16]	Компромиссный рейтинг по многим критериям	168
<i>Fuzzy AHP</i> [17]	Нечёткий метод анализа иерархий	162
<i>Fuzzy TOPSIS</i> [18]	Нечёткий метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	162
<i>ENTROPY</i> [19]	Энтропия	122
<i>Grey Relational Analysis (GRA)</i> [20]	Серый реляционный анализ	106

Данные, представленные в таблице 1, являются результатом анализа баз данных (БД) *Web of Science* и *EBSCO Discovery Service engine* с 2018 по 2023 гг. Из таблицы 1 видно, что преобладают *Fuzzy*-методы и метод *TOPSIS*.

Для оценки распространённости методов в научном дискурсе использовались показатели общего количества работ в БД «*ScienceDirect*» в период с 2012 по 2022 гг. (см. таблицу 2).

Основные ММПР, представленные в научных публикациях по степени их практического использования, приведены в таблице 3.

Исходя из представленных результатов исследований [8, 9, 38], можно ограничить круг рассматриваемых ММПР следующими методами: *SAW*, *MAUT*, *MAVT*, *SMART*, *AHP*, *ANP*, *BWM*, *TOPSIS*, *VIKOR*, *CBR*, *DEA*, *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *Fuzzy*-методами и *GRA*.

Таблица 2 – Наиболее часто используемые многокритеральные методы принятия решений (согласно [9])

Оригинальное название	Перевод	Количество научных статей с методом
<i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i> [21]	Метод анализа иерархий	15452
<i>Data Envelopment Analysis (DEA)</i> [22]	Анализ охвата данных	9367
<i>Fuzzy sets</i> [11]	Нечёткие множества	8730
<i>TOPSIS</i> [12]	Метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	8241
<i>Case-Based Reasoning (CBR)</i> [23]	На основе прецедентов	3258
<i>GRA / Grey Relational Model (GRM)</i> [20]	Серый реляционный анализ / Серая реляционная модель	3176
<i>ANP</i> [13]	Метод анализа сетей	3126
<i>Fuzzy AHP</i> [17]	Нечёткий метод анализа иерархий	2804
<i>Élimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE)</i> [24]	Исключение и выбор, преобразующий реальность	2782
<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)</i> [25]	Метод организации ранжирования предпочтений для обогащения оценок	2715
<i>VIKOR</i> [16]	Компромиссный рейтинг по многим критериям	2691
<i>Fuzzy TOPSIS</i> [18]	Нечёткий метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	2014
<i>DEMATEL</i> [14]	Лаборатория испытаний и оценки ПР	1378
<i>Preference Ranking Global frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA)</i> [26]	Ранжирование глобальных частот в многокритериальном анализе	1267
<i>Simple Additive Weighting (SAW)</i> [27]	Простое аддитивное взвешивание	976
<i>Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)</i> [28]	Многокритериальная теории полезности	948
<i>BWM</i> [15]	Метод лучшего-худшего	867
<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART)</i> [29]	Простая методика многокритериальной оценки	646
<i>Fuzzy ANP</i> [30]	Нечёткий метод анализа сетей	586
<i>Weighted Sum Model (WSM)</i> [31]	Модель взвешенной суммы	470
<i>COmplex PROportional ASsessment (COPRAS)</i> [32]	Комплексная пропорциональная оценка	445
<i>Multiple-Attribute Value Theory (MAVT)</i> [33]	Многокритериальная теория ценности	315
<i>Dominance-based Rough Set Approach (DRSA)</i> [34]	Подход грубого набора, основанный на доминировании	278
<i>Weighted Aggregated Sum Product ASsessment (WASPAS)</i> [35]	Оценка результата взвешенной агрегированной суммы	270
<i>Weighted Product Model (WPM)</i> [36]	Модель взвешенных результатов	198
<i>Measuring Attractiveness by a Categorical-Based Evaluation TecHnique (MACBETH)</i> [37]	Измерение предпочтительности с помощью категориального метода оценки	162

1.2 Анализ ММПР

Среди ММПР, представленных в таблице 2, первым был разработан метод *SAW*. Несмотря на относительно малое количество упоминаний в научных исследованиях последних лет, *SAW*

является одним из самых востребованных ММПР (см. таблицу 3). Это обусловлено простым алгоритмом расчёта, который можно реализовать без использования специализированных компьютерных инструментов [38]. Основой идеей метода является объединение значений и

Таблица 3 – Частота практического применения многокритеральных методов принятия решений (согласно [38])

Метод	Описанные случаи практического использования
<i>AHP</i> , <i>fuzzy AHP</i> , трапециевидный <i>fuzzy AHP</i> и <i>ANP</i>	70
<i>TOPSIS</i> , <i>fuzzy TOPSIS</i> и модификации <i>TOPSIS</i>	22
<i>SAW</i>	21
Целевое программирование	10
<i>ELECTRE</i>	7
<i>MAUT</i> и <i>MAVT</i>	7
<i>PROMETHEE</i>	5
<i>VIKOR</i> и <i>fuzzy VIKOR</i>	3
Прочие	20

весов критериев в единый критерий. *SAW* обладает характерными для многих ММПП недостатками: невозможно использовать качественные данные без их перевода в количественные, необходимо наличие заранее известных данных, в т.ч. и весов критериев [39, 40].

Развитие *SAW* получил в методах *MAUT*, *MAVT* и *SMART*. Эти методы связаны друг с другом, т.к. *MAUT* расширяет *MAVT*, а *SMART* разработан, чтобы обеспечить простой способ реализации метода *MAUT* [41, 42]. Данная группа методов помогает определить наилучшую альтернативу, назначая полезность каждому возможному последствию и вычисляя наилучшую возможную полезность. Метод *MAVT* стал основой данного направления в ММПП. Процедура помощи при ПР, предлагаемая *MAVT*, заключается в выстраивании альтернатив, сравнении их по общему набору критериев, присвоении баллов каждой альтернативе в соответствии с её эффективностью по каждому критерию, взвешивании этих критериев и расчёте общего балла для каждой альтернативы [43]. Ключевым элементом *MAVT* является концепция уровней предпочтений [44]. Основными недостатками *MAVT* являются: полная компенсация критериев и возникающая потребность в концептуальном усложнении при попытках формально определить значение оценок и весов [43, 44].

Метод *MAUT* привнёс нововведение в основную идею *MAVT*. Его главное преимущество – способность учитывать неопределённость, поэтому *MAUT* нашёл широкое применение в экономике, финансах, управлении водными ресурсами и др. сферах, содержащих значительную степень неопределённости и достаточное количество доступных данных [41]. Среди преимуществ метода *MAUT* можно выделить следующие:

- учёт последствий на каждом этапе [39];
- возможность оценки вновь появляющихся альтернатив [40];
- возможность проведения анализа большого количества альтернатив [45].

В развитие метода *MAUT* появился *SMART* – одна из простейших его форм, которая преобразует веса важности в фактические числа [38]. В последствии были созданы методы *SMARTS* и *SMARTER* [42]. Основные преимущества *SMART* в том, что он прост в использовании, допускает любые методы присвоения весов, что требует меньших усилий со стороны ЛПР, чем *MAUT*, и *SMART* хорошо обрабатывает данные по каждому критерию [38]. Метод чувствителен к большому количеству критериев и учёту диапазонов шкал при определении весов критериев [40, 42].

Самая востребованная группа методов (см. таблицы 2, 3) – *AHP* и *ANP*. *AHP* – позволяет принимать сложные решения, разделяя их на иерархические уровни. Его можно использовать для определения относительной важности различных критериев при ПР или для определения того, какой из нескольких вариантов является наилучшим выбором. В *AHP* используется попарное сравнение критериев для определения их относительной важности и объединение оценки для ПР [46]. Среди достоинств метода выделяются [39]:

- иерархическая структура проблем ПР;
- возможность объединения результатов от нескольких экспертов;
- возможность оценивать количественные и качественные показатели.

ANP является развитием метода *AHP*, поэтому унаследовал от него большую часть достоинств и недостатков. *ANP* не требует строгих иерархических отношений, позволяет рассматривать взаимосвязанные критерии и расставлять приоритеты для групп или кластеров элементов [38]. Среди общих для обоих методов ограничений выделяют то, что коэффициент согласованности допускает противоречивые суждения в матрицах сравнения [39].

Среди методов, использующих попарное сравнение, можно выделить – *BWM*. В *BWM* ЛПР определяет лучший и худший критерии с последующим проведением попарных сравнений между каждым из этих критериев [15]. Эти наборы попарных сравнений используются в качестве входных данных для задачи оптимизации, результатами которой являются веса критериев (альтернатив) [15]. В *BWM* используется меньше сравнений, чем в *AHP* за счёт отсут-

ствия попарного сравнения альтернатив по всем критериям, что делает его более надёжным, согласованным и простым в реализации [47]. Возможность оценивать количественные и качественные показатели является важным преимуществом данного метода. *BWM* подходит для индивидуального и группового ПР. Базовый *BWM* включает нелинейную модель, которая иногда приводит к нескольким оптимальным весам, где вес каждого критерия представлен в виде интервала [48].

Наравне с *AHP* и *ANP* востребованным ММПП является метод *TOPSIS* (см. таблицы 1-3). Основной принцип работы *TOPSIS* заключается в измерении сходства альтернатив с идеальным решением, удалённости от худшего решения и последующем ранжировании с учётом весов используемых критериев [49]. Метод прост в использовании и программной реализации, а количество шагов остаётся неизменным независимо от числа атрибутов [38]. Результаты, получаемые данным методом, остаются устойчивыми при добавлении новых альтернатив, а входные данные не требуется преобразовывать перед использованием [39]. Отмечаются следующие слабые стороны метода *TOPSIS* [50]:

- требуется независимость критериев, которую трудно гарантировать;
- может приводить к предвзятому ранжированию;
- могут возникать ситуации, когда не существует альтернативы, одновременно удалённой от отрицательного и близкой к положительному идеальному решению.

Метод *VIKOR*, как и метод *TOPSIS*, основан на агрегирующей функции, где степень нелинейности задаётся параметром [51]. В данном методе наилучшая альтернатива называется компромиссной и определяется по степени близости к идеальному [52]. Метод *VIKOR* подходит в случаях, когда ЛПП не имеет предпочтений в решении или не может выразить свои предпочтения на начальных этапах процесса ПР. Отмечаются следующие преимущества *VIKOR* [39]:

- способность принимать компромиссные решения, решения с максимальной групповой полезностью и минимальным индивидуальным сожалением;
- оценивание веса, которое позволяет проанализировать конечное компромиссное решение;
- компромиссное решение может быть заменено, если мера веса не укладывается в интервал.

Для работы *VIKOR* необходимо назначение весов критериев и конвертация качественных данных в количественные [39].

Среди рассматриваемых ММПП метод *CBR* используется для извлечения новых знаний из уже имеющихся данных [53]. Для работы *CBR* необходимо большое количество данных о различных ситуациях в прошлом, что является существенным ограничением для работы в инновационных проектах.

Методология *DEA* позволяет оценивать границу эффективности путём сравнения альтернатив с наилучшей производительностью с использованием методов математического программирования [54]. Концепция эффективности в *DEA* определяется как отношение полученных результатов к используемым ресурсам [55]. Данный подход позволяет выявить скрытые связи, а также включать в процесс ПР новые альтернативы без изменения порядка ранжирования [38]. *DEA* не подходит для ситуаций, когда невозможно получить точные данные по альтернативам, а также имеет ограничение по количеству альтернатив и критериев [39].

Иной подход к организации процесса ПР базируется на теории отношения превосходства. Известными представителями таких ММПП являются *ELECTRE* и *PROMETHEE*.

ELECTRE – методы, которые развиваются с 60-х годов прошлого века, и известны в нескольких вариантах [56]. Все варианты метода *ELECTRE* имеют схожий принцип работы, но различаются по типам решаемых задач. Схема работы метода *ELECTRE* состоит в сравнении каждой пары альтернатив и обнаружении доминирующей и не доминирующей альтернативы. Из принципа работы следует наличие лишь относительной оценки альтернатив, а не абсолютной. Среди преимуществ данного семейства методов выделяют [40, 56-58]:

- быстроту процедуры решения задач;

- введение понятия «несравнимости альтернатив»;
- наличие встроенного инструмента анализа для ЛПР и поэтапность выявления предпочтений ЛПР.

К ограничениям метода относятся [40, 56-58]:

- использование пороговых значений, которые могут быть произвольными, но при этом способны оказывать существенное влияние на окончательное решение;
- неспособность обрабатывать порядковые шкалы;
- удаление или добавление альтернативы может изменить ранжирование между остальными;
- необходимо наличие заранее известных весов критериев.

PROMETHEE – это семейство методов, которые используют несколько итераций для получения рейтинга среди конечного набора альтернатив. Ограничением метода является отсутствие чёткой методики присвоения весов критериям [38]. В случае большого количества критериев могут появиться сложности с оценкой результатов, а при добавлении новой альтернативы необходимо заново проводить анализ [39]. По целям использования выделяются следующие представители *PROMETHEE*:

- *PROMETHEE I* – частичное ранжирование;
- *PROMETHEE II* – полное ранжирование;
- *PROMETHEE III* – ранжирование на основе интервалов;
- *PROMETHEE IV* – набор решений для частичного и полного ранжирования;
- *PROMETHEE V* – проблемы, связанные с ограничениями сегментации;
- *PROMETHEE VI* – представление человеческого мозга;
- *PROMETHEE GDSS* – групповое ПР;
- *PROMETHEE GAIA* – графическое представление.

Важным общим преимуществом таких подходов является отсутствие компенсации между критериями и любых процессов нормализации, изменяющих исходные данные.

Методы *ELECTRE* и *PROMETHEE* возможно применить для отбрасывания некоторых неприемлемых альтернатив и впоследствии использовать другой ММПП для выбора наилучшего решения.

Значимым для теории принятия многокритериальных решений является использование понятий нечёткой логики и теории нечётких множеств «*Fuzzy set theory*» (*FST*) [11]. Использование теории нечётких множеств создаёт возможность перехода от бинарных категорий обычной логики к множеству альтернатив среди них. Применение методов *FST* позволяет [59, 60]:

- использовать нестрогие рассуждения в системах управления;
- принимать решения в условиях неопределённости;
- моделировать приёмы мышления человека.

Многие из рассмотренных ММПП были расширены с помощью *FST* (*Fuzzy MAUT*, *Fuzzy ANP*, *Fuzzy PROMETHEE*, *Fuzzy MAVT*, *Fuzzy ELECTRE* и т.д.) [61].

Одним из ведущих ММПП в области работы с неполной информацией является метод *GRA*. Это подход к ПР с частично известной и частично неизвестной информацией в сложных системах со взаимосвязанными критериями [32, 62]. В *GRA* осуществляется анализ отношений сходства между эталонным значением и альтернативой. Избранный альтернативный ряд, имеющий наиболее близкое сходство с эталоном, является лучшим решением. *GRA*, в отличие от *FST*, даёт ЛПР возможность изменения цели в процессе ПР [63]. Одним из типичных недостатков большинства ММПП, способных работать при неполноте информации, является сложность вычислений, что характерно и для *GRA*. Важным ограничением метода является невозможность использования качественных показателей [64].

Большинство рассматриваемых методов могут давать схожие результаты. Несмотря на разные способы нормализации и агрегации данных, при ранжировании альтернатив с помощью ММПП достигается высокая корреляция Спирмена: 0,949 [65], 0,798 [66], 0,88 [67]. Представленные результаты характерны для статичного набора альтернатив и критериев. При сравнении показателей ранговой корреляции Спирмена показано, что с увеличением ко-

личества альтернатив сходство между результатами неизменного набора методов (*TOPSIS*, *SAW*, *AHP*, *ELECTRE*, *VIKOR* и т.д.) увеличивается, а с увеличением количества альтернатив – уменьшается [68]. Таким образом, наиболее остро проблема выбора ММПР стоит в ситуации ПР с большим количеством альтернатив и малым набором критериев, т.к. в данном случае наблюдается существенная разница между различными ММПР.

1.3 Подходы к решению задачи формализации предпочтений

Исходя из обозначенных в подразделе 1.2 проблем, характерных для большинства ММПР, трудно решаемой задачей является формализация предпочтений ЛПР и определения важности критериев. Можно отметить следующие особенности в этой области:

- ЛПР хорошо понимает условность и неопределённость назначаемых коэффициентов, поскольку ни один человек «не в состоянии облечь свои неформализованные предпочтения в точную числовую форму, и поэтому не доверяет полученному результату» [69];
- эксперты, специализирующиеся на технических областях, предпочитают выражать свои предпочтения, используя числовые значения, но в случае с представителями социальных наук чаще всего используются слова или лингвистические модели [70];
- при принятии социально значимых решений проблемы с формализацией предпочтений и неопределённостью результатов усиливаются конфликтами ценностей заинтересованных сторон и неопределённостью их реакции на выбор какой-либо альтернативы [71].

Названные особенности обуславливают необходимость предварительной работы с ЛПР с целью выявления, формулирования, конкретизации и анализа их предпочтений. Данная работа может проводиться как в явном, например, через проведение анкетирования или интервью перед использованием методов, для которых необходимо наличие весов критериев, так и в неявном виде, например, в рамках работы с методами, имеющими встроенный механизм оценки критериев (*MACBETH*, *BWM* и т.п.).

В задаче формализации предпочтений ЛПР существует множество подходов, которые могут применяться в зависимости от конкретной ситуации. В связи с тем, что для работы с большинством ММПР требуется наличие определённого перечня альтернатив и критериев и их изначально определённых весов, необходимым элементом процесса формализации является определение важности критериев путём назначения им весов. Выполнить это позволяют в т.ч. следующие методы:

- парного сравнения критериев [72];
- универсальных коэффициентов важности критериев [69];
- базирующиеся на аналитической взаимосвязи показателей предпочтения критериев [73];
- основанные на формальном подходе [73].

Одна из самых подробных классификаций методов определения коэффициентов важности представлена в работе [74]. В обобщённом формате она представлена на рисунке 1.

2 Классификация ММПР

2.1 Анализ существующих классификаций ММПР

В теории ПР имеются различные подходы к классификации методов многокритериального выбора, как при конечном, так и при бесконечном множестве альтернатив. Это связано с различными способами определения ключевого различительного критерия и с разработкой новейших ММПР. Например, можно выделить появление методов *FST*, которые, благодаря развитию математического аппарата, вышли за рамки большинства существовавших классификаций. Из-за роста количества ММПР становится всё сложнее выбрать наиболее подходящий среди них [75].

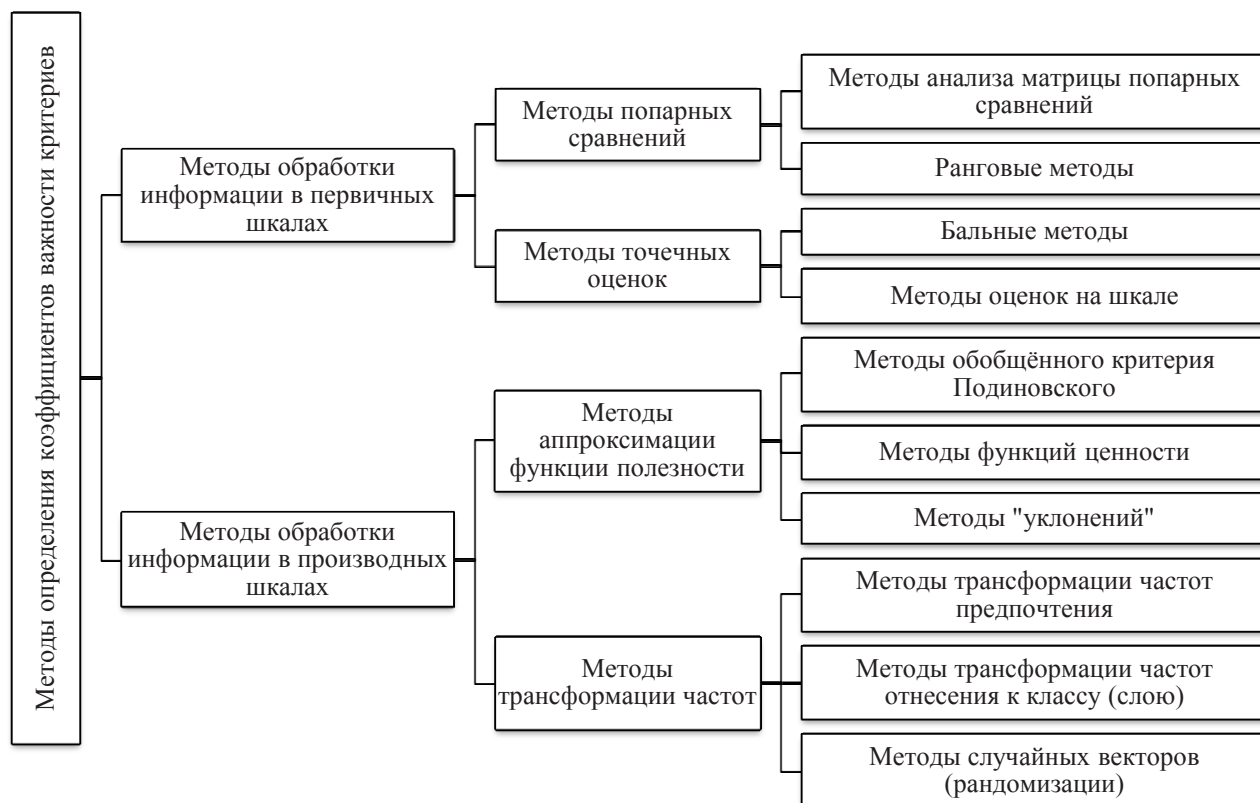


Рисунок 1 – Иерархическая классификация методов определения коэффициентов важности критериев [74]

ММПП можно представить в виде двух категорий [65]:

- *MODM (Multi-Objective Decision-Making)* – многоцелевое ПР – используется для определения оптимальной альтернативы с учётом ограничений в условиях наличия большого или бесконечного количества альтернативных решений.
- *MADM (Multi-Attribute Decision-Making)* – ПР по множеству атрибутов – используется, когда конечное число предложенных альтернатив оценивается по отношению к различным взвешенным атрибутам для получения рейтинга предпочтений, который описывает эффективность каждой альтернативы для достижения цели в отношении атрибутов.

На основе вышеописанного разделения было создано множество схожих классификаций. Одна из них представлена на рисунке 2.

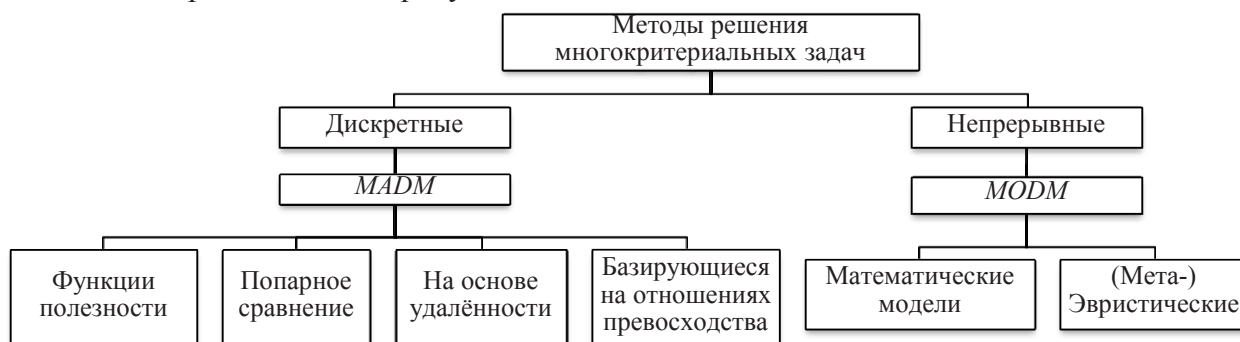


Рисунок 2 – Классификация MADM и MODM методов [76]

Рисунок 2 демонстрирует один из классических подходов к классификации ММПП – разделение на группы, исходя из их принципа анализа альтернатив.

Среди зарубежных классификаций ММПР можно выделить следующие [9]:

- по количеству ЛПР: индивидуальное ПР; групповое ПР.
- по компенсации критериев: компенсаторные; не компенсаторные.
- по отношению к компромиссам: компромиссные подходы; не компромиссные подходы.
- по отношению к типу используемых данных: качественные; количественные.
- по отношению к работе с неопределённостью данных: способные к использованию неопределённых данных; неспособные к использованию неопределённых данных.
- по принципу работы: нефункциональные модели; на основе функциональных моделей; базирующиеся на отношениях превосходства; использующие дискриминантный анализ.

Основным недостатком большинства этих классификаций является отсутствие достаточной информативности при использовании их в СППР. Следует отметить некоторые полезные характеристики для разработки подходящей для СППР классификации – наличие или отсутствие компенсации критериев, типы допустимых для обработки данных, возможность работы с неопределённостью данных.

Среди отечественных классификаций ММПР можно выделить следующие:

- по принципу работы методы [77]: доминантного анализа; многокритериальной оптимизации с ограничениями; многокритериальной оптимизации с взвешенными отклонениями от цели; вычисления приоритетов на основе парных сравнений; многоатрибутной оптимизации по полезности; многокритериальной классификации.
- по основным типам решаемых ими проблем [65]: выбор наилучшего решения из множества; ранжирование и сортировка решений; описание и систематизация решений; описание и систематизация последствий реализации решений.

Самым рассматриваемым видом классификаций являются различные вариации классификаций ММПР по схеме определения наилучшей альтернативы. Данный тип разделения ММПР имеет слабое влияние на выбор того или иного метода как ЛПР, так и программой. При этом использование вышеописанной классификации по наиболее подходящим для них видам задач – важный этап в работе СППР в рамках подбора ММПР, т.к. в первую очередь необходимо подобрать инструмент, способный решать рассматриваемую проблему.

Ещё одной альтернативой представленным выше классификациям по принципу работы может служить классификация, представленная на рисунке 3.



Рисунок 3 – Классификация методов решения многокритериальных задач на основе их принципа работы [78]

Таким образом, анализ имеющихся научных подходов позволяет сделать следующий вывод: существующие классификации достаточно подробно и разносторонне характеризуют ММПР с точки зрения их принципов работы и решаемых ими задач, но в то же время упускают из вида ограничения описываемых ММПР. Такая ситуация не позволяет в полной мере эффективно применять ММПР, т.к. ЛПР и разработчики СППР вынуждены проводить анализ подходящих под их цели ММПР на предмет соответствия этих ММПР требованиям их

задачи. Это подтверждает актуальность систематизации основных ММПР с помощью разработки классификации по ограничениям, характерным для данных методов.

2.2 Разработка классификации ММПР

В СППР существует несколько основных подходов к определению подходящего ММПР: «система правил», «алгоритм», «искусственная нейронная сеть» [45]. Это обосновано тем, что чаще всего ММПР применяются в группе. Поэтому специализированное ПО включает в себя большое количество не взаимодополняющих ММПР. В большинстве случаев такое ПО применяет «систему правил» (78,3%), смысл которой заключается в нахождении ММПР с помощью набора правил формата «если..., то...» [75].

Исходя из базовой концепции отбора ММПР в СППР, с учётом проведённого анализа существующих методов классификация ММПР должна отражать: разделение методов на их возможности работы с неопределённой информацией; учитывать наличие компенсации критериев; учитывать их зависимость от типов данных, с которыми они работают.

Трансформируя обозначенные ключевые элементы и выявленные в подразделе 1.2 ограничения ММПР в формат «системы правил», можно получить следующие правила, которые необходимо отразить в системе:

1. «Если в текущей задаче присутствуют неизвестные или неточные данные, то необходимо выбрать группу методов, способных работать с неопределённостью»;
 - 1.1. «Если неточные данные невозможно представить в виде набора дискретных значений, то необходимо выбрать группу методов, работающих с интервальными значениями данных»;
 - 1.1.1. «Если количество критериев больше семи, то необходимо выбрать группу методов, на которую это не оказывает существенного влияния» (*SMART*);
 - 1.1.2. «Если количество критериев меньше семи, то *следует* выбрать группу методов, чувствительных к количеству критериев» (*MAUT*);
 - 1.2. «Если неточные данные возможно представить в виде набора дискретных значений, то *следует* выбрать группу методов, оперирующих дискретными данными»;
 - 1.2.1. «Если предполагается изменение цели в рамках процесса ПР, то необходимо выбрать группу методов с возможностью изменения целей» (*GRA*);
 - 1.2.2. «Если изменения цели в рамках процесса ПР не предполагается, то *следует* выбрать группу методов со статичной целью» (*FST*);
2. «Если в текущей задаче отсутствуют неизвестные или неточные данные, то *рекомендуется* выбрать группу методов, способных работать только с заранее известными точными данными»;
 - 2.1. «Если в текущей задаче важно отсутствие компенсации критериев, то *следует* выбрать группу методов, без компенсации критериев»;
 - 2.1.1. «Если в текущей задаче присутствуют качественные данные, то *рекомендуется* выбрать группу ММПР, которые могут работать как с качественными, так и с количественными данными»;
 - 2.1.1.1. «Если в текущей задаче присутствуют отрицательные значения, то необходимо выбрать методы, в которых отсутствуют ограничения на использование отрицательных значений» (*MAVT, TOPSIS, VIKOR*);
 - 2.1.1.2. «Если в текущей задаче только положительные значения, то *следует* использовать методы, в которых применяются только положительные значения» (*SAW, DEA*);
 - 2.1.2. «Если в текущей задаче есть только количественные данные, то *рекомендуется* использовать группу методов, которые работают только с количественными данными»;
 - 2.1.2.1. «Если в текущей задаче существуют иерархические отношения между критериями, то необходимо выбрать методы, в которых рассматриваются иерархический вид критериев» (*AHP*);
 - 2.1.2.2. «Если в текущей задаче отсутствуют иерархические отношения между критериями, то необходимо выбрать методы, для которых не является важной иерархия критериев» (*ANP, BWM*);
 - 2.2. «Если в текущей задаче несущественно отсутствие компенсации критериев, то *следует* выбрать группу методов, с компенсацией критериев»;
 - 2.2.1. «Если в СППР существует БД ситуаций и в ней присутствует подобная текущей, то *рекомендуется* выбрать ММПР, использующие БД похожих ситуаций» (*CBR*);

2.2.2. «Если отсутствует БД ситуаций или в ней нет подобной текущей, то необходимо выбрать ММПП, не требующие БД похожих ситуаций» (*ELECTRE, PROMETHEE*);

Одной из особенностей данного набора правил является отсутствие строгих ограничений на выбор определённой группы ММПП (ключевые слова – *рекомендуется* и *следует*). Однако, использование именно указанных групп ММПП позволит ЛПП существенно сократить трудоёмкость процесса ПР и время ПР, что особенно характерно в случае с неопределёнными данными. Зачастую использование ММПП с «излишней функциональностью» может привести к существенному усложнению процесса получения и интерпретации результатов, тем самым нивелируя положительные стороны предлагаемой модели.

На основании изложенного предлагается следующая классификация ММПП по их ограничениям, представленная на рисунке 4. Среди всех 15 рассмотренных в данной статье ММПП лишь 4 позволяют учитывать неточные или неопределённые данные при работе (*GRA, MAUT, SMART, FST*), также большая часть методов обладает компенсацией критериев (*SAW, DEA, MAVT, TOPSIS, VIKOR, AHP, ANP, BWM*).

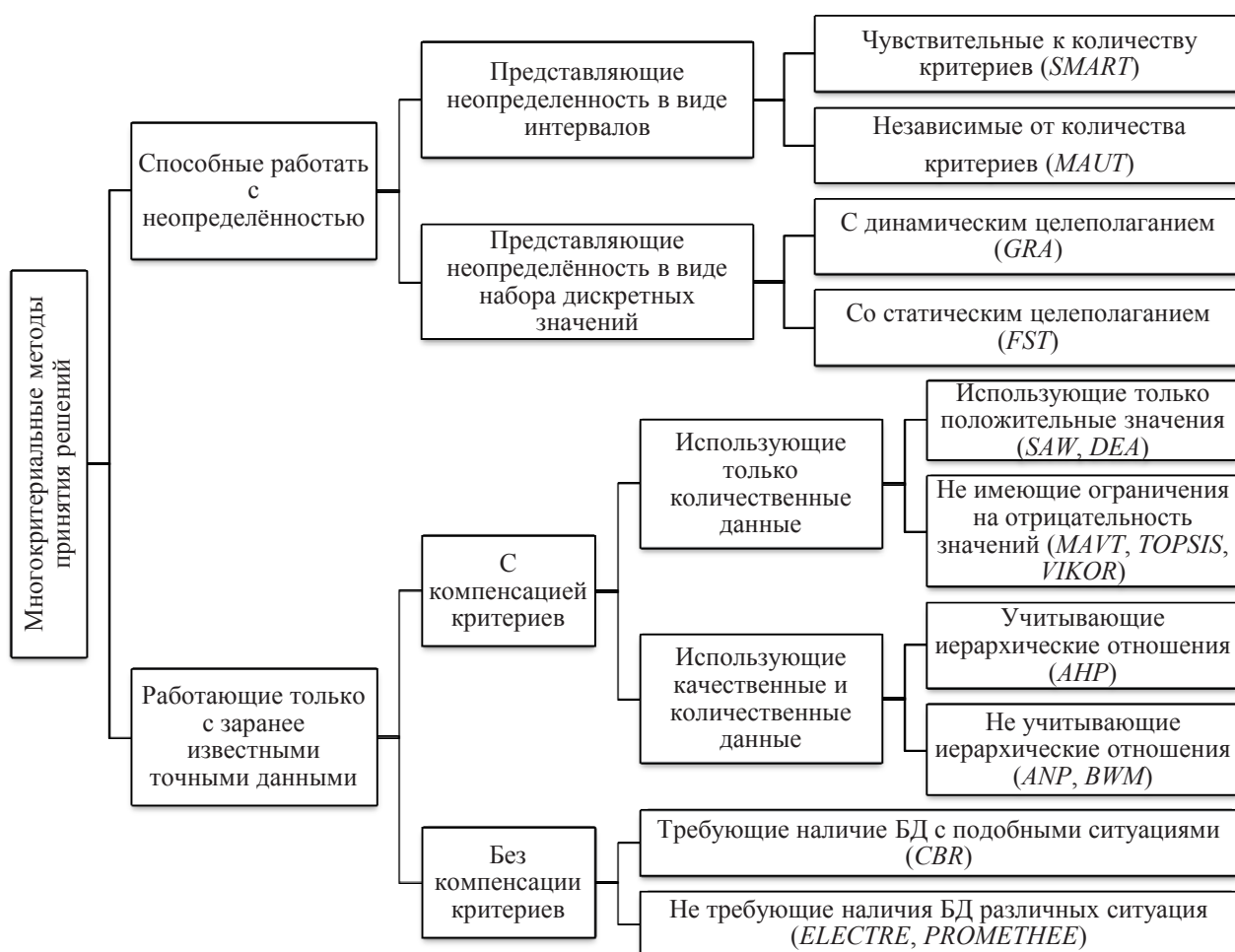


Рисунок 4 – Предлагаемая классификация ММПП по их ограничениям

Важным дополнением к разработанной классификации является классификация ММПП по основным типам решаемых ими проблем. Их комбинация обладает следующими преимуществами относительно имеющихся научных подходов:

- повышение прозрачности процесса ПР, качества принятых решений, удовлетворённости ЛПП полученным решением;
- сокращение времени на выбор подходящего ММПП и работу с выбранным ММПП;

Заключение

Проведённый анализ основных ММПП выявил, что многие методы, несмотря на разнообразие их методологий, обладают схожим набором ограничений и недостатков. Процесс ПР с помощью изученных ММПП связан со сложностью формализации предпочтений ЛПР. В связи с этим приведены список и классификации основных подходов к данной формализации. Ограничения ММПП послужили основой предлагаемой систематизации. Среди них можно выделить: ограничения по типам данных и их точности, а также ограничения по количеству критериев и наличию их компенсации.

Предложенная систематизация ММПП может быть полезна при разработке СППР, использующих рассмотренные в работе методы, а также ЛПР, которые для решения конкретной многокритериальной задачи стоят перед выбором ММПП. Разработанный принцип актуален в ситуациях ПР с большим количеством альтернатив и малым набором критериев. Предложенная в работе классификация позволяет с помощью системы правил отбирать наиболее подходящие методы. Это создаст для ЛПР возможность оказывать непосредственное влияние на процесс выбора ММПП, тем самым повышая его прозрачность и удовлетворённость полученным решением. Данный подход позволит сократить время на отбор ММПП и на его работу путём рекомендации наиболее эффективных ММПП при указываемых данных или ситуации.

Список источников

- [1] Демидовский А.В. Сравнительный анализ методов многокритериального принятия решений: ELECTRE, TOPSIS и ML-LDM // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2020. Т. 1. С.234-237.
- [2] Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений // Новое в жизни, науке, технике. 1985. № 10. С. 1-32.
- [3] Моисеев Н.Н., Иванов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1971. 352 с.
- [4] Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1976. 206 с.
- [5] Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 328 с.
- [6] Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. М.: Наука, 1971. 384 с.
- [7] Подиновский В.В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений // Многокритериальные задачи принятия решений / Под ред. С.В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1978. С.48-82.
- [8] Štílić A., Puška A. Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices // Eng. 2023. Vol. 4. P.1536-1549. DOI:10.3390/eng4020088.
- [9] Taherdoost H., Madanchian M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts // Encyclopedia. 2023. Vol.3. P.77-87. DOI:10.3390/encyclopedia3010006.
- [10] Cinelli M., Kadzinski M., Miebs G., Gonzalez M., Slowinski R. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system // European Journal of Operational Research. 2022. Vol. 302. P.633-651. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.01.011.
- [11] Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. P.338-353. DOI:10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [12] Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications—A State-of-the-Art Survey. New York: Springer, 1981. 269 p. DOI:10.1007/978-3-642-48318-9.
- [13] Saaty T.L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications, 1996. 370 p.
- [14] Gabus A., Fontela E. World Problems, an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL. Geneva: Battelle Geneva Research Center, 1972. P.1-8.
- [15] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // Omega. 2015. Vol. 53. P.49-57. DOI:10.1016/j.omega.2014.11.009
- [16] Duckstein L., Opricovic S. Multiobjective Optimization in River Basin Development // Water Resources Research. 1980. Vol. 16. P.14-20 DOI:10.1029/WR016i001p00014
- [17] Van Laarhoven P.J., Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory // Fuzzy Sets Systems. 1983. Vol. 11. P.229-241. DOI:10.1016/s0165-0114(83)80082-7.
- [18] Lai Y.-J., Liu T.-Y., Hwang C.-L. Topsis for MODM // European Journal of Operational Research. 1994. Vol. 76. P.486-500. DOI:10.1016/0377-2217(94)90282-8.
- [19] Shannon C. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P.379-423.
- [20] Ju-Long D. Control problems of grey systems // Systems & Control Letters. 1982. Vol. 1. P.288-294. DOI:10.1016/S0167-6911(82)80025-X.

- [21] **Saaty T.L.** A scaling method for priorities in hierarchical structures // Journal of mathematical psychology. 1977. Vol. 3. P.234-281. DOI:10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [22] **Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.** Measuring the efficiency of decision making units // European Journal of Operational Research. 1978. Vol. 2. P.429–444. DOI:10.1016/0377-2217(78)90138-8
- [23] **Kolodner J.L.** An introduction to case-based reasoning // Artificial intelligence review. 1992. Vol. 6.1. P.3-34. DOI:10.1007/bf00155578
- [24] **Benayoun R., Roy B., Sussman N.** Manual de Reference du Programme Electre // Note de Synthese et Formation. 1966. Vol. 25. 79 p.
- [25] **Brans J.-P.** L'ingénierie de la Décision: L'élaboration D'instruments D'aide a la Décision. Québec: Université Laval, Faculté des Sciences de L'administration, 1982. 256 p.
- [26] **Matarazzo B.** Preference Ranking Global Frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA) // European Journal of Operational Research. 1988. Vol. 36. P.36-49. DOI:10.1016/0377-2217(88)90005-7.
- [27] **Churchman C.W., Ackoff R.L.** An approximate measure of value // European Journal of Operational Research. 1954. Vol. 2. P.172–187. <http://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.
- [28] **Keeney R.L., Raiffa H., Mayer R.F.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 569 p. DOI:10.1017/CBO9781139174084.
- [29] **Edwards W.** Social utilities // Engineering Economist. 1971. Vol. 1. P.119-129.
- [30] **Mikhailov L., Singh M.G.** Fuzzy Analytic network process and its application to the development of decision support systems. // IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society. 2003. Vol. 33. P.33-41. DOI:10.1109/TSMCC.2003.809354.
- [31] **Fishburn P.C.** Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments // Journal of the Operations Research Society of America. 1967. P.537-542. DOI:10.1287/opre.15.3.537.
- [32] **Zavadskas E.K., Kaklauskas A., Sarka V.** The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects // Technological and Economic Development of Economy. 1994. Vol. 1(3). P.131-139.
- [33] **Keeney R.L., Raiffa H.** Decision with Multiple Objectives. New York: J.Wiley & Sons, 1976. 569 p.
- [34] **Greco S., Matarazzo B., Slowinski R.** Rough sets theory for multi-criteria decision analysis // European Journal of Operational Research. 2001. Vol. 1(129). P.1-47 DOI:10.1016/S0377-2217(00)00167-3.
- [35] **Zavadskas E.K., Turskis Z., Antucheviciene J., Zakarevicius A.** Optimization of weighted aggregated sum product assessment // Elektronika ir Elektrotechnika. 2012. Vol. (6)122. P.3-6. DOI:10.5755/j01.eee.122.6.1810.
- [36] **Bridgman P.W.** Dimensional Analysis. New Haven: Yale University Press, 1922. 112 p.
- [37] **Bana E., Costa C.A., Vansnick J.C.** The MACBETH Approach: Basic Ideas, Software, and an Application. In: Advances in Decision Analysis. Mathematical Modelling: Theory and Applications. Dordrecht: Springer, 1999. P.131-157. DOI:10.1007/978-94-017-0647-6_9.
- [38] **Velasquez M., Hester P.T.** An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // International Journal of Operations Research. 2013. Vol. 10. P.56-66.
- [39] **Kraujalienė L.** Comparative analysis of multicriteria decision-making methods evaluating the efficiency of technology transfer // Business, Management and Education. 2019. Vol. 17. P.72-93. DOI:10.3846/bme.2019.11014.
- [40] **Середенко Н.Н., Периков Ю.А., Дружаев А.А.** Сравнительный анализ многокритериальных методов принятия решений // Актуальные проблемы гуманитарных и архитектурных наук. 2010. № 1. С.83-86.
- [41] **Brito M.M., Evers M.** Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2016. Vol. 16(4). P.1019-1033. DOI: 10.5194/nhess-16-1019-2016.
- [42] **Patel M.R., Vashi M.P., Bhatt B.V.** SMART – Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities // Conf. on New Horizons in Civil Engineering (Surat, Gujarat, India, March, 2017). 2017. P.1-6.
- [43] **Morton A.** Multiattribute Value Elicitation // Operations Research & Management Science. 2018. Vol. 261. P.287-311. DOI:10.1007/978-3-319-65052-4_12.
- [44] **Jaffar A. et al.** An Innovative Approach in Decision-making Environments: Assessing Performance by Applying Multi-Attribute Value Theory (MAVT) // Asian Journal of Multidisciplinary Studies. 2015. Vol. 3. P.141-150.
- [45] **Артемяева А.Ю., Шакиров В.А., Яковкина Т.Н.** Многокритериальный выбор районов для размещения ветровых электрических станций // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3. С. 116-122. DOI:10.18324/2077-5415-2016-3-116-122.
- [46] **Esen H.** Analytical Hierarchy Process Problem Solution. In Analytic Hierarchy Process - Models, Methods, Concepts, and Applications. IntechOpen. DOI:10.5772/intechopen.1001072.
- [47] **Осинцев Н.А.** Выбор стратегии устойчивого развития транспортной компании комбинированным STEEP-BWM-SAW с интервальными приближительными числами // Вестник транспорта поволжья. 2022. № 3(93). С.73-81.
- [48] **Rezaei J.** A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method // International Journal of Information Technology & Decision Making. 2020. Vol. 3(19). P.891-907. DOI:10.1142/S0219622020500170.
- [49] **Халицкая К.** Выбор технологии с помощью метода TOPSIS // Форсайт. 2020. Т. 14. № 1. С.85-96. DOI:10.17323/2500-2597.2020.1.85.96.
- [50] **Ciardiello F., Genovese A.** A comparison between TOPSIS and SAW methods // Annals of Operations Research. 2023. Vol. 325. P.967-994. DOI:10.1007/s10479-023-05339-w.
- [51] **Заруцкий С.А.** Система выбора и настройки метода агрегирования как элемент инструментария СПИП в сфере региональной политики // Управление экономическими системами. 2013. № 11(59). С.57-73.
- [52] **Родзин С.И., Боженик А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н.** Методы нечёткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 2(232). С.186-200. DOI:10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.

- [53] **Вариавский П.Р., Ар Кар Мьо, Шункевич Д.В.** Применение методов классификации и кластеризации для повышения эффективности работы прецедентных систем // *Международный журнал Программные продукты и системы*. 2017. № 4(30). С.625-631.
- [54] **Алимханова А.Н., Мисель А.А.** Оценка эффективности предприятий на основе метода DEA // *Доклады ТУСУР*. 2019. № 2. С.104-108. DOI:10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108.
- [55] **Бикеева М.В., Сысоева Е.А.** DEA-модель для оценки эффективности реализации национального проекта «Демография» на территории Приволжского федерального округа // *Статистика и экономика*. 2023. №20(3). С.4-13. DOI:10.21686/2500-3925-2023-3-4-13.
- [56] **Taherdoost H., Madanchian M.** A comprehensive overview of the ELECTRE method in multi criteria decision-making // *Journal of Management Science & Engineering Research*. 2023. Vol. 6. P.5-16. DOI:10.30564/jmser.v6i2.5637.
- [57] **Кравченко Т.К., Дружаев А.А.** Адаптация методов семейства ELECTRE для включения в Экспертную систему поддержки принятия решений // *Бизнес-информатика*. 2015. № 2 (32). С.69-78.
- [58] **Терелянский П.В., Кузнецов С.Ю.** Методика ELECTRE и автоматизация ранжирования альтернатив // *E-Management*. 2022. Т.5. №3. С.26-37. DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37.
- [59] **Лебедева М.Е.** Нечёткая логика в экономике – формирование нового направления // *Идеи и идеалы*. 2019. Т.11. №1. С.197-212. DOI:10.17212/2075-0862-2019-11.1.1-197-212.
- [60] **Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А.** Нечёткая логика и нечёткие информационные технологии // *Отходы и ресурсы*. 2021. № 1. С.1-12. DOI:10.15862/10ECOR121.
- [61] **Шакиров В.А.** Принятие решений в условиях нечётких предпочтений на основе многокритериальной теории ценности // *Современные технологии*. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35). С.48-55.
- [62] **Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.** Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2023. №3. С.180-196. DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- [63] **Розенберг И.Н.** Управление в условиях неопределенности // *Современные технологии управления*. 2017. №7(79). С.1-18.
- [64] **Shihab S.K., Khan Z.A., Siddiquee A.N.** Application of Grey Relational Analysis Along with Principal Component Analysis for Multi-Response Optimization of Hard Turning // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2016. Vol.38. P.238-245.
- [65] **Осинцев Н.А.** Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // *Мир транспорта*. 2021. Т. 19. № 5(96). С.105-114. DOI:10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
- [66] **Клюков С.А.** Сравнение и разработка методов многокритериального анализа принятия решений // *Молодой ученый*. 2021. № 18(360). С.30-33.
- [67] **Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.** Выбор зелёных технологий в складской логистике – многокритериальный подход // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2021. Т.11. №1. С.4-17. DOI:10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17.
- [68] **Zamani-Sabzi H., King, J.P., Gard C.C., Abudu S.** Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment // *Operations Research Perspectives*. 2016. Vol.3. P.92-117. DOI:10.1016/j.orp.2016.11.001.
- [69] **Пиявский С.А.** Формулы для вычисления универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // *Онтология проектирования*. 2019. Т.9. № 2(32). С.282-298. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [70] **Martinez D.L., Acosta J.S.** Review of modeling preferences for decision models // *European Scientific Journal*. 2015. Vol.11. P.1-18.
- [71] **Khadpe P. et al.** DISCERN: Designing Decision Support Interfaces to Investigate the Complexities of Workplace Social Decision-Making With Line Managers // *arXiv preprint arXiv:2402.19318*. 2024. DOI:10.1145/3613904.3642685.
- [72] **Спиридонов С.Б., Булатова И.Г., Постников В.М.** Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2017. Т.9. №6. С.1-24.
- [73] **Постников В.М., Спиридонов С.Б.** Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015. №6. С.267-287. DOI:10.7463/0615.0780334.
- [74] **Анохин А.М., Готов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М.** Методы определения коэффициентов важности критериев // *Автоматика и телемеханика*. 1997. №8. С.3-35.
- [75] **Cinelli M., Kadzi'nski M., Gonzalez M., Slowi'nski R.** How to Support the Application of Multiple Criteria Decision Analysis? Let Us Start with a Comprehensive Taxonomy // *Omega*. 2020. Vol.96. P.1-49. DOI:10.1016/j.omega.2020.102261.
- [76] **Gebre S.L., Cattrysse D., Alemayehu E., Orshoven Van J.** Multi-criteria decision making methods to address rural land allocation problems: A systematic review // *International Soil and Water Conservation Research*. 2021. Vol.9. P.490-501. DOI:10.1016/j.iswcr.2021.04.005.
- [77] **Микони С.В.** Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив // *Информатика и автоматизация*. 2015. № 41. С.180-199. DOI:10.15622/sp.41.10.
- [78] **Богданова П.А., Сахаров Д.М., Васильева Т.В.** Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений // *Инновационные аспекты развития науки и техники*. 2021. № 6. С.153-157.

Сведения об авторе

Чечнев Василий Борисович, 1999 г. рождения. Окончил Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (2023), направление «Организация и управление наукоёмкими производствами». Аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, специальность «Когнитивное моделирование». В списке научных трудов 3 работы в области информационных систем. Author ID (РИНЦ): 1215414. gegrev@yandex.ru.



Поступила в редакцию 28.05.2024, после рецензирования 22.09.2024. Принята к публикации 30.10.2024.



Review article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624

Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods

© 2024, V.B. Chechnev

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

Abstract

Decision-making requires in-depth analysis through the evaluation and comparison of various alternative solutions. These tasks are characterized by multiple criteria used for comparison. The variability of parameters and conditions in decision-making has led to the development of numerous methods aimed at facilitating this process effectively. Currently, several hundred multi-criteria decision-making methods are known, making it challenging to select the most appropriate one for practical use. Therefore, research on the analysis, classification, and systematization of multi-criteria decision-making methods is relevant and essential for decision-makers and developers of decision support systems. Most classifications emphasize the methodologies and purposes of these methods, often overlooking their inherent limitations. This article attempts to systematize the main multi-criteria decision-making methods, considering their limitations. It analyzes the most widely used methods and their classifications. Based on identified limitations, the paper proposes a classification of multi-criteria decision-making methods and guidelines for selecting them. Applying this approach can enhance the validity of method selection and, consequently, the effectiveness of the decisions made.

Keywords: decision-making methods, decision support, multi-criteria assessment, multi-criteria tasks, formalization of preferences.

For citation: Chechnev V.B. Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 607-624. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.

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

List of figures and tables

Table 1 - Most commonly used multi-criteria decision-making methods (as per [8])

Table 2 - Most commonly used multi-criteria decision-making methods (as per [9])

Table 3 - Frequency of practical application of multi-criteria decision-making methods (as per [38])

Figure 1 - Hierarchical classification of methods for determining criteria importance coefficients [74]

Figure 2 - Classification of MADM and MODM methods [76]

Figure 3 - Classification of methods for solving multi-criteria tasks based on their operating principle [78]

Figure 4 - Proposed classification of multi-criteria decision-making methods according to their limitations

References

- [1] **Demidovsky AV.** Comparative analysis of multi-criteria decision-making methods: ELECTRE, TOPSIS and ML-LDM [In Russian]. *International Conference on Soft Computing and Measurement*. 2020; 1: 234-237.

- [2] **Emelianov SV, Larichev OI.** Multi-criteria decision-making methods [In Russian]. New in life, science, technology. 1985; 10: 1-32.
- [3] **Moiseev NN, Ivanilov YP, Stolyarova EM.** Optimization methods [In Russian]. Moscow: Science, 1971. 352 p.
- [4] **Ventzel ES.** Operations research. Tasks, principles, methodology [In Russian]. Moscow: Science, 1976. 206 p.
- [5] **Sobol IM, Statnikov RB.** Selection of optimal parameters in problems with many criteria [In Russian]. Moscow: Science, 1981. 328 p.
- [6] **Germeier YB.** Introduction to the Theory of Operations Research [In Russian]. Moscow: Science, 1971. 384 p.
- [7] **Podinovsky VV.** On the relative importance of criteria in multi-criteria decision-making problems. Multi-criteria decision-making problems. Ed. SV. Emelianov [In Russian]. Moscow: Mechanical engineering, 1978. 48-82.
- [8] **Štíli'c A, Puška A.** Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices. Eng. 2023; 4: 1536-1549. DOI:10.3390/eng4020088.
- [9] **Taherdoost H, Madanchian M.** Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia. 2023; 3: 77-87. DOI:10.3390/encyclopedia3010006.
- [10] **Cinelli M, Kadzinski M, Miebs G, Gonzalez M, Slowinski R.** Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. European Journal of Operational Research. 2022; 302: 633-651. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.01.011.
- [11] **Zadeh LA.** Fuzzy sets. Information and Control. 1965; 8: 338-353. DOI:10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [12] **Hwang CL, Yoon K.** Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications—A State-of-the-Art Survey. New York: Springer, 1981. 269 p. DOI:10.1007/978-3-642-48318-9.
- [13] **Saaty T.L.** Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications, 1996. 370 p.
- [14] **Gabus A, Fontela E.** World Problems, an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL. Geneva: Battelle Geneva Research Center, 1972; 1-8.
- [15] **Rezaei J.** Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega. 2015; 53: 49-57. DOI:10.1016/j.omega.2014.11.009
- [16] **Duckstein L, Opricovic S.** Multiobjective Optimization in River Basin Development. Water Resources Research. 1980; 16: 14-20 DOI:10.1029/WR016i001p00014.
- [17] **Van Laarhoven PJ, Pedrycz W.** A fuzzy extension of Saaty's priority theory. Fuzzy Sets Systems. 1983; 11: 229-241. DOI:10.1016/s0165-0114(83)80082-7.
- [18] **Lai YJ, Liu TY, Hwang CL.** Topsis for MODM. European Journal of Operational Research. 1994; 76: 486-500. DOI:10.1016/0377-2217(94)90282-8.
- [19] **Shannon C.** A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal. 1948; 27: 379-423.
- [20] **Ju-Long D.** Control problems of grey systems. Systems & Control Letters. 1982; 1: 288-294. DOI:10.1016/S0167-6911(82)80025-X.
- [21] **Saaty TL.** A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology. 1977; 3: 234-281. DOI:10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [22] **Charnes A, Cooper WW, Rhodes E.** Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research. 1978; 2: 429-444. DOI:10.1016/0377-2217(78)90138-8.
- [23] **Kolodner JL.** An introduction to case-based reasoning. Artificial intelligence review. 1992; 6.1: 3-34. DOI:10.1007/bf00155578
- [24] **Benayoun R, Roy B, Sussman N.** Manual de Reference du Programme Electre. Note de Synthese et Formation. 1966; 25. 79 p.
- [25] **Brans JP.** L'ingénierie de la Décision: L'élaboration D'instruments D'aide a la Décision. Québec: Université Laval, Faculté des Sciences de L'administration, 1982. 256 p.
- [26] **Matarazzo B.** Preference Ranking Global Frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA). European Journal of Operational Research. 1988; 36: 36-49. DOI:10.1016/0377-2217(88)90005-7.
- [27] **Churchman CW, Ackoff RL.** An approximate measure of value. European Journal of Operational Research. 1954; 2: 172-187. <http://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.
- [28] **Keeney RL, Raiffa H, Mayer RF.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 569 p. DOI:10.1017/CBO9781139174084.
- [29] **Edwards W.** Social utilities. Engineering Economist. 1971; 1: 119-129.
- [30] **Mikhailov L, Singh MG.** Fuzzy Analytic network process and its application to the development of decision support systems. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society. 2003; 33: 33-41. DOI:10.1109/TSMCC.2003.809354.
- [31] **Fishburn PC.** Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments. Journal of the Operations Research Society of America. 1967; 537-542. DOI:10.1287/opre.15.3.537.
- [32] **Zavadskas EK, Kaklauskas A, Sarka V.** The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. Technological and Economic Development of Economy. 1994; 1(3): 131-139.
- [33] **Keeney RL, Raiffa H.** Decision with Multiple Objectives. New York: J.Wiley & Sons, 1976. 569 p.
- [34] **Greco S, Matarazzo B, Slowinski R.** Rough sets theory for multi-criteria decision analysis. European Journal of Operational Research. 2001; 1(129): 1-47 DOI:10.1016/S0377-2217(00)00167-3.
- [35] **Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J, Zakarevicius A.** Optimization of weighted aggregated sum product assessment. Elektronika ir Elektrotechnika. 2012; (6)122: 3-6. DOI:10.5755/j01.eee.122.6.1810.
- [36] **Bridgman PW.** Dimensional Analysis. New Haven: Yale University Press, 1922. 112 p.
- [37] **Bana E, Costa CA, Vansnick JC.** The MACBETH Approach: Basic Ideas, Software, and an Application. In: Advances in Decision Analysis. Mathematical Modelling: Theory and Applications. Dordrecht: Springer, 1999: 131-157. DOI:10.1007/978-94-017-0647-6_9

- [38] **Velasquez M, Hester PT.** An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*. 2013; 10: 56-66.
- [39] **Kraujalienė L.** Comparative analysis of multicriteria decision-making methods evaluating the efficiency of technology transfer. *Business, Management and Education*. 2019; 17: 72-93. DOI:10.3846/bme.2019.11014.
- [40] **Seredenko NN, Perikov YuA, Druzhaev AA.** Comparative analysis of multi-criteria methods of decision making [In Russian]. *Actual problems of humanitarian and architectural sciences*. 2010; 1: 83-86.
- [41] **Brito MM, Evers M.** Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016; 16(4): 1019-1033. DOI: 10.5194/nhess-16-1019-2016.
- [42] **Patel MR, Vashi MP, Bhatt BV.** SMART – Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities. *Conf. on New Horizons in Civil Engineering (Surat, Gujarat, India, March, 2017)*. 2017: 1-6.
- [43] **Morton A.** Multiattribute Value Elicitation. *Operations Research & Management Science*. 2018; 261: 287-311. DOI:10.1007/978-3-319-65052-4_12.
- [44] **Jaffar A. et al.** An Innovative Approach in Decision-making Environments: Assessing Performance by Applying Multi-Attribute Value Theory (MAVT). *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*. 2015; 3: 141-150.
- [45] **[13] Artemyeva AY., Shakirov VA, Yakovkina TN** Multi-criteria selection of areas for location of wind power stations [In Russian]. *Systems. Methods. Technologies*. 2016; 3: 116-122. DOI:10.18324/2077-5415-2016-3-116-122.
- [46] **Esen H.** Analytical Hierarchy Process Problem Solution. In *Analytic Hierarchy Process - Models, Methods, Concepts, and Applications*. IntechOpen. DOI:10.5772/intechopen.1001072.
- [47] **Osintsev NA.** Selecting a sustainable development strategy for a transport company using a combined STEEP-BWM-SAW with interval approximate numbers [In Russian]. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2022; 3(93). C.73-81.
- [48] **Rezaei J.** A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2020; 3(19): 891-907. DOI:10.1142/S0219622020500170.
- [49] **Khalitskaya K.** Technology selection using the TOPSIS method [In Russian]. *Forsyth*. 2020; 14; 1: 85-96. DOI:10.17323/2500-2597.2020.1.85.96.
- [50] **Ciardiello F, Genovese A.** A comparison between TOPSIS and SAW methods. *Annals of Operations Research*. 2023; 325: 967-994. DOI:10.1007/s10479-023-05339-w.
- [51] **Zarutsky SA.** A system for selecting and setting an aggregation method as an element of the DSS toolkit in the field of regional policy [In Russian]. *Management of economic systems*. 2013; 11(59): 57-73.
- [52] **Rodzin SI, Bozhenyuk AV, Kravchenko YA, Rodzina ON.** Fuzzy multicriteria group decision-making methods for evacuation problems in emergency situations [In Russian]. *News of the Southern Federal University. Technical science*. 2023; 2(232): 186-200. DOI:10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
- [53] **Varshavsky PR, Ar Kar Mio, Shunkevich DV.** Application of classification and clustering methods to improve the efficiency of precedent systems [In Russian]. *International Journal of Software Products and Systems*. 2017; 4(30): 625-631.
- [54] **Alimkhanova AN, Misel AA.** Assessing the efficiency of enterprises based on the DEA method [In Russian]. *TUSUR reports*. 2019; 2: 104-108. DOI:10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108.
- [55] **Bikeyeva MV, Sysoeva EA.** DEA model for assessing the effectiveness of the implementation of the national project “Demography” in the Volga Federal District [In Russian]. *Statistics and economics*. 2023; 20(3): 4-13. DOI:10.21686/2500-3925-2023-3-4-13.
- [56] **Taherdoost H, Madanchian M.** A comprehensive overview of the ELECTRE method in multi criteria decision-making. *Journal of Management Science & Engineering Research*. 2023; 6: 5-16. DOI:10.30564/jmser.v6i2.5637.
- [57] **Kravchenko TK, Druzhaev AA.** Adaptation of ELECTRE family methods for inclusion in the Expert Decision Support System [In Russian]. *Business Informatics*. 2015; 2 (32): 69-78.
- [58] **Terehlyansky PV, Kuznetsov SY.** ELECTRE methodology and automation of ranking of alternatives [In Russian]. *E-Management*. 2022; 5; 3: 26-37. DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37.
- [59] **Lebedeva ME.** Fuzzy logic in economics – the formation of a new direction [In Russian]. *Ideas and ideals*. 2019; 11; 1: 197-212. DOI:10.17212/2075-0862-2019-11.1.1-197-212.
- [60] **Savchenko DV, Reznikova KM, Smyshlyaeva AA.** Fuzzy logic and fuzzy information technology [In Russian]. *Waste and resources*. 2021; 1: 1-12. DOI:10.15862/10ECOR121.
- [61] **Shakirov VA.** Decision-making under conditions of fuzzy preferences based on multi-criteria value theory [In Russian]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 48-55.
- [62] **Osintsev NA, Rakhmangulov AN.** Assessing supply chain resilience based on gray relational analysis [In Russian]. *Bulletin of MSTU G.I. Nosova*. 2023; 3: 180-196. DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- [63] **Rosenberg IN.** Management under conditions of uncertainty [In Russian]. *Modern control technologies*. 2017; 7(79): 1-18.
- [64] **Shihab SK, Khan ZA, Siddiquee AN.** Application of Grey Relational Analysis Along with Principal Component Analysis for Multi-Response Optimization of Hard Turning. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2016; 38: 238-245.
- [65] **Osintsev NA.** Multi-criteria decision-making methods in green logistics [In Russian]. *World of transport*. 2021; 19; 5(96): 105-114. DOI:10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
- [66] **Klovov SA.** Comparison and development of multicriteria decision analysis methods [In Russian]. *Young scientist*. 2021; 18(360): 30-33.
- [67] **Osintsev NA, Rakhmangulov AN.** Selection of green technologies in warehouse logistics – a multi-criteria approach [In Russian]. *Modern problems of the Russian transport complex*. 2021; 11; 1: 4-17. DOI:10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17.
- [68] **Zamani-Sabzi H, King J, Gard CC, Abudu S.** Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment. *Operations Research Perspectives*. 2016; 3: 92-117. DOI:10.1016/j.orp.2016.11.001.

- [69] **Piyavsky SA.** Formulas for calculating universal coefficients when making multicriteria decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9; 2(32): 282-298. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
 - [70] **Martinez DL, Acosta JS.** Review of modeling preferences for decision models. *European Scientific Journal*. 2015; 11: 1-18.
 - [71] **Khadpe P. et al.** DISCERN: Designing Decision Support Interfaces to Investigate the Complexities of Workplace Social Decision-Making With Line Managers. arXiv preprint arXiv:2402.19318. 2024. DOI:10.1145/3613904.3642685.
 - [72] **Spiridonov SB, Bulatova IG, Postnikov VM.** Analysis of approaches to the selection of weight coefficients of criteria using the method of paired comparison of criteria [In Russian]. *Internet journal "SCIENCE"*. 2017; 9; 6: 1-24.
 - [73] **Postnikov VM, Spiridonov SB.** Methods for selecting weight coefficients of local criteria [In Russian]. *Science and education: scientific publication of MSTU. N.E. Bauman*. 2015; 6: 267-287. DOI:10.7463/0615.0780334.
 - [74] **Anokhin AM, Glotov VA, Pavelev VV, Cherkashin AM.** Methods for determining the importance coefficients of criteria [In Russian]. *Automation and telemechanics*. 1997; 8: 3-35.
 - [75] **Cinelli M, Kadziński M, Gonzalez M, Slowiński R.** How to Support the Application of Multiple Criteria Decision Analysis? Let Us Start with a Comprehensive Taxonomy. *Omega*. 2020; 96: 1-49. DOI:10.1016/j.omega.2020.102261.
 - [76] **Gebre SL, Catrysse D, Alemayehu E, Orshoven Van J.** Multi-criteria decision making methods to address rural land allocation problems: A systematic review. *International Soil and Water Conservation Research*. 2021; 9: 490-501. DOI:10.1016/j.iswcr.2021.04.005.
 - [77] **Mikoni SV.** System analysis of multicriteria optimization methods on a finite set of alternatives [In Russian]. *Computer science and automation*. 2015; 41: 180-199. DOI:10.15622/sp.41.10.
 - [78] **Bogdanova PA, Sakharov DM, Vasilyeva TV.** Review of multicriteria optimization methods in decision-making problems [In Russian]. *Innovative aspects of the development of science and technology*. 2021; 6: 153-157.
-

About the author

Vasily Borisovich Chechnev (b. 1999) graduated from the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman in 2023 with a degree in "Organization and management of knowledge-intensive industries". Postgraduate student at the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, in the «Cognitive modeling» specialty. He is a co-author of 3 scientific articles in the field of information systems. Author ID (RSCI): 1215414. gegre@yandex.ru.

Received May 28, 2024. Revised September 22, 2024. Accepted October 30, 2024.
