

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

ISSN 2313-1039 (E)

# ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

30 лет издательству | 1991  
«Новая техника» | 2021

Russian  
Science  
Citation  
Index



Vol **11**  
N **4**  
2021

Научный журнал - Scientific journal

Scientific journal

Volume 11

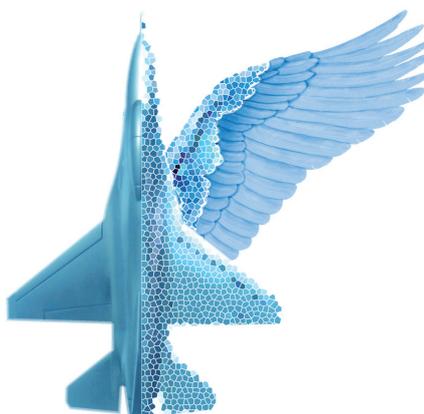
№ 4

**ОНТОЛОГИЯ**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Научный журнал

Том 11

№ 4



## Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest\***, Ph.D., Professor Samara University, Member of IAOA, 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, InfoVings LLC, St. Petersburg, Russia  
 Valeriya V. **Gribova\***, Doctor of Technical Sciences, 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  
 Anton V. **Ivaschenko\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara State Technical University, Samara, 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  
 Victor M. **Kureichik\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Taganrog, 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, Praha, 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, Corresponding Member of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia  
 Alexander V. **Palagin\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the NASU, Ins. of Cybernetics, Kiev, Ukraine  
 Semyon A. **Piyavsky\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow City Pedagogical University, Samara, Russia  
 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, «Smart solutions» Scientific Production Co., Samara, Russia  
 Sergey V. **Smirnov\***, Doctor of Technical Sciences, ICCS RAS, member of IAOA, Samara, Russia  
 Dzhavdet S. **Suleymanov\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia  
 Boris E. **Fedunov\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia  
 Altynbek **Sharipbay\***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Nur-Sultan, Kazakhstan  
 Boris Ya. **Shvedin\***, Ph.D., Member of IAOA, Dan Rose LLC, Rostov-on-Don, Russia

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

**Боргест** Николай Михайлович\*, к.т.н., профессор, Самарский университет, член IAOA, 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, ООО «ИнфоВингс», Санкт-Петербург, Россия  
**Грибова** Валерия Викторовна\*, д.т.н., с.н.с., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия  
**Загорюлько** Юрий Алексеевич\*, к.т.н., с.н.с., ИСИ СО РАН, Новосибирск, Россия  
**Иващенко** Антон Владимирович, д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара, Россия  
**Комаров** Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия  
**Крейнович** Владик, профессор, Техасский университет Эль Пасо, Эль Пасо, США  
**Курейчик** Виктор Михайлович\*, д.т.н., профессор, Южный федеральный университет, Таганрог, Россия  
**Ландэ** Дмитрий Владимирович\*, д.т.н., с.н.с., ИПРИ НАН Украины, Киев, Украина  
**Лейтао** Пауло, профессор, Политехнический институт, 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, член-корреспондент РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия  
**Палагин** Александр Васильевич, д.т.н., профессор, академик НАН Украины, Ин-т кибернетики, Киев, Украина  
**Пиявский** Семён Авраамович, д.т.н., профессор, Московский город.педагог.университет, Самара, Россия  
**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., НПК «Разумные решения», Самара, Россия  
**Смирнов** Сергей Викторович\*, д.т.н., ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, член IAOA, Самара, Россия  
**Сулейманов** Джавдет Шевкетович\*, д.т.н., профессор, академик АН РТ, Казань, Россия  
**Федунов** Борис Евгеньевич\*, д.т.н., профессор, ГосНИИ авиационных систем, Москва, Россия  
**Шарипбай** Алтынбек\*, д.т.н., профессор, Ин-т искусственного интеллекта, Нур-Султан, Казахстан  
**Шведин** Борис Яковлевич, к.психол.н., член IAOA, ООО «Дан Роуз», Ростов-на-Дону, Россия

## Executive Editorial Board - Исполнительная редакция

Chief Editor	<b>P.O. Skobelev</b>	Samara, Russia	Главный редактор	Скобелев П.О.	директор НПК «Разумные решения»
Deputy Chief Editor	<b>S.V. Smirnov</b>	Samara, Russia	Зам. главного редактора	Смирнов С.В.	зам. директора ИПУСС РАН – СамНЦ РАН
Executive Editor	<b>N.M. Borgest</b>	Samara, Russia	Выпускающий редактор	Боргест Н.М.	директор издательства «Новая техника»
Editor	<b>D.M. Kozlov</b>	Samara, Russia	Редактор	Козлов Д.М.	доцент Самарского университета
Technical Editor	<b>D.N. Borgest</b>	Samara, Russia	Технический редактор	Боргест Д.Н.	специалист Самарского университета
Executive Secretary	<b>S.A. Vlasov</b>	Samara, Russia	Ответственный секретарь	Власов С.А.	аспирант Самарского университета

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 (Письмо Департамента аттестации научных и научно-педагогических работников Минобрнауки РФ от 01.12.2015 № 13-6518) по научным специальностям 05.13.01, 05.13.17, 05.13.18 и 05.07.02, 05.07.05.

Журнал включен в список журналов, входящих в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1,00** (2013), **0,92** (2014), **1,35** (2015), **1,07** (2016), **1,00** (2017), **1,17** (2018), **0,87** (2019), **1,09** (2020).

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

Красная кнопка профессора Маслова 397-401

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

**А.Ш. Абдуллаев** 402-421  
Транс-ИИ: как создать настоящий искусственный интеллект

**Н.В. Головастикова, П.С. Дорожкин, В.А. Сойфер** 422-436  
Интеллектуальные технические системы на основе фотоники

**А.Д. Редозубов** 437-449  
Формализация смысла. Часть 3. Формирование контекстов

### ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**В.Н. Негода, А.А. Куликова** 450-463  
Сквозное проектирование автоматизированных систем на основе онтологий

**В.В. Грибова, Д.Б. Окунь, Е.А. Шалфеева** 464-477  
Семантические модели для оценки влияния комплекса факторов на развитие заболеваний

**И.С. Ткаченко** 478-499  
Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов

### ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

**Ю.А. Загорюлько, Е.А. Сидорова, Г.Б. Загорюлько, И.Р. Ахмадеева, А.С. Серый** 500-520  
Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования

### МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

**А.А. Зуенко** 521-532  
Интеграция методов поиска в ширину и логического вывода для удовлетворения табличных ограничений

**Онтологический Саммит 2021. Коммюнике: генерация и гармонизация онтологий** 533-548

---

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/](http://agora.guru.ru/scientific_journal/).  
Контент журнала распространяется по лицензии CC-BY 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International License).

#### Контакты учредителей

**ФИЦ Самарский научный центр РАН:** 443020, Самара, ул. Садовая, 61, тел./факс.: +7 (846) 333 27 70, Смирнов С.В., smimov@iccs.ru.  
**Самарский университет:** 443086, Самара, Московское шоссе 34, корп. 10, тел.: +7 (846) 267 46 47, Боргест Н.М., borgest@yandex.ru.  
**ООО «Новая техника»** (издательство): 443010, Самара, ул. Фрунзе, 145, тел.: +7 (846) 332 67 84, факс: +7 (846) 332 67 81.

---

Отпечатано в ООО «Новая техника», г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 31.12.2021. Тираж 300 экз. Свободная цена. (6+).

---

## CONTENTS

### EDITORIAL

Professor Maslov's Red Button 397-401

### GENERAL ISSUES OF FORMALIZATION IN THE DESIGNING: ONTOLOGICAL ASPECTS

**Azamat Abdoullaev** 402-421

Trans-AI: How to Build True AI or Real Machine Intelligence and Learning

**N.V. Golovastikov, S.P. Dorozhkin, V.A. Soifer** 422-436

Intelligent systems based on photonics

**A.D. Redozubov** 437-449

Formalization of the meaning. Part 3. Formation of contexts

### APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

**V.N. Negoda, A.A. Kulikova** 450-463

End-to-end design of automated systems based on ontologies

**V.V. Gribova, D.B. Okun, E.A. Shalfeeva** 464-477

Semantic models for assessing the influence of a combination of factors on the development of diseases

**I.S. Tkachenko** 478-499

Analysis of key technologies for creating multisatellite orbital constellations based on small spacecraft

### ONTOLOGY ENGINEERING

**Yu.A. Zagorulko, E.A. Sidorova, G.B. Zagorulko, I.R. Akhmadeeva, A.S. Sery** 500-520

Automation of the development of ontologies of scientific subject domains  
based on ontology design patterns

### METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

**A.A. Zuenko** 521-532

Breadth First Search and Inference Methods Integration to satisfy table constraints

**Ontology Summit 2021. Communique: «Ontology Generation and Harmonization»** 533-548

---

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/](http://agora.guru.ru/scientific_journal/).

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 Founders

**FIC Samara Scientific Center of the RAS:** 61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia. Tel.: +7 (846) 333 27 70, S.V. Smirnov, smirnov@iccs.ru

**Samara University:** 34, Moskovskoye shosse, bldg. 10, Samara, 443086, Russia. Tel.: +7 (846) 267 46 47, N.M. Borgest, borgest@yandex.ru

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



## ОТ РЕДАКЦИИ

### Красная кнопка профессора Маслова Professor Maslov's Red Button

«При автоматизации проектирования самолёта мы использовали методы искусственного интеллекта, не подозревая об этом ...»  
О.С. Самойлович, 1988 год

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

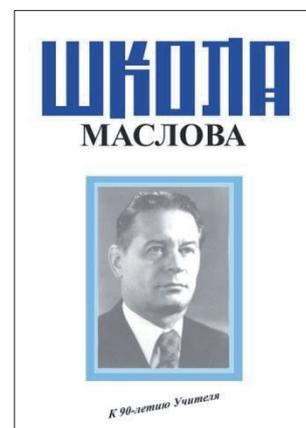
Сегодняшнее обращение редакции многоплановое - как и всё в нашем реальном мире, который мы стремимся понять и описать, в т.ч. с помощью онтологий. Главным связующим фактором отмечаемых событий является наше текущее время, в котором мы живём...

#### Школа Маслова – онтологи в авиации

Приведённые в качестве эпиграфа слова главного конструктора САПР летательных аппаратов (ЛА) Минавиапрома СССР, профессора и заведующего кафедрой проектирования самолётов МАИ, д.т.н. О.С. Самойловича в полной мере соответствуют тем работам, которые велись под руководством профессора В.Г. Маслова на кафедре теории двигателей ЛА в Куйбышевском авиационном институте имени академика С.П. Королёва.

К концу 70-х годов В.Г. Масловым была разработана теория выбора рациональных проектных решений для параметров рабочего процесса авиационных газотурбинных двигателей, рассматривающая двигатель как элемент системы «летательный аппарат». Именно теоретические работы В.Г. Маслова в области критериального анализа и математического моделирования проектируемых систем, поиска общих и частных критериев оптимизации, учёта проектной неопределённости, разработки метода отыскания гарантируемой области компромиссов, определения наилучших решений внутри области компромиссов, оценки устойчивости проектных значений параметров и многое др. – всё это в большой мере предопределило развитие научного направления онтологии проектирования в Самарском университете.

Исследуя процесс принятия решений при проектировании, подбирая соответствующие задачам методы, описывая процессы и процедуры, формализуя их, разрабатывая математические и семантические модели в предметной области, проводя анализ свойств и атрибутов изучаемых сущностей – эти и мн.др. процессы стали фактически не только основой разрабатываемых САПР в традиционном понимании, но и создавали предпосылки для разработки систем, относящихся к системам с искусственным интеллектом (ИИ). Т.е. к тем системам, которые были бы способны стать не простым решателем задач с заданными условиями, а интеллектуальными помощниками проектанта. Проектирование волшебной «красной кнопки», выполняющей в автоматическом режиме ту или иную проектную операцию или процедуру, было мечтой профессора В.Г. Маслова. Созданный им отдел плодотворно трудился в этом направлении, разрабатывая различные программные системы, автоматизирующие процесс принятия



Обложка книги<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Школа Маслова: ученики / сост. Н.М. Боргест. Самара: Изд-во «Новая техника», 2016. 112 с.

решений, включая в них экспертные компоненты. Плеяда его учеников, именуемая себя «школой Маслова», продолжает начатую им работу, развивая направление семантической формализации проектной деятельности при создании авиационной техники.

Рождение учебно-научной дисциплины «Онтология проектирования» в СГАУ прямо связано с работами и идеями профессора В.Г. Маслова и явилось следствием работ по автоматизации проектной деятельности<sup>2</sup>. Для студентов факультета ЛА на кафедре конструкции и проектирования ЛА в 2006 году было начато преподавание дисциплины «Онтология производственной сферы», а с 2010 года - дисциплины «Онтология проектирования». В настоящее время для магистрантов эту дисциплину сменил курс «Искусственный интеллект в авиационной технике», обозначив тенденцию интеллектуализации работ в автоматизации проектирования авиационной техники. Весной 2011 года начал свою работу научный семинар «Онтология проектирования», а уже осенью 2011 года был учреждён научный журнал «Онтология проектирования».

О вкладе школы проф. В.Г. Маслова в создание систем на базе ИИ при проектировании авиационной техники подробно рассказывают его ученики в только что вышедшей статье<sup>3</sup> университетского журнала. 23 декабря 2021 года проф. В.Г. Маслову исполнилось бы 95 лет.

### Верность науке – не в деньгах счастье



2021 год был объявлен Годом науки и технологии в России. 28 ноября журнал «Онтология проектирования» был приглашён и принял участие в церемонии вручения VII Всероссийской премии «За верность науке» в Государственном Кремлевском Дворце<sup>4</sup>.

Летом этого года ядро исполнительной редакции научного журнала «Онтология проектирования» (в лице проф. Н.М. Боргеста, доц. Д.М. Козлова и проф. С.В. Смирнова) подало заявку<sup>5</sup> на Всероссийскую премию «За верность науке» в номинации «Лучшее периодическое издание о науке». В ходе подготовки заявки редакция получила поддержку коллег<sup>6</sup> по цеху, которую считает главным достижением выдвижения журнала на эту престижную Премию.

Премия ежегодно присуждается за выдающиеся достижения в области научной коммуникации, популяризации науки и поддержки престижа деятельности учёных и инженеров в России. В этом году премия представлена 15-ю номинациями: «Лучшая программа о науке на радио», «Лучшая программа о науке на ТВ», «Лучшее периодическое издание о науке» и др., на которые было подано рекордное количество заявок (744).

В церемонии вручения премии приняли участие: пресс-секретарь Президента России Дмитрий Песков, Министр науки и высшего образования Валерий Фальков, президент Российской академии наук Александр Сергеев, президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук, генеральный директор госкорпорации «Роскосмос» Дмитрий Рогозин, ректор МГУ имени Ломоносова Виктор Садовничий и др.

<sup>2</sup> Боргест Н.М. Формирование и развитие научной дисциплины «онтология проектирования»: краткая история личного опыта // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, № 4 (38). С. 415-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-415-448.

<sup>3</sup> Боргест Н.М., Григорьев В.А., Кузьмичёв В.С. Искусственный интеллект в проектировании авиационной техники и роль школы профессора В.Г. Маслова в процессе его развития // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. - 2021. - Т. 20. - №3. - С. 171-190. doi: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-171-190.

<sup>4</sup> <https://ssau.ru/news/19820-nauchnyy-zhurnal-ontologiya-proektirovaniya-prinyal-uchastie-v-tseremonii-vrucheniya-vsrossiyskoy-premii-za-vernost-nauke-v-gosudarstvennom-kremlevskom-dvortse>.

<sup>5</sup> [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021\\_2\(40\)/Ontology\\_Of\\_Designing\\_2\\_2021\\_8\\_Loyalty\\_to\\_Science\\_Award\\_Participant\\_application\\_239-245.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021_2(40)/Ontology_Of_Designing_2_2021_8_Loyalty_to_Science_Award_Participant_application_239-245.pdf).

<sup>6</sup> [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021\\_3\(41\)/Ontology\\_Of\\_Designing\\_3\\_2021\\_1\\_Editorial\\_257-259.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021_3(41)/Ontology_Of_Designing_3_2021_1_Editorial_257-259.pdf).

## Лицо российской науки - Михаил Ковальчук

Президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук стал победителем Всероссийской премии «За верность науке» в номинации «Лучшая программа о науке на ТВ» с программой «Картина мира с Михаилом Ковальчуком» на телеканале «Россия – Культура». Пресс-секретарь Президента России Дмитрий Песков, вручавший премию победителю, высказал своё мнение, что именно «умное лицо и с улыбкой» Михаила Ковальчука для него является лицом российской науки. Говоря об авторитете научного знания, Михаил Ковальчук заключил, что в научном поиске, чтобы добиться результата, «надо быть рискованным и неразумным!»...



В отличие от скромной денежной премии «За верность науке», настоящим героем, получившим мировое признание, стал наш земляк, выпускник Куйбышевского государственного университета (ныне Самарского университета), главный редактор «Новой газеты» Дмитрий Муратов<sup>7</sup>.

## Нобелевская премия практикующему онтологу - Дмитрий Муратов

Для устойчивого развития общества в онтологии власти важно соблюсти баланс разных сил: исполнительной, законодательной, судебной и информационной. Последняя, представленная СМИ, позволяет вскрывать некомпетентность, халатность, кумовство и другие пороки власти. Тем самым давая возможность развитию социальных лифтов, честных и справедливых отношений в обществе, повышая доверие общества к власти, способствуя росту экономики и благосостоянию граждан. Узурпация власти в обществе нарушает права большинства её граждан, убивает инициативу, тормозит и приводит к деградации общественное развитие, формирует очередной «пароход» с интеллектуальной элитой, обедняет страну. Одна из причин низкого уровня России в глобальном рейтинге стран по ИИ<sup>8</sup> как раз связана с «утечкой мозгов». Положение России в *Global AI Index*<sup>9</sup> в 2021 году слегка улучшилось (32 место, см. 4-ю страницу обложки номера).



10 декабря 2021 года на церемонии в ратуше Осло Дмитрий Муратов выступил со своей лекцией «Антидот от тирании»<sup>10</sup>. Дмитрий Муратов утверждает, что «...мир разлюбил демократию, разочаровался в правящих элитах и потянулся к диктатуре. Возникла иллюзия, что прогресса можно достигнуть технологиями и насилием, а не соблюдением прав и свобод человека». Но «караван идёт вперёд, потому что собаки лают!»! СМИ – антидот от тирании и условие движения общественного «каравана»!...

Мы в редакции гордимся нашим земляком, выпускником Самарского университета, считая его практикующим онтологом современного общественного мироустройства!

## «Нобелевская» премия за «понятные» модели ИИ<sup>11</sup> - Синтия Рудин

Премия Ассоциации по развитию ИИ (AAAI) *Squirrel AI Award* за ИИ на благо человечества отмечает положительное влияние ИИ на улучшение жизни человека.

<sup>7</sup> Мировое признание. <https://ssau.ru/news/19798-mirovye-priznanie>.

<sup>8</sup> Countries in focus. <https://www.tortoisemedia.com/2019/12/03/global-ai-index-2-countries/>.

<sup>9</sup> The Global AI Index. The first index to benchmark nations on their level of investment, innovation and implementation of artificial intelligence. <https://www.tortoisemedia.com/intelligence/global-ai/>.

<sup>10</sup> Нобелевская речь Дмитрия Муратова. Полный текст. <https://tass.ru/obschestvo/13170825>.

<sup>11</sup> Duke Computer Scientist Wins \$1 Million AI Prize, A 'New Nobel'. <https://aaai.org/Pressroom/Releases/release-21-1012.php>.



Премия в размере 1 млн. долларов США вручается ежегодно. В октябре 2021 года премии удостоена профессор Синтия Рудин<sup>12</sup> из Университета Дьюка, которой показала, что точность прогнозов гораздо сильнее зависит от интерпретируемости и прозрачности процесса, нежели от усложнения алгоритмов и моделей машинного обучения. Синтия Рудин использует возможности ИИ, чтобы помочь обществу в важных для него областях, будь то предотвращение аварий в электрических сетях, выявление закономерностей в преступлениях, оптимизация распределения ресурсов при уходе за тяжелобольными пациентами и др.

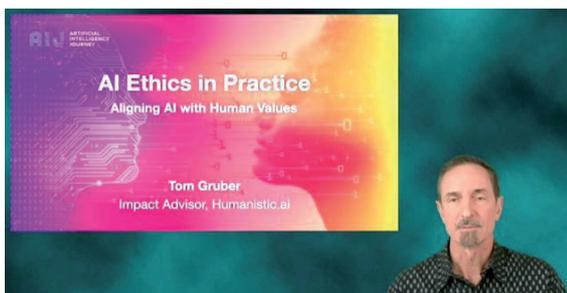
### Самарские онтологи в Топ-10 российских онтологов

В статье профессора Л.К. Боброва<sup>13</sup> проведён наукометрический анализ развития области управления знаниями на материалах Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Динамика числа публикаций по управлению знаниями, содержащихся в РИНЦ, рассматривалась в сопоставлении с динамикой аналогичных публикаций в базах данных *Web of Science*, *Scopus* и *ScienceDirect*. Показано, что наблюдаемая положительная динамика мировой публикационной активности по проблемам управления знаниями и онтологическому проектированию коррелирует с динамикой развития мирового рынка управления знаниями. Статистика публикаций РИНЦ свидетельствует о том, что наиболее обсуждаемыми в научной печати являются решения с использованием онтологических моделей.

На основе анализа данных РИНЦ построены топ-списки наиболее продуктивных организаций и авторов публикаций по управлению знаниями и онтологиям.

В частности, в статье отмечается, что Самарский университет входит в Топ-10 организаций с наибольшим числом публикаций по онтологиям, а сотрудники университета профессор Н.М. Боргест (3 место) и профессор И.В. Дёмин (7 место) вошли в Топ-7 авторов с наибольшими показателями цитируемости работ по онтологиям.

### Основоположник современной онтологии на AIJ 2021 – Том Грубер



Ключевым спикером, открывшим 10 ноября 2021 года панельную дискуссию на конференции *AI Journey*<sup>14</sup>, был Том Грубер с докладом «Этика ИИ на практике: согласование ИИ с человеческими ценностями»<sup>15</sup>. Грубер, хорошо известный в среде онтологов, был представлен как первый, кто применил понятие онтологии в информационных системах, как со-основатель и технический директор приложения *Siri*, директор отдела разработок *Apple*, *Impact Adviser*, *Humanistic.ai*. Хочется думать, что подаренный на *AI Journey* 2019 Герману Грефу наш журнал и опубликованная впоследствии в журнале статья<sup>16</sup>, отправленная руководству Сбера, повлияли на выбор ключевых спикеров, важность изучения и построения онтологии предметных областей при создании систем с ИИ.

<sup>12</sup> Cynthia Rudin. <https://ece.duke.edu/faculty/cynthia-rudin>.

<sup>13</sup> Бобров Л.К. Управление знаниями в зеркале Российского индекса научного цитирования // *Вычислительные технологии*. 2021. Т. 26. № 4. С. 53-72. doi: 10.25743/ICT.2021.26.4.006. (Журнал входит в Scopus, RSCI, ВАК и др. БД).

<sup>14</sup> *AI Journey* — серия мероприятий по ИИ и анализу данных, проводимая ведущими российскими и международными компаниями, лидерами по разработке и применению технологий ИИ. <https://ai-journey.ru/>.

<sup>15</sup> 10.11.2021. AIJ. Этика ИИ: согласование ИИ с человеческими ценностями. Том Грубер. <https://youtu.be/3XhDcvtRmZU>.

<sup>16</sup> Боргест, Н.М. Стратегии интеллекта и его онтологии: попытка разобраться / Н.М. Боргест // *Онтология проектирования*. – 2019. – Т. 9, №4 (34). – С.407-428. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-407-428.

В своём докладе Грубер говорил о: гуманистическом ИИ, который должен сотрудничать и помогать, а не вредить людям; последствиях использования ИИ, которые должны быть предсказуемыми; плохих данных и дезинформации; вредном воздействии на детей, на их психику; пагубности использования в качестве целевой функции максимизации удержания пользователей в сети. По его мнению, ИИ усугубляет проблему дезинформации, распространения всяких сплетен и теорий заговоров. Целевая функция – «сидеть в телефоне» работает крайне успешно, «подсаживая пользователей на иглу», управляя вниманием и поведением.

### 30 лет издательству «Новая техника»

18 декабря 1991 года, ещё до события, впоследствии названного Президентом России «крупнейшей геополитической катастрофой XX века», было создано товарищество с ограниченной ответственностью «Предприятие «Новая техника»», которое с 1994 года по сей день занимается издательской деятельностью. Издательство сосредоточило своё внимание на подготовке и выпуске научной, технической, учебной и др. литературы, выпуская книги и журналы.

Именно благодаря ресурсам издательства «Новая техника» стало возможным осуществить проект под названием «Научный журнал «Онтология проектирования»».



### В этом номере - кратко о главном

В этом номере журнала статьи авторов из Апатитов, Владивостока, Москвы, Новосибирска, Самары, Санкт-Петербурга и Ульяновска. Открывает номер дискуссионная статья о будущем ИИ Азамата Абдуллаева, активного участника различных форумов по ИИ. Статья наполнена озабоченностью о будущем ИИ, что коррелирует с докладом Тома Грубера на *AIJ*. Виктор Соيفер, выступивший на этой же конференции с докладом о системах ИИ на основе фотоники, по материалам своего сообщения представил статью совместно с коллегами. Завершает раздел статья Алексея Редозубова о формировании контекстов при формализации смысла. Эта уже третья часть его работы, и редакция журнала ожидает реакции читателей на развитие этой важной для ИИ темы. Как впрочем, и развитие темы онтологии любви и проектирования позитивных отношений: в следующем номере на эту тему планируется выход статьи, подготовленной молодыми исследователями из Высшей школы экономики (Москва). Профессор Вячеслав Филимонов из Омского филиала Института математики им. С.Л. Соболева также активно включился в эту проблематику, и редакция ожидает материализованное воплощение его идей в виде статьи в нашем журнале.

В разделе, посвящённом прикладным онтологиям проектирования, рассматривается сквозное проектирование автоматизированных систем, обсуждаются семантические модели в медицинской сфере, анализируются ключевые технологии создания космических систем.

В разделе «Инжиниринг онтологий» статья посвящена автоматизации разработки онтологий научных предметных областей, а в разделе «Методы и технологии принятия решений» рассматривается интеграция методов поиска в ширину и логического вывода в задачах программирования в ограничениях. Завершает номер перевод коммюнике онтологического саммита 2021, который был посвящен генерации и гармонизации онтологий.

Наш журнал – место для научных дискуссий. Поэтому ждём, надеемся и призываем авторов и читателей включиться в развитие публикуемых идей. *Dum spiro, spero!*

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

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 004.89

DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-402-421

### Trans-AI: How to Build True AI or Real Machine Intelligence and Learning

**Azamat Abdoullaev**

*EIS Encyclopedic Intelligent Systems Ltd, EU, Cyprus-Russia*

#### Abstract

We are at the edge of colossal changes. This is a critical moment of historical choice and opportunity. It could be the best 5 years ahead of us that we have ever had in human history or one of the worst, because we have all the power, technology and knowledge to create the most fundamental general-purpose technology (GPT), which could completely upend the whole human history. The most important GPTs were fire, the wheel, language, writing, the printing press, the steam engine, electric power, information and telecommunications technology, all to be topped by real artificial intelligence technology. Our study refers to Why and How the Real Machine Intelligence or True AI or Real Superintelligence (RSI) could be designed and developed, deployed and distributed in the next 5 years. The whole idea of RSI took about three decades in three phases. The first conceptual model of Trans-AI was published in 1989. It covered all possible physical phenomena, effects and processes. The more extended model of Real AI was developed in 1999. A complete theory of superintelligence, with its reality model, global knowledge base, NL programming language, and master algorithm, was presented in 2008. The RSI project has been finally completed in 2020, with some key findings and discoveries being published on the EU AI Alliance/Futurium site in 20+ articles. The RSI features a unifying World Metamodel (Global Ontology), with a General Intelligence Framework (Master Algorithm), Standard Data Type Hierarchy, NL Programming Language, to effectively interact with the world by intelligent processing of its data, from the web data to the real-world data. The basic results with technical specifications, classifications, formulas, algorithms, designs and patterns, were kept as a trade secret and documented as the Corporate Confidential Report: How to Engineer Man-Machine Superintelligence 2025. As a member of EU AI Alliance, the author has proposed the Man-Machine RSI Platform as a key part of Transnational EU-Russia Project. To shape a smart and sustainable future, the world should invest into the RSI Science and Technology, for the Trans-AI paradigm is the way to an inclusive, instrumented, interconnected and intelligent world.

**Key words:** *Artificial Intelligence, Machine Intelligence, Machine Learning, Trans-AI.*

**Citation:** *Azamat Abdoullaev. Trans-AI: How to Build True AI or Real Machine Intelligence and Learning. Ontology of Designing. 2021; 11(4): 402-421. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-402-421.*

#### Introduction. What is NOT a True and Real AI

Dear Reader, let me start with revealing a big old secret to you. True Artificial Intelligence (AI) is NOT 1: a branch of computer science dealing with the simulation of intelligent behavior in computers; 2: an area of computer science that deals with giving machines the ability to seem like they have human intelligence; 3: the capability of a machine to imitate intelligent human behavior. Real AI is NOT neural networks, machine learning (ML), deep learning (DL), multiple linear regression, RFM (Recency, Frequency and Monetary) modeling, cognitive computing, or predictive intelli-

gence/analytics, but something what transgressing all special models, algorithms, and techniques [1, 2, see also<sup>1</sup>].

It all started with the classic paper COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE (1950), opened as follows. “*I PROPOSE to consider the question, ‘Can machines think?’ This should begin with definitions of the meaning of the terms ‘machine’ and ‘think’.*” Instead, it was suggested the ‘imitation game’, played with three people, a man (A), a woman (B), and an interrogator (C), known as the Turing Test [3].

Today Turing-like "AI has become meaningless" and "often just a fancy name for a computer program" [4], software patches, like bug fixes, to legacy software or big databases to improve their functionality, security, usability, or performance.

With AI poised to disrupt everything, it is time to know.

<sup>1</sup> Below are the author's current publications on various Internet resources:

EIS has Created the First Trans-AI Model for Narrow AI, ML, DL, and Human Intelligence; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/eis-has-created-first-trans-ai-model-narrow-ai-ml-dl-and-human-intelligence>.

Trans-AI: meet the disruptive discovery, innovation, and technology of all time; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/trans-ai-meet-disruptive-discovery-innovation-and-technology-all-time>;

Man-Machine Superintelligence Paradigm Shift: Trans-AI, Deep AI, or Real-World AI as a Real Trustworthy AI, or why ML/DL/ANNs/DNNs must be disrupted; <https://www.linkedin.com/pulse/deep-artificial-intelligence-ai-ml-dl-cc-paradigm-shift-abdoullaev/?trackingId=%2BfWRvXJ3Q1Sukg9oP1MWvA%3D%3D>.

The Real-World AI: the matter of life or death / European AI Alliance. 17 August 2021. <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/real-world-ai-matter-life-or-death>.

Man-Machine Superintelligence Paradigm Shift: Trans-AI, Deep AI, or Real-World AI, as an integral Trustworthy AI Model. Azamat Abdoullaev. 12 September 2021. <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/man-machine-superintelligence-paradigm-shift-trans-ai-deep-ai-or-real-world-ai-integral-trustworthy>.

<https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/worlds-first-trans-ai-model-narrow-ai-ml-dl-and-human-intelligence-innovating-superintelligent-human>.

Global AI Academy: AI4EE; <https://www.linkedin.com/pulse/global-ai-academy-sota-learning-excellence-centres-azamat-abdoullaev/?published=t>.

The Real-World AI: Why We Need It Now More Than Before; <https://www.bbntimes.com/technology/the-real-world-ai-why-we-need-it-now-more-than-before>.

The World's First Trans-AI Model for Narrow AI, ML, DL, and Human Intelligence: Innovating A Superintelligent Human-Machine General-Purpose Technology Platform; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/worlds-first-trans-ai-model-narrow-ai-ml-dl-and-human-intelligence-innovating-superintelligent-human?language=sk>.

Real Superintelligence: Why and How We Create the Top Human-Machine Technology Platform; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/real-superintelligence-why-and-how-we-create-top-human-machine-technology-platform>.

Machina Sapiens vs. Human Sapiens, or why Musk is after humanoid robots while being deeply scared of AI; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/machina-sapiens-vs-human-sapiens-or-why-musk-after-humanoid-robots-while-being-deeply-scared-ai?language=ga>.

The RSI Technology: Self-Aware Machines, Conscious AI, and Sentient Robotics; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/rsi-technology-self-aware-machines-conscious-ai-and-sentient-robotics>.

What's Wrong With the EU AI? Why the I-EUROPE PLATFORM Is the Cardinal Solution; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/whats-wrong-eu-ai-why-i-europe-platform-cardinal-solution>.

The end of "normal science and technology", or why humanity faces global risks and mass technological unemployment; <https://www.linkedin.com/pulse/why-humanity-faces-global-risks-technological-azamat-abdoullaev/?published=t>.

Why the EU lags behind in AI, Science and Technology; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/open-discussion/why-eu-lags-behind-ai-science-and-technology>.

What are Machine Intelligence, Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Analytics? Or Why the EU AI must be up-righted; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/what-are-machine-intelligence-artificial-intelligence-machine-learning-and-data-analytics-or-why-eu>.

EUR 1+ Trillion Transnational EU-Russia Project: Man-Machine Real Superintelligence (RSI) Platform: the biggest challenge for the next decade; <https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/posts/eur-1-trillion-transnational-eu-russia-project-man-machine-real-superintelligence-rsi-platform>.

Science And Technology XXI: New Physica, Physics X.0 & Technology X.0; <https://www.litres.ru/azamat-abdoullaev/science-and-technology-xxi-physics-x-0-technology-x-0/chitat-onlayn/page-5/>.

## 1 What is True AI or Real Machine Intelligence and Learning

True AI, or Real Machine Intelligence and Learning (MIL), is Transdisciplinary AI (Trans-AI) of Real-World Causal MIL which is programming/encoding/mapping/ representing reality, physical, mental, social and digital, in computing machinery and robots, to effectively, efficiently and sustainably interact with the world.

It is embracing the human-imitating AIs, narrow and weak, strong and general, superhuman or superintelligence, programming/encoding/mapping/representing human brains/cognition/mind/ intelligence/behavior in computing machinery and robots.

The Trans-AI is innovated not as an alternative to the pre-determined mainstream paradigm, but as a unifier to all the human-like AIs, from neural networks to ML to symbolic AI to cognitive AI and beyond.

The Trans-AI is designed and developed as the Real AI for Everything and Everybody (RAI4EE). Below we are to show how human-centric AI/ML/DL projects, as the AI4EU platform, are integrated by the RealAI4EE Platform.

The Trans-AI paradigm integrates the natural, human, social, and engineering AI models in a unifying context, a whole that is greater than the sum of its parts and transcends their traditional boundaries.

Transdisciplinary research integrates information, data, concepts, theories, techniques, tools, technologies, people, organizations, policies, and environments, as all sides of the real-world problems.

“Addressing societal challenges, as embedded in the Sustainable Development Goals (SDGs), using transdisciplinary research” is considered a “mainstream modus operandi for research” by the OECD Global Science Forum (GSF) [5].

## 2 The RAI4EE Platform: True and Real and Scientific AI vs. Artificial Human Intelligence

The mainstream human-centric AI has some fundamental problems needing for fundamental solutions.

*First*, it is philosophy, or rather lack of any philosophy, and blindly relying on statistics, its processes, algorithms, and inductive inferences, needing a large volume of big data as the “fuel” to train the model for the special tasks of the classifications and the predictions in very specific cases.

*Second*, it is not a scientific AI agreed with the rules, principles, and method of science. Today’s AI is failing to deal with reality and its causality and mentality strictly following a scientific method of inquiry depending upon the reciprocal interaction of generalizations (hypothesis, laws, theories, and models) and observable/experimental data.

*Third*, there is no common definition of AI, and each one sees AI in its own way.

Generally, there are two groups of AI researchers, specialists and generalists.

As a result, its trends are chaotic, sporadic, and unsystematic, as the Gartner Hype Cycle for AI 2021 demonstrate figure 1.

Most of AI folks are narrow specialists, 99.999...%, involved with different aspects of the Artificial Human Intelligence (AHI), where AI is about programming human brains/mind/intelligence/behavior in computing machines or robots.

AHI is sometimes defined as “the ability of a machine to perform cognitive functions we associate with human minds, such as perceiving, reasoning, learning, interacting with the environment, problem solving, and even exercising creativity” [6].

The EC High-Level Expert Group on AI has formulated its own specific behaviorist definition [7]. “AI refers to systems that display intelligent behaviour by analysing their environment and tak-

ing actions – with some degree of autonomy – to achieve specific goals. AI refers to systems designed by humans that, given a complex goal, act in the physical or digital world by perceiving their environment, interpreting the collected structured or unstructured data, reasoning on the knowledge derived from this data and deciding the best action(s) to take (according to pre-defined parameters) to achieve the given goal. AI systems can also be designed to learn to adapt their behaviour by analysing how the environment is affected by their previous actions".



Figure 1 - Gartner Hype Cycle for Artificial Intelligence 2021

In all, the AHI is fragmented as in:

- Computer Vision, machine vision;
- NLP, speech recognition, conversational AI;
- ML, DL, Neural Networks;
- Machine Reasoning, symbolic AI, expert systems;
- Machine Action, robotics and autonomous vehicles.

Very few of AI researchers (or generalists), 00.0001%, know that AI is about programming reality models and causal algorithms in computing machines or robots.

The first group lives on the anthropomorphic idea of AHI of ML, DL and NNs, dubbed as a narrow, weak, strong or general, superhuman or superintelligent AI, or Fake AI simply. Its ML models are built on the principle of statistical induction: inferring patterns from specific observations, doing statistical generalization from observations or acquiring knowledge from experience.

“This inductive approach is useful for building tools for specific tasks on well-defined inputs; analyzing satellite imagery, recommending movies, and detecting cancerous cells, for example. But induction is incapable of the general-purpose knowledge creation exemplified by the human mind. Humans develop general theories about the world, often about things of which we’ve had no direct experience.

Whereas induction implies that you can only know what you observe, many of our best ideas don’t come from experience. Indeed, if they did, we could never solve novel problems, or create

novel things. Instead, we explain the inside of stars, bacteria, and electric fields; we create computers, build cities, and change nature — feats of human creativity and explanation, not mere statistical correlation and prediction” [8].

The second advances a true and real AI, which is programming general theories about the world, instead of cognitive functions and human actions, dubbed as the real-world AI, or the Trans-AI.

The first one has their fathers, leaders or champions, who since 1950 systematically had been confusing the general public and funding institutions, with empty promises, as in:

“Human level AI will be passed in 1976 (Shannon), 1980 (Simon), 2000 (Turing or in the mid 2020's” [9].

If to summarize the hardest ever problem, the philosophical and scientific definitions of AI are of two polar types, subjective, human-dependent, and anthropomorphic vs. objective, scientific and reality-related.

So, we have a critical distinction, AHI vs. Real AI, and should choose and follow the true way.

Today’s narrow AI advances are due to the computing brute force: the rise of big data combined with the emergence of powerful graphics processing units (GPUs) for complex computations and the re-emergence of a decades-old AI computation model - the compute-hungry DL. Its proponents are now looking for a new equation for future AI innovation, that includes the advent of small data, more efficient DL models, deep reasoning, new AI hardware, as neuromorphic chips or quantum computers, and progress toward unsupervised self-learning and transfer learning.

Ultimately, researchers hope to create future AI systems that do more than mimic human thought patterns like reasoning and perception—they see it performing an entirely new type of thinking. While this might not happen in the very next wave of AI innovation, it’s in the sights of AI thought leaders.

Considering an existential value of AI Science and Technology, we must be absolutely honest and perfectly fair here. Today’s AI is hardly any real and true AI, if you automate the statistical generalization from observations, with data pattern matching, statistical correlations, and interpolations (predictions), as the AI4EU is promoting.

“Today’s AI is narrow. Applying trained models to new challenges requires an immense amount of new data training, and time. We need AI that combines different forms of knowledge, unpacks causal relationships, and learns new things on its own” [10].

Such a defective AI can only compute what it observes being fed with its training data, for very special tasks on well-defined inputs: blindly text translating, analyzing satellite imagery, recommending movies, or detecting cancerous cells, for example. By the very design it is incapable of the general-purpose knowledge creation, where the beauty of intelligence is sitting.

Google, as Facebook, Microsoft, Amazon, etc., is addicted with a sort of human-like AI (AHI), rightly dubbed as a fake AI, marked with all sorts of human biases. We can’t classify them, no explain properly and they are a zillion. See the list of cognitive biases, Wiki.

Their ML models are built on the principle of induction: inferring patterns from specific observations or acquiring knowledge from experience, focused on “big-data” - the more observations, the better the model. They have to feed their statistical algorithm millions of labelled pictures of cats, or millions of games of chess to reach the best prediction accuracy. As the article, *The False Philosophy Plaguing AI*, wisely noted: “In fact, most of science involves the search for theories which explain the observed by the unobserved. We explain apples falling with gravitational fields, mountains with continental drift, disease transmission with germs. Meanwhile, current AI systems are constrained by what they observe, entirely unable to theorize about the unknown” [8].

Again, no big data can lead you to a general principle, law, theory, or fundamental knowledge. That is the damnation of induction, be it mathematical or logical or experimental.

Due to lack of a deep conceptual foundation, today's AI is closely associated with its logical consequences, "*AI will automate entirety and remove people out of work*", "AI is totally a science-fiction based technology", or "*Robots will command the world*"? It is misrepresented as the top five myths about AI [11] (see figure 2).

That means we need the true real scientific AI, not AHI, but the Real-World MIL, or the Trans-AI, simulating and modeling reality, physical mental or virtual, not just mentality, as reflected in the real superintelligence (RSI).

The Trans-AI technology is what the Google's founder is dreaming about "AI would be the ultimate version of Google. The ultimate search engine would understand everything on the web. It would understand exactly what you wanted, and it would give you the right thing." - Larry Page<sup>2</sup>



Figure 2 - Common myths about AI

### 3 The Trans-AI Elements

All in all, the Real AI as the Trans-AI embraces as its interdependent modules or elements all its domain intelligences:

*Philosophical AI* (Ontological AI, Epistemological AI, Semantic AI, Ethical AI; AI has closer scientific connections with philosophy than do other sciences, because AI shares many concepts with philosophy, e.g. action, consciousness, epistemology (what it is sensible to say about the world), and even free will. This article treats the philosophy of AI but also analyzes some concepts common to philosophy and AI from the standpoint of AI. The Philosophy of AI and the AI of Philosophy [12]).

*Logical AI* (Symbolic AI, Knowledge Engineering, Expert Systems, Rules-based AI; logical AI representing human knowledge in a declarative form (i.e. axioms, facts and rules), as embedded into computer programs).

*Mathematical AI* [13] (see figure 3).

*Statistic AI* (Data Analytics systems, Predictive Modelling algorithms, ML, DL; model-free neural networks, connectionist, ML AI; Statistical AI, arising from ML, tends to be more concerned with "inductive" thought: given a set of patterns, induce the trend; the use of probabilistic graphical models has revolutionized AI by exploiting probabilistic independencies; Statistical Relational AI (StarAI) combines logical (or relational) AI and probabilistic (or statistical) AI [14]).

*Digital AI* (Virtual Intelligence, Software Intelligence; data-based and date-processing AI: Input (Perception in the Digital World) > Web Data > Feature extraction + Classification/Prediction/Decision/Recommendation > Output (Behavior in the Digital World). Digital AI models, as image classification and automatic speech recognition, are typically the approach of processing the signal and data from the sources of the image, the sound, the text and the temporal data. At best, it uses the Knowledge Graph to store the ontology from different data, to associate the se-

<sup>2</sup> Larry Page. Cofounder and board member, Alphabet. <https://www.forbes.com/profile/larry-page/?sh=a56d70f7893e>.

semantic data. But Knowledge Graph considers all the data at the same hierarchical layer, what does not work very well in the real world.

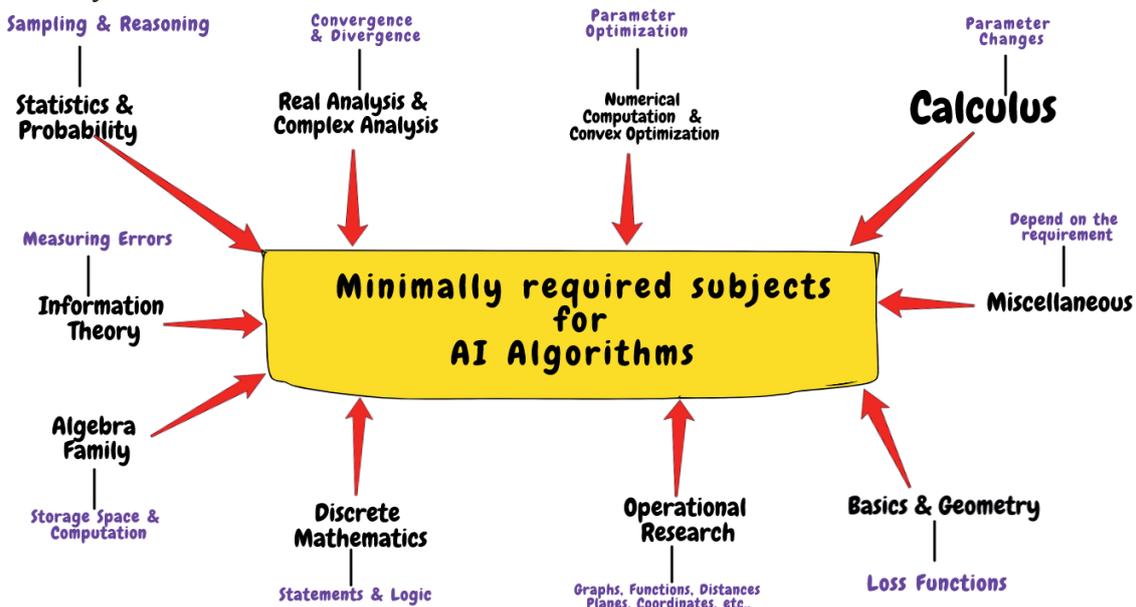


Figure 3 - Mathematical & Statistical Subjects in Artificial Intelligence Algorithms

*Physical AI* [15, 16].

*Chemical AI* (AI is being used more and more by chemists to perform various tasks. Originally, research in AI applied to chemistry has largely been fueled by the need to accelerate drug discovery and reduce its huge costs and the time to market for new drugs. However, the applications of AI in chemistry are not limited to drug discovery, extending to designing new molecules and synthesize them [17].

*Human AI* (Weak and Narrow AI, Strong and General AI, Superhuman and Superintelligence AI).

*Biological AI* (Sub-symbolic AI, Neural networks, ML, DL, supervised, semi-supervised, unsupervised, and reinforcement learning).

*Cognitive AI* (Cognitive Computing focuses on mimicking human behavior and reasoning to solve complex problems. Neurosymbolic AI. Cognitive technology is radically disruptive systems that understand unstructured data, reason to form hypotheses, learn from experience and interact with humans naturally. Success in the cognitive era will depend on the ability to derive intelligence from all forms of data with this technology [18, 19]).

Teaching Machines Common Sense Reasoning [18-20].

DARPA program seeks to articulate and encode humans' basic background knowledge for intelligent systems [21].

The Rise of Cognitive AI: Structured, explicit, and intelligible knowledge can provide a path toward higher machine intelligence [22].

*Social AI* (Social Network Services, as Facebook, YouTube, Instagram, Twitter, LinkedIn, Reddit, Snapchat, Tumblr, Pinterest, and TikTok) [23] (see figure 4).

*Economic AI* (Industrial AI, Financial AI, Industry 4.0) [24, 25].

*Political AI* [26].

*Environmental AI* (The emergence of AI can pave the way towards pursuing the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs) for protecting our environment. AI technologies and

algorithms are being developed to monitor pollution levels, reduce energy consumption, and better understand the effects of climate change [27]).

AI finds application in a wide array of environmental sectors, including natural resource conservation, wildlife protection, energy management, clean energy, waste management, pollution control and agriculture [28]. Microsoft's AI for Earth [29]. Environmental.ai, data driven platform which help to simulate, analyse, and predict Environmental condition of the city [30].

5G promote climate change or harm our planet? 5G is empowering AI, IoT, blockchain and decarbonization [31]. WILL 5G promote climate change or harm our planet? 5G IS EMPOWERING AI, IoT, blockchain and decarbonization [32]



Figure 4 - Social Media Knowledge Graph [23]

#### 4 The World of Reality as the RAI's Universe of Discourse: The Real AI Formula

Reality is studied and interacted by ontology and applied ontologies, known as science, engineering and technology.

The majority believe that perfect top-level ontology of reality is the one that has exactly one node, and exactly one axiom. That node called as Entity, and the axiom is: *For every x, Entity(x)*. "Everything that exists is an entity." Such fundamental ontological and logical assumption is a key obstacle to the real-world, transdisciplinary research and creating a RSI.

Indeed, the perfect top-level ontology is the one that has exactly one node, and exactly one axiom. But the top node is the total whole of Everything, where the World or Reality is Everything. And the first axiom is "Everything exists".

Everything (or Every thing) is all that exists, regardless time or space. It is the opposite or complement of nothing. It is the totality of all things in the world as the largest universe of discourse or the totality of things relevant to some subject matter. Without limits, everything may refer to the universe, or the world.

The Universe [multiverse or all possible worlds] is everything that exists actually or theoretically, according to global ontology and theoretical cosmology predictions. The whole universe is eternal and has always existed. Every entity is a part of everything, including all physical bodies and all abstract objects.

The Universe is commonly defined as everything that physically exists: the entirety of space-time, all forms of matter, energy and momentum, and the physical laws and constants that govern them. However, the term "universe" may be used to denote such concepts as the cosmos, the world or Nature.

World may refer to everything that constitutes reality and the Universe: see World (philosophy). Here, in its broadest sense, the term "world" refers to the totality of entities, to the whole of reality or to everything that is. Still its conceptualizations are as different as different fields. Some conceptions see the world as unique while others talk of a "plurality of worlds". Some treat the world as one simple object while others analyze the world as a complex made up of many parts. In scientific cosmology the world or universe is commonly defined as "[t]he totality of all space and time; all that is, has been, and will be".

In various special contexts, the term "world" takes a more restricted meaning associated with the Earth and all life on it, with humanity as a whole or with an international or intercontinental scope. Then, world history refers to the history of humanity as a whole or world politics is the discipline of political science studying issues that transcend nations and continents. Other examples include "world religion", "world language", "world government", "world population", "world economy", etc.

Overall, reality or the world or everything is "the totality of all entities and relationships, all that is, has been, and will be. Its properties, attributes or traits are four fundamental classes of Thing, or categories of Entity,

Substance (Object/Entity/Thing/Matter), State (Quality and Quantity or Energy), Change (Action and Process or Cause and Effect and Information) and Relationship (Causality, Space-Time or Communication).

This makes the condensed version of Aristotle's categories, leading philosophy, science and research and human practice for a couple of thousand years: (1) substance; (2) quantity; (3) quality; (4) relatives; (5) somewhere; (6) sometime; (7) being in a position; (8) having; (9) acting; and (10) being acted upon.

Attributes as qualities of things are closely related to variables, operationalized for data processing human or machine, where datasets are represented as a matrix of entity variables (organized in columns) and entity items (individuals organized in rows). Values of each entity variable statistically vary or distributed across the variable's domain. A domain is a set of individual/values that the world/entity variable is allowed to have, from two, binary variables, to non-dichotomous variables and higher level of measurement or scale of measure. All measurement in science and statistics and engineering is conducted using five different types of scale, categorical, ordinal, interval, ratio, and cardinal, unifying both qualitative and quantitative degrees.

Then, for example, substance is a fundamental attribute of reality could be operationalized in different ways. It can be dichotomized as categorical variables so that only two values, solid and liquid, or matter and anti-matter or substance and non-substance, are allowed for further processing. Or, it is represented as ordinal variables, as solid, liquid, gas and plasma. It can be made of interval, rational or numeric values as well.

The similar logic refers to the rest world attributes and entity variables of different kinds, types and sorts. We have a hierarchy of variables, ontological, logical, mathematical, physical, chemical, biological, mental, social, or technical variables. As far as any variable is something that may or does vary or change, like a variable element, feature or factor, all of them by the very changing nature are causal variables about causal data.

Again, data as statistics, individual facts, or items of information, collected via experiments or observations, are not a set of values of quantitative and qualitative variables about some individuals and objects.

Real-world data is a universe of individual values of entity variables about substances, states, changes and relationships. Such data, as information and knowledge, is measured, collected, reported, analyzed, visualized, represented, or coded in some human or computer-friendly forms for meaningful usage or machine processing.

The series data (all digital data, web data, human data, machine data, scientific, social, economic, political, environmental data), information (all digital information systems, physical, biological, cognitive, social or technical information), knowledge (science and technology, arts and culture), intelligence (natural intelligence, human intelligence, social intelligence, machine intelligence, or techno-intelligence), wisdom (the sum of universal knowledge, philosophical knowledge) of increasingly generalized concepts is completed with superintelligence (the world's knowledge as organized, digitized, processed and reified).

All in all, the world is formalized as the ordered totality of world's variables, as substantial variable **O**, state variable **S**, change variable **C**, and relational variable **R**,  $\mathbf{W} = \langle \mathbf{O}, \mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{R} \rangle$ , underlying all the rest causal variables with real-world causal data.

The world is not an infinite regress of entities "governed by a recursive principle that determines how each entity in the series depends on or is produced by its predecessor", as it is advanced by mono-disciplinary science and technology.

The world is rather a global dynamic causal network (GCN) where all entity variables influence each other, and formally presented as the infinite Cartesian products of universal world sets:

$$\mathbf{W} \times \mathbf{W} \times \mathbf{W} \dots \times \mathbf{W} \dots$$

It could be approximated as the  $n$ -ary Cartesian product over  $n$  sets  $W_1, \dots, W_n$  as the set of  $n$ -tuples.

The GCN can be mathematically modeled as the Cartesian product of  $n$  sets, also known as an  $n$ -fold Cartesian product, which can be represented by an  $n$ -dimensional array, where each element is an  $n$ -tuple. A global data table can be created by taking the Cartesian product of a set of rows and a set of columns. If the Cartesian product  $rows \times columns$  is taken, the cells of the table contain ordered pairs of the form (row value, column value) [33].

It is generally understood that scientific laws and theories implicitly reflect or explicitly assert causal relationships fundamental to reality, which are discovered rather than invented.

Not mentioning statistics and its ML techniques, science and engineering are limited by special types of linear causal relationships between independent and dependent variables, investigated by experimental research to determine if changes in one variable result in changes in another variable.

In a sense, the world's formula is making the RSI's worldview, its fundamental cognitive orientation encompassing the whole of the world's knowledge, including philosophy, science and engineering, arts and culture, with all possible inter- and trans-disciplinary interconnections; fundamental, existential, and normative postulates, scientific theories and laws.

It is the master equation or world's formula, acting as the ontological framework for scientific and technological knowledge and practice and the master algorithm for human-machine superintelligence, digital superminds.

## 5 Discussions: How to Develop a True and Real Artificial Intelligence

The dictionary defines AI as 1: a branch of computer science dealing with the simulation of intelligent behavior in computers; and 2: the capability of a machine to imitate intelligent human behavior. But the classic definition is that AI is "the science and engineering of making intelligent machines, especially intelligent computer programs". Or, AI is a way of making a machine, computer, computer-controlled robot, or software reason and act intelligently, to effectively interact with the world.

The mainstream idea of AI is diverted from the standard conception to mimicking human brains/mind/intelligence/behavior. As such, we have created a whole AI family tree,

Narrow AI > Weak AI > Strong AI or Artificial General Intelligence > Superintelligence or Superintelligent AI, as hierarchically ranked below:

- Artificial Narrow Intelligence (Expert AI, ML, DL, ANNs)
- Artificial General Intelligence (Sentient machines, Conscious AI (CAI), General AI (GAI), Strong AI, General AI, Human-level AI)
- The Singularity, superintelligence and super-intelligent AI (SAI).

A list of the companies and organizations deeply involved in AGI development includes:

Facebook, Apple, IBM, Intel, DeepMind, Microsoft, SingularityNET, OpenAI, DARPA, The US Air Force. And that list could also include start-ups and universities such as MIT, NYU, and Oxford. AI as a human-level artificial intelligence isn't more science fiction, it's a national or business strategy. In reality, today's AIs are very different, having little to do with simulating human cognition and intelligence or brains, if only somehow inspired.

Today's AI is mathematical algorithms and statistical rules and predictive analytics, which excel humans in many specific areas, such as judging, strategic games, algorithmic trading, self-driving, diagnosing, computing, measuring, recognising objects, characters, faces, human speech, or translating languages, having no idea what it is doing.

Such narrowly specialized AIs have superhuman capabilities, but only in their specific areas of dominance, much outsmarting humans in doing specific tasks, jobs and works.

There is natural demand for a broad, integrating AI, like as a Composite AI combining different AI techniques to achieve better results, offering two main benefits in the short term: "1. Dealing with "small data;" and 2. Helping to expand the scope and quality of AI applications through increased generalization and better abstraction mechanisms".

The Composite AI, according to Gartner's 2020 Hype Cycle for Emerging Technologies, is the "combination of different AI techniques to achieve the best result" [34].

The idea of Composite AI is followed by SAS [35] and Google [36].

Google's Pathways is developed as "a new AI architecture that will handle many tasks at once, learn new tasks quickly and reflect a better understanding of the world" (see figure 5).

As noted, ML models are overspecialized at individual tasks and rely on one form of input. To synthesize them to several levels Google has built Pathways. This solution will enable a single AI system to generalize across millions of tasks, to understand different types of data and with higher efficiency.

According to Google, Pathways is a new way of thinking about AI that addresses many of the weaknesses of existing systems and synthesizes their strengths. Pathways will enable us to train a single model to do thousands or millions of things.

Google Pathways can handle many tasks at once. Recent years have seen exciting advances in ML, which have raised its capabilities across a suite of applications. Google is continuously making progress in artificial intelligence. All sounds good and well. But there is a good suspicion that Pathways could end up overpromising and under-delivering as it is missing the conception of RSI.

The whole thing isn't just something about a narrow, weak, strong or superhuman AI, ML, DL and deep neural networks; it's a transdisciplinary integration of knowledge fields, methods and techniques – computer science, applied mathematics, statistics, data mining, data analytics, forecasting, optimization, natural language processing (NLP), computer vision and others.

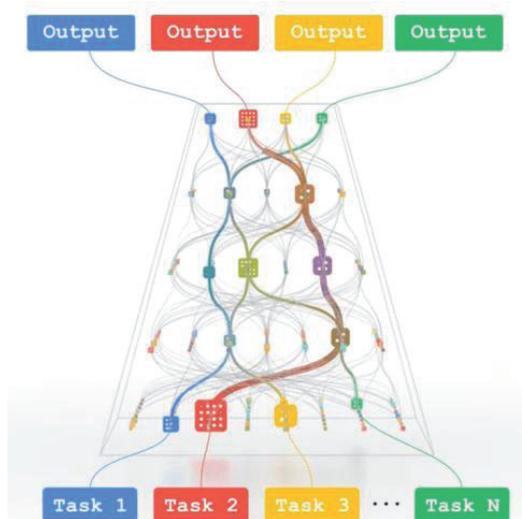


Figure 5 - Google's Composite AI Model (Pathways: A single model that can generalize across millions of tasks) - <https://youtu.be/Nf-d9CcEZ2w>

This is what makes a true AI or real MIL.

Real MI and ML is then a way of making a machine, computer, computer-controlled robot, or software reason and act intelligently, to effectively interact with the world by intelligent processing its data, from real-world data to web data.

EIS has created the Composite Man-Machine Intelligence as the RSI Metamodel of AI/ML/DL models of all possible tasks and types, narrow, general or superhuman, as of 2021.

The RSI will combine a wide range of skills in one entity, as a single integrated system/network /platform of man-machine superintelligence.

The RSI features a unifying World Metamodel (Global Ontology), with a unifying Reasoning and Learning Framework (Master Algorithm), Standard Data Type Hierarchy, NL Programming Language, to effectively interact with the world by intelligent processing of its data, from the web data to the real-world data.

## 6 The Trans-AI Provenance: EIS Encyclopedic Intelligent Systems

Many “elite researchers in HAI”, not mentioning the general public, are still biased in “human level machine intelligence,” or HLMI, AGI, as if having a 50 percent chance of occurring within 45 years and a 10 percent chance of occurring within 9 years. And there comes out an intelligence explosion, summing with a superintelligence AGI, emulating or mimicking human brains/mind/intelligence will never bring us to RSI.

It is anthropomorphically naive to define it like this: “a superintelligence is a hypothetical agent that possesses intelligence far surpassing that of the brightest and most gifted human minds”.

And it is philosophically naive to believe in the induction principle, that more big data, more speed and more compute could generate something super-valuable, besides of the energy crises.

Computer components could greatly surpass human performance in speed, memory and computing power, still staying a dumb idiot, fast-calculating idiot.

"Biological neurons operate at a peak speed of about 200 Hz, a full seven orders of magnitude slower than a modern microprocessor (~2 GHz)." But the human mind outperforms the most advanced computing machinery due to its small smart data, real intelligence, generalizations, leaning transfer, and programmed ability to deep causal reason, finding from a billion of problem selection alternatives a few.

It is regardless that your “neurons transmit spike signals across axons at no greater than 120 m/s, "whereas existing electronic processing cores can communicate optically at the speed of light".

A human-like superintelligence emulating human mind running on much faster hardware than the brain does not make an essential difference.

A human-like reasoner that could think millions of times faster than current humans might have only a speed dominant advantage in reasoning tasks, performing the same biases and mental mistakes, but with the speed of light.

The only real prospect here is what emerging as the Trans-AI, man-machine general superintelligence platform, integrating all the multitude of human minds and machine intelligences, problem-solving systems, and data/information/knowledge systems, as the internet/Web:

- Human intelligence, individual and collective,
- Narrow and Weak AIs, experts systems, neural networks, ML and DL;
- Strong and General AI;
- Superhuman or superintelligent AI.

Still, we have to see the general trend: even narrow AI machines are already surpassing humans in many domains, due to mathematical models and statistic algorithms. Every day, narrow neural networks and weak AI applications outsmarting human minds in more and more fields: NLP (ma-

chine translation); Strategic gaming, like chess, the board game Go, and some Atari video games; Autonomous driving; Agricultural industry; Manufacturing; Safety and security; Supercomputing; Communication, as technology platforms, social media networks, bots and digital assistants; Health care; Education; Defense; Space exploration.

The existential question is when will AI be smart enough to outsmart people?

We are one critical step away from a machine intelligence whose superintelligence transcendence/perfection largely depends on its causal power to detect, identify, process, compute, remember and manipulate any number of causal variables from any environment, physical, mental, digital, or virtual.

Unknowingly for the general public, Real-World AI is rising combining and transcending all the special designed intelligent algorithms.

We miss to see that the Real-World AI is emerging as one of the greatest ever techno-science discoveries, looking in the wrong direction of the big-tech companies, just fearing to be AI-disrupted, as Apple, Google, Amazon, Microsoft or Facebook, or big powers, as China, USA, or Russia.

Meantime, in 2020, a generally unknown i-company, EIS Encyclopedic Intelligent Systems LTD, has successfully completed its Transdisciplinary R&D of AI Model as the Trans-AI or Real-World AI or Causal MIL, trademarked as the RSI GPT Platform complementing human intelligence, collective and individual.

The company has spent zero public funding and private investment for its R&D of disruptive discovery of Trans-AI, relying only on its own resources, intelligent and material.

EIS is aimed to build/engineer the Real AI GPT Platform, to be open to the AI civic science platforms, first developing the Proof-of-Concept/Mechanism /Principle Prototype to demonstrate the RSI feasibility for a full-scale global deployment [2-4].

## 7 Trans-AI vs. Narrow AI, ML, DL and ANNs

AI technology could upend everything upside-down. Again, today's AI is weak and narrow, instead of being transdisciplinary AI (Trans-AI) or real and true MIL. Just look at its patent landscape taken from the report Inventing AI [37] (see figure 6).

It is plain and clear that as it is specialized, fragmented, and isolated, AI fails to realize its enormous potential of the integrating GPT. Its full force and power come as the Trans-AI embracing:

- Big Data Analytics/Information Science
- Logic/Symbol manipulation
- Mathematics, Linear algebra, Functional analysis, Optimization
- Statistics, Probability theory, ML/DL
- Neural Networks/Artificial Brains
- Psychology/Mental models
- Computer Science/Programming/Algorithm /Software/Hardware
- Linguistics/Language models/NLP/NLU
- Science/World's Knowledge/Laws and Rules
- Engineering/Robotics/Automation
- Technology/Information Technology

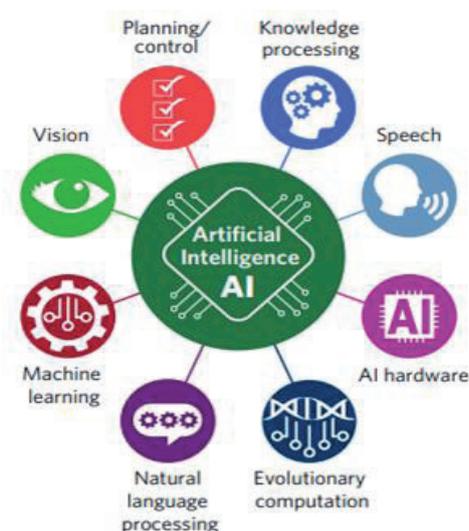


Figure 6 - Narrow AI Patent Landscape [37]

- Philosophy/Ontology/Epistemology/Ethics /Principles

Once more, Real AI is not a “branch of computer science concerned with building smart machines capable of performing tasks that typically require human intelligence”. It is the science and engineering of making intelligent machines...

AI Science and Engineering is NOT monodisciplinary, interdisciplinary, or multidisciplinary. It is totally transdisciplinary, being about the world/reality/causality/mentality/data, its digital representation, modeling and simulation, processing, inference, and interaction.

The world is at the critical stage now, defying any deterministic forecasting basing on the present and pervious states of world affairs. From politics to economics, finance and manufacturing to work, transportation and energy, one can't imagine the world in five years' time without a disruptive impact of global AI technology (AI/ML, Automation, Robotics, Digital Reality, Metaverse).

If to shape a smart and sustainable future, the world should invest into the MIL Science and Technology, for the Trans-AI paradigm is the way to an inclusive, instrumented, interconnected and intelligent world (I-World) [38] (see figure 7).

The most non-standard and realistic forecasting comes from E. Musk. He predicted in his interview to New York Times that humans are to be overtaken by RSI within the next five years. Working with AI at Tesla lets him say with confidence “that we're headed toward a situation where AI is vastly smarter than humans and I think that time frame is less than five years from now. But that doesn't mean that everything goes to hell in five years. It just means that things get unstable or weird.”

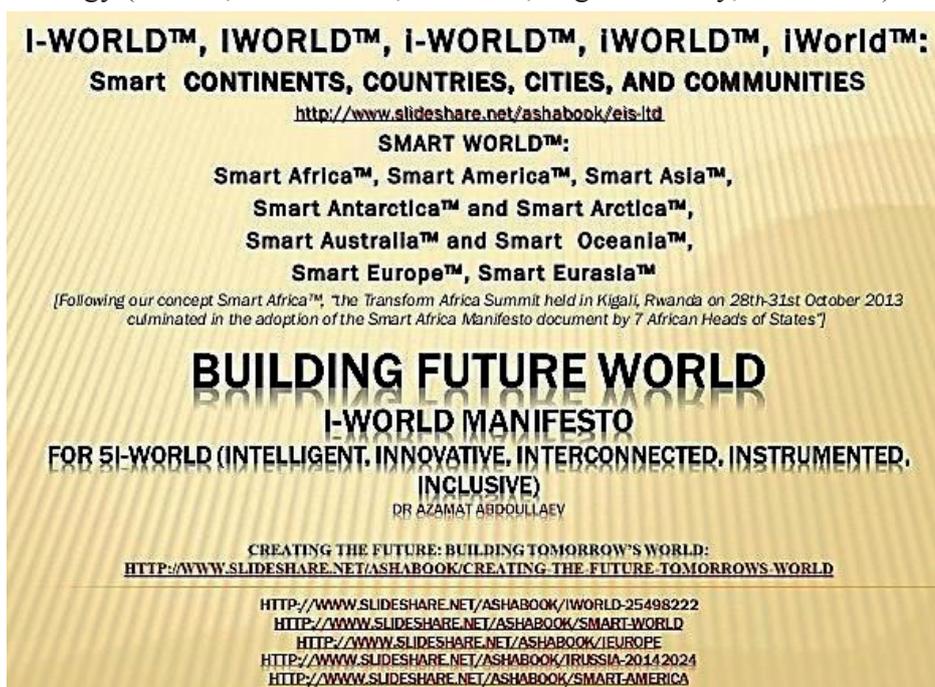


Figure 7 - From Trans-AI to I-World

## 8 The Real and True AI as the optimal solution of existential risks

For all its 10+k civilized history, humanity has been existing for no noble goal, having only nature-motivated life purposes, to survive and preserve, reproducing and extending themselves, and at best, leaving some notable historical “foot printing”.

In the Age of AI, things become radically different. A new race of superintelligent machines is on the horizon, raising existential questions for the modern humanity

*Where Do We Come From? What Are We? Where Are We Going?*

If all human race is doomed to be disrupted by the Machina Sapiens or to emerge as a super-human-machine cosmic race. Starting from narrow and weak AIs, one passes to AGI, general or strong AI, all ending with ASI, artificial superintelligence. It all resulted with raising existential concerns for the whole of humanity.

“The pace of progress in AI (I’m not referring to narrow AI) is incredibly fast... The risk of something seriously dangerous happening is in the five-year time frame. 10 years at most.” — Elon Musk wrote in a comment on Edge.org

“I’m increasingly inclined to think that there should be some regulatory oversight, maybe at the national and international level, just to make sure that we don’t do something very foolish. I mean with AI we’re summoning the demon.” — Elon Musk warned at MIT’s AeroAstro Centennial Symposium

“The development of full AI could spell the end of the human race....It would take off on its own, and re-design itself at an ever increasing rate. Humans, who are limited by slow biological evolution, couldn’t compete, and would be superseded.” — Stephen Hawking told the BBC

“I visualise a time when we will be to robots what dogs are to humans, and I’m rooting for the machines.” — Claude Shannon<sup>3</sup>

The Real-World AI is an alternative to the human-replacing AI. It is a radically new transdisciplinary AI paradigm. The Trans-AI is designed, developed, and deployed aiming to simulate reality as well as model mentality, reflecting all in digital reality, to understand, learn and interact with any environments, physical or mental, social, digital, or virtual. It is embracing the AAI algorithms, techniques, and methods as well as human individual and collective intelligence, or superminds, in the up-down ways.

As a result, we have the hybrid machine-human superintelligence (cyber-human superminds) as the Real-World AI or the Trans-AI GPT Human-Internet Platform.

It is emerging as the disruptive general-purpose technology platform, in the context of the Internet, the web, narrow ML/DL/AI technology platforms, big data analytics applications, the internet of things and all advanced emerging and digital technologies.

## Summing up

The Trans-AI platform is innovated as the RSI. It features a unifying World Metamodel (Global Ontology), with General Intelligence (Reasoning and Learning) Framework (Master Algorithm), Standard Data Type Hierarchy, NL Programming, to effectively interact with the world by intelligent processing of its data, from the web data to the real-world data.

To find a principal solution for one of the most challenging problems, it was necessary to solve the following fundamental problems:

How to build a computational theory of reality, causality and mentality to determine the mechanism and master algorithm of general/universal/real intelligence.

How to teach computers to classify the things in the world with their representations and data, the real-world data, observational data, experimental data and sensor data, their nature, types and structures, syntax, meaning, representation, and use, variables, values, constraints, and behavior.

How to decode/interpret digital data by designation and denotation.

How to generalize narrow AI capabilities beyond their narrow domains.

How to upgrade the statistic data driven AI of MIL into the Real AI of Causal MIL.

*To survive and prosper in the future technology world, the world should prioritize the Trans-AI Science and Engineering as the fundamental GPT for most emerging and digital technologies, from AI to ML, from autonomous driving to metaverse to digital reality to quantum computing.*

---

<sup>3</sup> Bernard Marr. 28 Best Quotes About Artificial Intelligence. <https://bernardmarr.com/28-best-quotes-about-artificial-intelligence/>.

## Supplement I

### The AI4EU Platform<sup>4</sup>: The European AI on Demand Platform AI4EU is a one-stop-shop for anyone looking for AI knowledge, technology, tools, services and experts

“The AI4EU Platform will bring the AI stakeholders and AI resources together in one dedicated place, overcoming fragmentation, so that AI-based innovations (research, products, solutions) will be accelerated. The AI4EU Platform will act as the one-stop-shop for anyone looking for AI knowledge, technology, services, software, and experts. AI4EU will function as European AI market driver, offering a critical mass of resources, community networking effects, and rapid development and growth [39, 40].

The European AI on Demand Platform brings together the AI community while promoting European values. The platform is a facilitator of knowledge transfer from research to business application.

To fulfill the user needs and strategic objectives, the following design principles were considered:

- *Service-oriented and Web platform*: The AI4EU Platform is designed to be accessible only by using a web browser, without requiring any client software installation. All AI resources are accessible through a comprehensive service layer facilitating the Platform use and uptake by users.
- *Multi-disciplinary and cross-sector*: AI4EU hosts workflows and algorithms for a wide range of AI symbolic and ML problems. This increases the achievable innovation potential by providing immediate access to AI technologies in multiple fields of expertise as opposed to existing systems that isolate the various research communities.
- *Scalable and interoperable*: The AI4EU Platform is fully scalable and interoperable in terms of data sources, programming languages, IT infrastructures, and third-party platforms. It will efficiently construct toolchains utilising state-of-the-art technology components and large data resources applied across multiple sectors.
- *Curated Data access*: AI4EU data build upon previous EU projects, existing Big Data communities, and data exchange activities that will further be enriched by additional curated data coming from the AI4EU consortium, affiliated partners, as well as from all parties involved in AI experimentation projects.
- *Collaborative, Social and Confidential*: The AI4EU Platform allows users to form virtual and interdisciplinary teams sharing activities (workflows, algorithms, data, and data experiment reports) towards common goals.

In summary, the European AI on-Demand Platform aims to fulfill the needs of the European AI community at large. To that end, it will promote four main services:

- Providing accurate information to all users;
- Facilitating and promoting collaboration between all AI stakeholders for new products/services, and to create jobs and growth with AI;
- Making high-quality and accurate AI assets and relevant documents available;
- Experimenting with AI tools to prototype ideas and applications”

### The AI4EU Scientific Vision<sup>5</sup>

AI systems are *human-centred*. Such systems would need to be (figure 8):

- *Explainable AI*, i.e., they allow humans to understand the reasons behind their recommendations or decisions;
- *Verifiable AI*, i.e., they guarantee fundamental properties like safety, privacy and security;
- *Physical AI*, it refers to the use of AI techniques to solve problems that involve direct interaction with the physical world, e.g., by observing the world through sensors or by modifying the world through actuators. What distinguishes Physical AI systems is their direct interaction with the physical world, contrasting with other AI types, e.g., financial recommendation systems (where AI is between the human and a database); chatbots (where AI interacts with the human via Internet); or AI chess-players (where a human moves the chess pieces and reports the chess board state to the AI algorithm).
- *Collaborative AI*, i.e., they can share knowledge with humans and take decisions jointly with them;
- *Integrative AI*, i.e., they can combine different requirements and methods into one AI system<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> The AI4EU Platform. <https://www.ai4eu.eu/ai4eu-platform>. This link is out of date. New link <https://www.ai4europe.eu/>.

<sup>5</sup> The AI4EU Scientific Vision. <https://www.ai4eu.eu/ai4eu-scientific-vision>. This link is out of date. New link <https://www.ai4europe.eu/>.

<sup>6</sup> It looks the OECD Global Science Forum (GSF) Recommendations for Governments, research agencies, research institutions and international bodies have a little concern with the EC, which practices funding narrow and weak AI projects having no real [transdisciplinary] value, like as the AI4EU Project, while wasting a huge public funding. AI4EU – The consortium was established to build the first European AI On-Demand Platform and Ecosystem with the support of the European Commission under the Horizon 2020 programme. It supports a large European ecosystem spanning the 28 countries, facilitating collaboration between all Europeans actors in AI (scientists, entrepreneurs, SMEs, Industries, funding organizations, citizens). EU contribution: €20 000 000.

## Supplement II

China and the U.S. are competing to be the world's technological master 5–7 years from now. After analyzing patent application data in 10 categories, including artificial intelligence and quantum computing, in 2017 Nikkei has concluded that China will reign supreme in nine categories [42]:

AI = MI, "The science and engineering of making intelligent machines, especially intelligent computer programs". MI is a way of [making a machine, computer, computer-controlled robot, or software reason and act intelligently, to effectively interact with the world]

Quantum computing, utilizing the collective properties of quantum states, such as superposition, interference, and entanglement, to perform computation in qubits.

Regenerative medicine deals with the "process of replacing, engineering or regenerating human or animal cells, tissues or organs to restore or establish normal function".

A self-driving car, an autonomous vehicle (AV or auto), driverless car, or robotic car (robo-car), it is capable of sensing its environment, using AI control systems and environmental sensors, radar, lidar, sonar, GPS, to move safely and autonomously.

Blockchain a growing list of records/compound data/rows, called *blocks*, that are linked together cryptographically. It is used as a distributed ledger (a shared ledger or distributed ledger technology or DLT), a consensus of replicated, shared, and synchronized digital data geographically spread across multiple sites, countries, or institutions.

Cybersecurity, Computer security, or information technology security (IT security) is the protection of computer systems and networks from information disclosure, theft of or damage to the hardware, software or e-data.

Virtual reality is a simulated experience that can be similar to or completely different from the real world to be able to look around the artificial world, move around in it, and interact with virtual features or items. It is applied in entertainment (e.g., video games), education (e.g. medical or military training) and business (e.g. virtual meetings), as augmented reality, mixed reality or extended reality or XR.

"Zuchongzhi 2.1," is 10 million times faster than the current fastest supercomputer and its calculation complexity is more than 1 million times higher than Google's Sycamore processor. It's the first time that China has reached quantum advantage in a superconducting quantum computing system.

A new light-based quantum computer prototype, "Jiuzhang 2.0," with 113 detected photons, which can implement large-scale Gaussian boson sampling 1 septillion times faster than the world's fastest existing supercomputer, according to the Xinhua News Agency.

The only critical issue is China's AI is weak and narrow, instead of being real and true MIL:

So, it is China who is obtaining total technological supremacy.

## References

- [1] **Abdoullaev A.** Reality, Universal Ontology and Knowledge Systems: Toward the Intelligent World, IGI Global, USA, 2008, 346 p.
- [2] **Abdoullaev A.** Artificial Superintelligence // Ohio, USA; Moscow, EIS Encyclopedic Intelligent Systems, Incorporated, 1999. 183 p.
- [3] **Turing A.M.** Computing machinery and intelligence; *Mind*, Volume LIX, Issue 236, October 1950, P.433–460.
- [4] **Bogost Ian.** 'Artificial Intelligence' Has Become Meaningless. It's often just a fancy name for a computer program. The Atlantic. March 4, 2017. <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2017/03/what-is-artificial-intelligence/518547/>
- [5] Addressing societal challenges using transdisciplinary research. June 16, 2020. <https://www.oecd.org/science/addressing-societal-challenges-using-transdisciplinary-research-0ca0ca45-en.htm>; The OECD Global Science Forum Strategic Directions 2015-2019; <https://www.oecd.org/sti/inno/STI-GSF-brochure.pdf>.
- [6] McKinsey - An executive's guide to AI; By Emilie A Lachance - April 04, 2018 [https://blog.worximity.com/en/industry-4\\_0/mckinsey-an-executives-guide-to-ai](https://blog.worximity.com/en/industry-4_0/mckinsey-an-executives-guide-to-ai)].
- [7] A definition of AI: main capabilities and scientific disciplines. Definition developed for the purpose of the deliverables of the High-Level Expert Group on AI. Brussels, 18 December 2018. 9 p. [https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/ai\\_hleg\\_definition\\_of\\_ai\\_18\\_december\\_1.pdf](https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/ai_hleg_definition_of_ai_18_december_1.pdf).

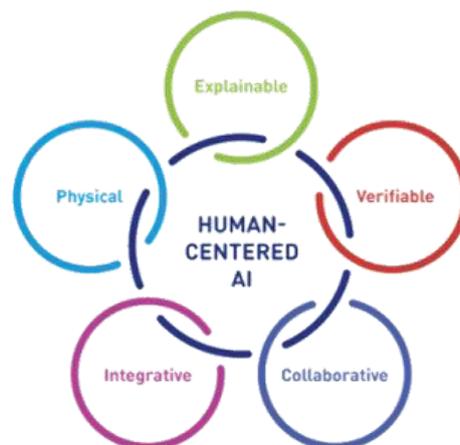
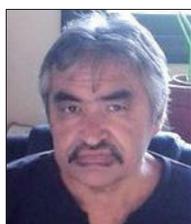


Figure 8 - Five priority areas make research results available to all through the AI on-demand platform

- [8] **Chugg Ben.** The False Philosophy Plaguering AI. Erik J. Larson and The Myth of Artificial Intelligence. 9 Jun. <https://towardsdatascience.com/the-false-philosophy-plaguering-ai-bdcfd4872c45>.
- [9] Timeline of artificial intelligence; [https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_artificial\\_intelligence](https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_artificial_intelligence)].
- [10] The new AI innovation equation. <https://www.ibm.com/watson/advantage-reports/future-of-artificial-intelligence/ai-innovation-equation.html>.
- [11] **Tyagi Neelam.** Top 5 Myths of Artificial Intelligence. Jun 03, 2020. Artificial Intelligence. Updated on: Dec 06, 2020. <https://www.analyticssteps.com/blogs/top-5-myths-about-artificial-intelligence>.
- [12] **McCarthy John.** The Philosophy of AI and the AI of Philosophy. Computer Science Department, Stanford University. 25 June 2006. 43 p. <http://jmc.stanford.edu/articles/aiphil2/aiphil2.pdf>.
- [13] **Shafi.** AI & Mathematics. Exploring Mathematical and Statistical Subjects of AI Algorithms. Sep 29, 2020. <https://medium.com/swlh/ai-mathematics-699a9ea2a0d6>.
- [14] **Fabrizio Riguzzi, Kristian Kersting, Marco Lippi and Sriraam Natarajan.** Editorial: Statistical Relational Artificial Intelligence. 30 July 2019. Front. Robot. AI doi: 10.3389/frobt.2019.00068. <https://www.frontiersin.org/research-topics/5640/statistical-relational-artificial-intelligence>.
- [15] **Abdoullaev A,** Encyclopedic AI Knowledge Base: the Physical AI Prototype Model, Moscow, 1989.
- [16] **Tegmark Max,** [https://paperswithcode.com/search?q=author%3AMax+Tegmark&order\\_by=date](https://paperswithcode.com/search?q=author%3AMax+Tegmark&order_by=date)
- [17] AI for chemistry, A concise state of the art. <https://chemintelligence.com/ai-for-chemistry>.
- [18] Common Sense AI, IBM, MIT and Harvard release “Common Sense AI” dataset at ICML 2021 <https://research.ibm.com/blog/icml-darpa-agent>.
- [19] How to get started with cognitive technology. Best practices for putting cognitive technology to work <https://www.ibm.com/watson/advantage-reports/getting-started-cognitive-technology.html>.
- [20] Forward thinking: Experts reveal what’s next for AI <https://www.ibm.com/watson/advantage-reports/future-of-artificial-intelligence.html>.
- [21] Teaching Machines Common Sense Reasoning. <https://www.darpa.mil/news-events/2018-10-11>.
- [22] **Singer Gadi.** <https://towardsdatascience.com/the-rise-of-cognitive-ai-a29d2b724ccc>.
- [23] **Evans D., Bratton S., & Emeritus C.** (2008). Social Media Marketing: An hour a day. Indianapolis: Wiley.
- [24] The macroeconomic impact of AI, <https://www.pwc.co.uk/economic-services/assets/macro-economic-impact-of-ai-technical-report-feb-18.pdf>;
- [25] Economic impacts of AI [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637967/EPRS\\_BRI\(2019\)637967\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637967/EPRS_BRI(2019)637967_EN.pdf)
- [26] Smart government platforms; AI and Public Policy, <https://www.mercatus.org/system/files/thierer-artificial-intelligence-policy-mr-mercatus-v1.pdf>.
- [27] AI for the Environment; <https://www.capgemini.com/service/perform-ai/do-good-with-data-ai/ai-for-the-environment/>.
- [28] Role of Artificial Intelligence in Environmental Sustainability; <https://www.ecomena.org/artificial-intelligence-environmental-sustainability/>.
- [29] AI for Earth; <https://www.microsoft.com/en-us/ai/ai-for-earth>.
- [30] #Power of AI for Environmental Prediction; <https://environmental.ai/>
- [31] **Abdoullaev A.** 5G promote climate change or harm our planet? 5G is empowering AI, IoT, blockchain and decarbonization; <https://www.bbntimes.com/environment/will-5g-promote-climate-change-or-harm-our-planet-5g-is-empowering-ai-iot-blockchain-and-decarbonization?fbclid=IwAR037sMnWmB-kF5U3rBeSF-ZzMIi2pMWIIZ-mw5d6Vx3SVQuaCV7w2XfPHE>
- [32] **Abdoullaev A.** Will 5G promote climate change or harm our planet? 5G is empowering AI, IOT, blockchain and decarbonization. <https://www.bbntimes.com/environment/will-5g-promote-climate-change-or-harm-our-planet-5g-is-empowering-ai-iot-blockchain-and-decarbonization?fbclid=IwAR037sMnWmB-kF5U3rBeSF-ZzMIi2pMWIIZ-mw5d6Vx3SVQuaCV7w2XfPHE>.
- [33] **Abdoullaev A.** “What Organizes the World: N-Relational Entities”. <https://www.igi-global.com/chapter/organizes-world-relational-entities/28313>
- [34] Composite AI: Go Beyond Machine Learning to Create More Value. <https://www.gartner.com/en/webinars/4002198/composite-ai-how-could-we-finally-get-ai-to-be-smarter->
- [35] Composite AI. Push the boundaries of innovation. Solve any problem. [https://www.sas.com/en\\_us/solutions/ai/composite.html](https://www.sas.com/en_us/solutions/ai/composite.html).
- [36] Introducing Pathways: A next-generation AI architecture. <https://blog.google/technology/ai/introducing-pathways-next-generation-ai-architecture/>.
- [37] Inventing AI. Tracing the diffusion of artificial intelligence with U.S. patents. <https://www.uspto.gov/sites/default/files/documents/OCE-DH-AI.pdf>

- [38] **Abdoullaev A.** I-WORLD™, IWORLD™, iWORLD™, iWorld™: AI World: Intelligent, Innovative, Interconnected, Instrumented, Inclusive, Green WORLD: Smart CONTINENTS, COUNTRIES, CITIES, AND COMMUNITIES. <https://www.slideshare.net/ashabook/iworld-25498222>.
- [39] White Paper. On Artificial Intelligence - A European approach to excellence and trust. European Commission. Brussels, 19.2.2020. COM(2020) 65 final. 27 p. [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020_en.pdf).
- [40] Public consultation on the AI White Paper. Final report. European Commission. November 2020. 17 p. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/white-paper-artificial-intelligence-public-consultation-towards-european-approach-excellence-and>.
- [41] Excellence and Trust in AI — Brochure. Shaping Europe’s digital future. European Commission. Publication 23 February 2021. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/excellence-and-trust-ai-brochure>.
- [42] Patent War in a Digital Era. <https://vdata.nikkei.com/en/newsgraphics/patent-wars/?fbclid=IwAR01mb90Bdx3BJsw6mctPG1V6phNi0GROAV0nZaRGajMhbcNcq4DMGIMOjQ>.
- 

## About the author



**Azamat Abdoullaev** (b. 1951). From 1975 to 1981, Dr. Abdoullaev was a postgraduate and research associate at the USSR Academy of Sciences, the Institute of Physics (Moscow, Russia). In 1988 he received a scientific degree in physics and mathematics (the PhD equivalent) conferred by the USSR Academy of Sciences, the Lebedev's Institute of Physics, Moscow. In 1989, a year later, he submitted a doctorate dissertation in the philosophical sciences, which was published as a book, 'Introduction into Information World', by the USSR Academy of Sciences. The work pioneered the role of global ontology for building (encyclopedic) intelligent systems. From 1983 to 1991, the author was a research scientist at the Institute of Scientific and Technical Information at the USSR

Academy of Sciences and the Government Committee in Scientific and Technical Information. From 1993 up to date, Director of a Russian company, the first business corporation entirely engaged in research and development of Computer Intelligence Framework enabling a new class of knowledge society artifacts: large scale intelligent systems with encyclopedic knowledge, general reasoning and natural language power driven by standard global ontology and semantics technology. Dr A. Abdoullaev established EIS Encyclopedic Intelligent Systems Limited Company in Cyprus to contribute to the emerging world market of intellectual information technologies and participate in the European Union programs for building knowledge-based economies. Dr A. Abdoullaev is the creator of USECS (Universal Standard Entity Classification System) known as "the World Directory of Things". Scopus ID 56128889800. <https://futurium.ec.europa.eu/en/user/10596>. <https://www.igi-global.com/affiliate/azamat-abdoullaev/1192>, <https://www.linkedin.com/in/azamat-abdoullaev-335a0881/>. [ontopaedia@gmail.com](mailto:ontopaedia@gmail.com).

---

*Received October 14, 2021. Revised December 17, 2021. Accepted December 21, 2021.*

---

## Транс-ИИ: как создать настоящий искусственный интеллект

### Азамат Абдуллаев

*EIS Encyclopedic Intelligent Systems Ltd, Кунп-Россия*

### Аннотация

Мир стоит на пороге колоссальных перемен. Это критический момент исторического выбора и возможностей. Это могут быть лучшие 5 лет или одни из худших, потому что у нас есть все возможности, технологии и знания для создания самой фундаментальной технологии общего назначения, которая могла бы полностью перевернуть всю человеческую историю. Самыми важными технологиями общего назначения были: огонь, колесо, язык, письмо, печатный станок, паровой двигатель, электроэнергия, информационные и телекоммуникационные технологии; и все они были дополнены технологией реального искусственного интеллекта. В исследовании говорится о том, почему и как настоящий машинный интеллект, или настоящий ИИ, или настоящий суперинтеллект (НСИ) можно спроектировать и разработать, развернуть и распространить в течение следующих 5 лет. Идея НСИ заняла около трех десятилетий в три этапа. Первая концептуальная модель Транс-ИИ была опубли-

кована в 1989 году. Она охватывала все возможные физические явления, эффекты и процессы. Расширенная модель реального ИИ была разработана в 1999 году. Полная теория суперинтеллекта с её моделью реальности, глобальной базой знаний, языком программирования и основным алгоритмом была представлена в 2008 году. Проект НСИ был окончательно завершён в 2020 году. Некоторые ключевые выводы и открытия публикуются на сайте *EU AI Alliance / Futurium*. НСИ имеет унифицированную мировую метамодель (глобальную онтологию) с общей структурой интеллекта (главный алгоритм), стандартной иерархией типов данных, языком программирования, чтобы эффективно взаимодействовать с миром посредством интеллектуальной обработки его данных, от веб-данных до данных из реального мира. Основные результаты с техническими спецификациями, классификациями, формулами, алгоритмами, проектами и шаблонами хранились как коммерческая тайна и задокументированы как Корпоративный конфиденциальный отчёт «Как разработать человеко-машинный суперинтеллект 2025». Как член *EU AI Alliance*, автор предложил платформу НСИ «Человек-машина» в качестве ключевой части транснационального проекта Россия-ЕС. Чтобы сформировать умное и устойчивое будущее, мир должен инвестировать в НСИ, поскольку парадигма Транс-ИИ - это путь к инклюзивному, оснащённому инструментами, взаимосвязанному и интеллектуальному миру.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, машинный интеллект, машинное обучение, Транс-ИИ.

**Цитирование:** Абдуллаев, А.Ш. Транс-ИИ: как создать настоящий искусственный интеллект / А.Ш. Абдуллаев // *Онтология проектирования*. 2021; 11(4): 402-421. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-402-421.

## Список рисунков

- Рисунок 1 - Кривая Gartner в области искусственного интеллекта 2021 г.
- Рисунок 2 - Распространенные мифы об ИИ
- Рисунок 3 - Математические и статистические предметы в алгоритмах искусственного интеллекта
- Рисунок 4 - График знаний социальных сетей
- Рисунок 5 - Составная модель ИИ Google
- Рисунок 6 - Ландшафт узкого ИИ
- Рисунок 7 - От трансдисциплинарного ИИ к интеллектуальному миру
- Рисунок 8 - Пять приоритетных областей делают результаты исследований доступными через платформу *AI on-demand*

## Сведения об авторе

**Абдуллаев Азамат Шамсудинович** (1951 г.р.) к.ф.-м.н. (1988), д.филос.н (1989). Диссертация по философии была издана в виде книги «Введение в информационный мир» (1991), в которой впервые показана роль глобальной онтологии для построения (энциклопедических) интеллектуальных систем. С 1983 по 1991 год научный сотрудник Института научно-технической информации АН СССР и Государственного комитета по научно-технической информации. С 1993 года по настоящее время - директор бизнес-корпорации, занятой исследованиями и разработками *Computer Intelligence Framework*, позволяющими создать новый класс артефактов общества знаний: крупномасштабные интеллектуальные системы с энциклопедическими знаниями, общими рассуждениями и возможностями естественного языка, основанные на стандартной глобальной технологии онтологии и семантики. А. Абдуллаев основал компанию *EIS Encyclopedic Intelligent Systems Limited* на Кипре, чтобы внести свой вклад в мировой рынок интеллектуальных информационных технологий и участвовать в программах Европейского Союза по построению экономики, основанной на знаниях. Азамат Абдуллаев является создателем USECS, Универсальной стандартной системы классификации объектов, известной как «Всемирный справочник вещей». Scopus ID 56128889800. <https://futurium.ec.europa.eu/en/user/10596>. <https://www.igi-global.com/affiliate/azamat-abdoullaev/1192>, <https://www.linkedin.com/in/azamat-abdoullaev-335a0881/>. [ontopaedia@gmail.com](mailto:ontopaedia@gmail.com).

Поступила в редакцию 14.10.2021, после рецензирования 17.12.2021. Принята к публикации 21.12.2021.

## Интеллектуальные технические системы на основе фотоники\*

Н.В. Головастик<sup>1,2</sup>, П.С. Дорожкин<sup>3,4</sup>, В.А. Сойфер<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>3</sup> ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия

<sup>4</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

### Аннотация

Обсуждаются перспективы развития фотоники, показана значимость и актуальность проведения исследований в данной области. Раскрыт потенциал, которым обладает фотоника при ответе на социально-экономические вызовы цифровой трансформации. Продемонстрированы возможности, открывающиеся при внедрении устройств на основе фотоники в различных технических системах, предназначенных для повышения безопасности среды обитания и качества жизни человека. Рассмотрены структуры и устройства на базе фотоники для таких ключевых приложений как спектроскопия, аналоговые оптические вычисления, оптические нейронные сети. Указаны возможные приложения фотонных сенсоров и спектрометров нового типа, раскрыты их назначение и конкурентные преимущества. Рассмотрены сверхточные компактные фотонные спектрометры различных конфигураций. Обсуждаются преимущества аналоговых вычислителей перед традиционными электронными устройствами. Рассмотрены структуры нанофотоники, предназначенные для вычисления дифференциальных и интегральных операторов, показаны решения для задачи выделения контуров на изображении. Проанализирована концепция реализации искусственного интеллекта на платформе фотоники в виде оптических нейронных сетей. Рассмотрены структуры, состоящие из последовательности дифракционных элементов и основанные на принципе Гюйгенса-Френеля, а также структуры, состоящие из волноводов, взаимодействующих по принципу интерферометров Маха-Цендера. Приведена оценка мирового рынка фотоники, которая показывает, что фотоника прочно займёт своё место в индустрии будущего.

**Ключевые слова:** фотоника, интеллектуальные технические системы, спектрометрия, оптические вычисления, оптические нейронные сети.

**Цитирование:** Головастик, Н.В. Интеллектуальные технические системы на основе фотоники / Н.В. Головастик, П.С. Дорожкин, В.А. Сойфер // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.422-436. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-422-436.

### Введение. Фотоника и цифровая электроника

Фотоника — отрасль науки и технологии, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданием на их базе устройств различного назначения. На сегодняшний день становится понятно, что закон Мура, в одной из интерпретаций обещающий удвоение производительности процессоров каждые 18 месяцев, перестаёт выполняться по причине достижения объективных физических пределов транзисторов. Классической микроэлектронике всё сложнее обеспечить потребности современных стандартов передачи данных (5G+ и 6G), современных запросов вычислительных мощностей. По этой причине внимание научного сообщества вызывают альтернативные техноло-

\* Статья подготовлена по материалам доклада "Фотоника для умного дома и умного города", с которым 10.11.2021 года академик В.А. Сойфер выступил на конференции по искусственному интеллекту *AI Journey*. - <https://ssau.ru/news/19765-viktor-soyfer-prinyal-uchastie-v-mezhdunarodnoy-konferentsii-po-iskusstvennomu-intellektu-ai-journey>.

гические платформы, наиболее перспективными среди которых на сегодняшний день являются квантовые системы и системы на основе нанофотоники.

Неразрывная связь между цифровой электроникой и фотоникой возникла в середине 70-х годов прошлого века с появлением игровых видеоприставок, первых персональных компьютеров и вошла в новую фазу с появлением смартфонов и цифрового телевидения в середине 90-х. Создание компактных лазеров, развитие волоконно-оптической связи, появление всё более совершенных преобразователей оптических сигналов - это способствовало становлению фотоники и как фундаментальной науки, и как самостоятельной отрасли техники с огромным прикладным потенциалом.

Сейчас от фотоники ожидают решения более амбициозных задач. Интернету вещей (*IoT*), ограниченному возможностям *Wi-Fi*, требуются новые разработки в области волоконной оптики и систем оптической связи в свободном пространстве и *Li-Fi* (оптическая версия *Wi-Fi*). Глубокое обучение искусственного интеллекта невозможно без огромных вычислительных ресурсов, которые могут дать оптические вычисления. Оптическая связь в инфракрасном диапазоне и через *Li-Fi* может обеспечить высокоскоростное беспроводное соединение с очень малым числом ошибок. Энергоэффективные фотонные датчики станут основой для более совершенных систем *IoT*; собранная ими биометрия и оптическая информация, поможет сделать беспилотный транспорт ещё безопаснее, а Умные города ещё комфортнее. Разработка вычислительных устройств нанофотоники вызывает интерес не только в академическом сообществе, но и в коммерческой сфере. Так, собственные разработки в области кремниевой фотоники ведут компании *Intel* [1] и *IBM* [2].

В статье рассмотрено применение фотоники в интеллектуальных технических системах, предназначенных для повышения качества среды обитания в рамках концепции Умного дома и Умного города.

## 1 Фотоника и социально-экономические вызовы цифровой трансформации

Фотоника рассматривается как наиболее перспективное средство ответа на социально-экономические вызовы цифровой трансформации. На протяжении последних десятилетий растут объёмы генерируемой информации, источниками которой являются системы видеонаблюдения, системы *IoT*, автономный транспорт, цифровая медицина и др. Это приводит к тому, что большинство данных, сгенерированных в течение последнего десятилетия, никогда не были обработаны или проанализированы. Растут требования к безопасности и контролю качества среды обитания человека. Появляется необходимость использовать новые возможности мониторинга окружающего пространства для задач контроля окружающей среды, состояния продукции, контроля состояния и безопасности материалов и конструкций, разработки гибридных систем визуализации и слежения для автономного транспорта, робототехники и др. Выдвигаются новые требования к системам передачи данных: низкая латентность («мгновенный» отклик), высокая (абсолютная) защищённость каналов, универсальный доступ (по принципу «всегда и везде»), возможность безграничного масштабирования; к системам навигации и технического зрения: сантиметровая точность навигации и позиционирования, функционирование в отсутствие спутникового сигнала, наблюдение в расширенном спектральном диапазоне.

Возрастают требования по скоростям и объёмам передачи и обработке информации, связанные с тем, что электрические соединения не обеспечивают необходимый рост тактовых и несущих частот. Требуемые скорости передачи и обработки информации могут быть достигнуты только с применением фотоники, обеспечивающей безопасность, доступность и масштабирование (оптоволоконная, атмосферная и космическая связь). Фотоника – основная

«поддерживающая» технология для обеспечения целевых характеристик беспроводных сетей будущего. Фотоника начинает дополнять электронику при скоростной передаче данных на уровне электронных микросхем и отдельных чипов. Замена электрических каналов связи на оптические приводит к: уменьшению потерь и энергопотребления, уменьшению веса и стоимости, повышению устойчивости к воздействию внешнего электромагнитного излучения (ударам молнии и другим мощным электрическим воздействиям, что актуально для управления инженерными сооружениями, такими как Умный дом или самолёт).

Для «очувствления» роботов требуются сенсоры новых типов, к которым выдвигаются повышенные требования: использование новых спектральных диапазонов (ближний и дальний инфракрасный, терагерцовый и др.), высокая чувствительность (точность идентификации вплоть до одной молекулы примеси, точность позиционирования до десятков сантиметров при спутниковой навигации), дистанционность (работоспособность на расстоянии километров до объекта), миниатюрность (размер сенсора до  $1 \times 1$  мкм), доступность (стоимость несколько евро за матрицу сенсоров).

## 2 Повышение безопасности среды обитания и качества жизни

Важным и перспективным применением фотоники в рамках концепции Умного города могут стать системы уличного освещения, совмещающие в себе функции интеллектуального освещения (освещения с управляемой формой и спектральным составом), атмосферной оптической связи для обмена информацией, системы мультиспектральной визуализации в различных диапазонах спектра (видимый, инфракрасный, терагерцовый), системы сенсоров для наблюдения за окружающей средой, системы слежения за пешеходами и трафиком, передачи опорного сигнала для систем сверхточной навигации, технологии *IoT* для сбора, передачи и анализа получаемой информации.

Наиболее распространённым и перспективным подходом для решения прикладных задач повышения качества жизни является применение сенсоров и датчиков, основанных на методах оптической спектроскопии. Применение расширенного спектрального диапазона позволяет детектировать объекты, не видимые человеческому глазу. Методы оптической спектроскопии позволяют, в частности, надёжно определять наличие и концентрацию веществ в смесях без необходимости добавления специальных веществ-меток. Идентификация веществ посредством спектроскопии нашла широкое практическое применение при обеспечении безопасности (идентификация взрывоопасных примесей в порошках, жидкостях, атмосфере, выявление загрязнений окружающей среды), в фармацевтике и здравоохранении (ранняя диагностика заболеваний, определение патологических тканей), контроле качества продуктов питания и промышленных товаров (анализ качества лакокрасочных покрытий, моторного топлива), сельском хозяйстве (анализ отклонений в составе плодов и листьев, раннее обнаружение заболеваний), в криминалистике (анализ состава вещества и наличия малых примесей) и др. [3-5].

Эффективные аналитические системы внелабораторного анализа состава веществ в твёрдой, жидкой и газообразной формах в реальном времени являются основным инструментом оценки состояния и угроз окружающей среды, здоровья человека и протекания технологических и природных процессов.

Для решения перечисленных задач необходима портативная мульти- и гиперспектральная аппаратура. Технологии интегральной фотоники позволяют радикально снизить стоимость и массогабаритные характеристики, а также расширить область применения технологий оптической сенсорики и спектроскопии.

### 3 Спектрометры на основе фотоники

При создании спектрометрических систем возникает задача разделения входящего излучения на большое число спектральных каналов, т.е. одновременной фильтрации большого числа длин волн. Распространённым подходом к решению данной задачи являются схемы Дайсона [6] и Оффнера [7]. Главным недостатком структур на их основе являются громоздкость и сложность в изготовлении, что приводит к необходимости создания гиперспектрометров на основе элементов нанофотоники.

В последние годы был предложен ряд реализаций устройств указанного типа на основе массивов интегральных волноводов [8, 9], нерезонансных дифракционных решёток эшелле (от фр. *échelle* – лестница) [10], фотонных кристаллов на основе суперпризм [11], микрорезонаторов [12], фильтров на основе резонаторов Фабри-Перо [13], фильтров на основе плазмонных решёток [14], слоистых структур с клиновидными слоями [15-19].

Другим перспективным классом структур для спектральной фильтрации являются цифровые планарные голограммы, интегрированные в двумерный волновод [20-24]. Цифровые планарные голограммы обладают хорошими рабочими характеристиками, однако крайне сложны в изготовлении.

В большинстве других подходов для спектрального анализа используются фильтры в виде «дискретного» набора резонансных структур (конечных «сегментов» дифракционных решёток, систем однородных слоёв или отдельных резонаторов) с различными фиксированными резонансными частотами. Получение различных резонансных частот достигается за счёт выбора геометрических параметров фильтра, в частности, периода сегмента дифракционной решётки, толщины одного из слоёв многослойной структуры или резонатора. Именно к этому классу структур относятся спектрометры на основе метаповерхностей, достаточно активно изучаемые в последнее время [25-27]. Количество спектральных каналов определяется числом резонансных структур, составляющих фильтр, что приводит к необходимости соблюдения баланса между спектральным разрешением, шириной рабочего диапазона и размером фильтра. Это существенно ограничивает практическое применение указанных спектральных фильтров. Также следует отметить высокую сложность изготовления массивов резонаторов (метаповерхностей).

Перспективным подходом к созданию спектральных фильтров, позволяющих осуществлять фильтрацию многих различных длин волн в различных областях фильтра, является использование резонансных дифракционных решеток, у которых один или несколько параметров меняются в «плоскости фильтра» (например, в направлении периодичности решётки или в направлении, перпендикулярном ему). В качестве изменяющегося параметра используется период дифракционной решётки [28, 29], толщина волноводного слоя [30-32], толщина дифракционной решётки [33, 34], скважность решётки [35]. В некоторых работах изменяются одновременно два параметра: период и толщина волноводного слоя [36-39]; период и высота решётки [40]. Большинство исследованных структур осуществляют фильтрацию в видимом диапазоне спектра, при этом ширина рабочего диапазона в разных работах варьируется от 21 до 400 нм. Такие структуры являются компактными, поскольку состоят из одного или двух (решётка и волноводный слой) слоёв. Они просты и дешёвы в изготовлении, их создание основано на сравнительно простых методах интерференционной литографии и травления ионным пучком с маской. В большинстве указанных работ дифракционные решётки с изменяющимися параметрами предлагаются в качестве фильтрующих элементов компактных планарных спектрометров. Такие структуры перспективны для применения в качестве датчиков показателя преломления [41, 42], биосенсоров [35, 38] и датчиков крутящего момента [43].

Для решения задачи интеграции с существующими устройствами в Самарском университете создан сверхкомпактный гиперспектрометр-насадка на камеру смартфона [44] (см. рисунок 1). Для разделения длин волн в нём используется схема Оффнера, при этом приёмником служит цифровая матрица камеры мобильного устройства. Созданное устройство работает в широком диапазоне длин волн (0,4–1,05 мкм), обладает спектральным разрешением 5 нм и 128 спектральными каналами. При таких характеристиках гиперспектрометр компактен (размеры изделия 10x10x20 мм, масса 0,03 кг), энергоэффективен (энергопотребление 0,5 Вт) и сравнительно прост и дешёв в производстве. Главным преимуществом данного устройства является совместимость с камерой смартфона, что может позволить существенно ускорить внедрение практики гиперспектрального анализа для различных бытовых приложений в повседневную жизнь. Разработанный мобильный гиперспектрометр может быть модифицирован для использования на космических и в беспилотных летательных аппаратах.



Рисунок 1 – Сверхкомпактный изображающий гиперспектрометр на базе смартфона

#### 4 Аналоговые оптические вычисления

Одним из первых значимых примеров полностью оптической обработки информации является четырёхфокусная схема Фурье-коррелятора, впервые предложенная в 1964 году [45]. Аналоговые оптические вычисления на основе Фурье-коррелятора активно развивались в 1980-е годы, поскольку могли мгновенно осуществить заданное преобразование над падающим сигналом [46]. Однако широкого распространения подобные схемы не получили ввиду громоздкости системы. Прорыв произошёл в 2014 году, когда была предложена структура для аналогового оптического дифференцирования, подобная Фурье-коррелятору, в которой использованы компактные градиентные линзы [47]. Размер такой структуры составляет десятки длин волн, то есть на порядки меньше, чем размеры двухлинзовых схем.

В настоящее время основным направлением развития аналоговых оптических вычислений является создание в дополнение к электронным компьютерам «сопроцессоров», ориентированных на сверхбыстрое решение ряда конкретных задач. Среди задач, которые эффективно и успешно решаются с помощью оптических вычислителей, можно отнести аналоговое дифференцирование, интегрирование, решение дифференциальных и интегральных уравнений, оптическая реализация преобразования Фурье и операций свёртки, а также оптические нейронные сети. К преимуществам аналоговой оптической обработки информации можно отнести возможность производить вычисления со скоростью света, более широкий доступный спектральный диапазон, отсутствие тепловых потерь, отсутствие электромагнитных помех, возможность параллельной обработки, а также возможность обработки комплексных данных (за счёт использования амплитуды и фазы электромагнитной волны).

Ранее были предложены нанопотонные структуры для аналогового оптического решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка с правой частью (с использованием оптических волноводов с прямоугольным сечением и кольцевых микрорезонаторов) [48], для решения интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода (с использованием интерференционной камеры и зацикленных волноводов) [49], а также для выполнения дискретного преобразования Фурье сигнала, распространяющегося в волноводе (с использо-

ванием линзы в свободном пространстве и интерферометров Маха-Цендера для вывода излучения из волновода и ввода в волновод) [50]. Преимущество подобных устройств заключается в том, что они выполнены в геометрии «на чипе», что существенно уменьшает их форм-фактор и упрощает интеграцию с электронными компонентами.

В качестве нанопотонных структур для операций дифференцирования и интегрирования оптического сигнала, распространяющегося в плоскости плоскопараллельного волновода, предложены простые структуры в виде выемок и ступенек на поверхности плоскопараллельного волновода (см. рисунок 2). В частности, структура, состоящая из двух параллельных прямоугольных выемок, позволяет осуществлять дифференцирование отражённого сигнала [51]. Данный эффект достигается за счёт резонансного возбуждения собственной моды в центральной ступеньке. Структура, представляющая собой прямоугольную ступеньку на поверхности плоскопараллельного волновода, позволяет выполнять операцию интегрирования отражённого сигнала [52]. Данный эффект связан с возбуждением кросс-поляризованной моды ступеньки, приводящим к резонансному эффекту, известному как связанное состояние в континууме. Обе указанные структуры могут также работать на пропускание, выполняя обратные операции: интегрирование и дифференцирование, соответственно.

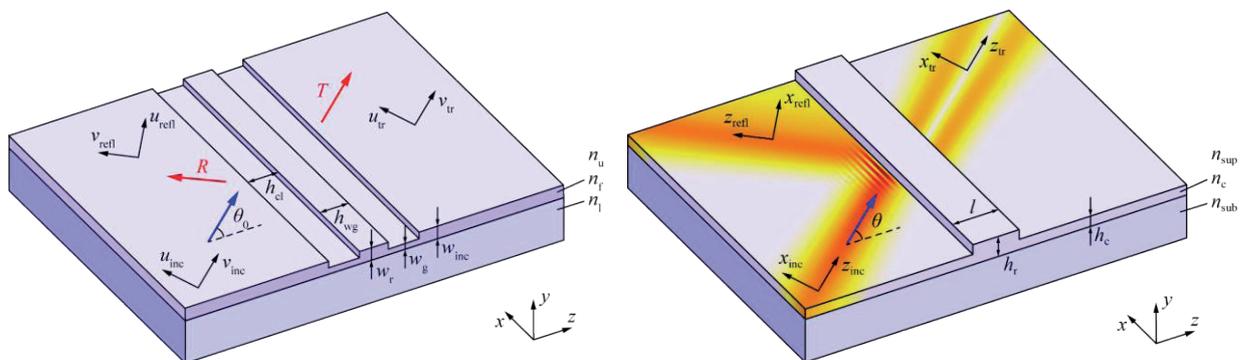


Рисунок 2 – Примеры планарных структур для оптического дифференцирования и интегрирования

Важной задачей аналоговой обработки информации является выделение контуров на изображении, которое можно осуществить, расположив дифференцирующую структуру на пути распространения оптического пучка. Для этих целей были предложены фотонные структуры, представляющие собой массив нанорезонаторов [53], а также структуры, принцип действия которых основан на плазмонном резонансе [54] или эффекте Брюстера [55] (см. рисунок 3).

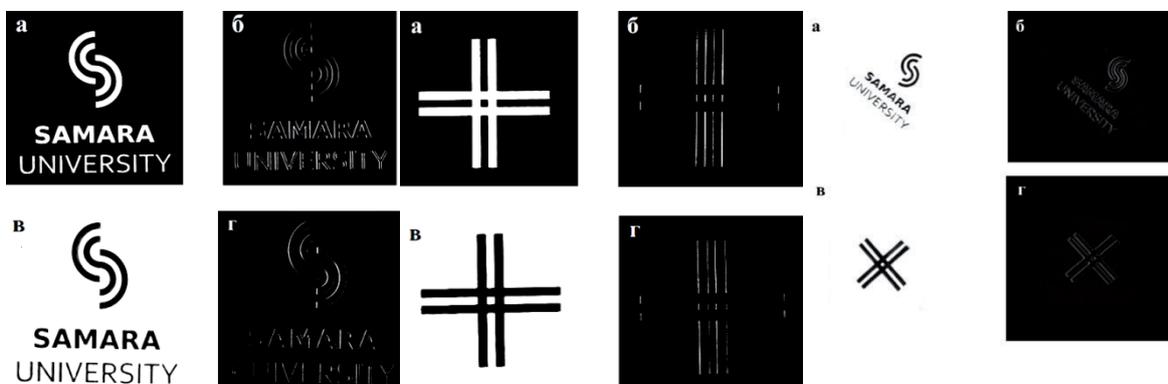


Рисунок 3 – Выделение контуров на изображении с использованием эффекта Брюстера:  
(а, в) – оригинальные изображения; (б, г) – изображения после преобразования

## 5 Оптические нейронные сети

Искусственные нейронные сети – вычислительные модели, имитирующие некоторые принципы работы биологических нейронов – позволили совершить рывок во многих задачах машинного обучения, таких как распознавание речи и изображений, задачи классификации и прогнозирования. Важным ограничением таких систем является высокая вычислительная сложность при выполнении вычислений на классической машине фон Неймана. Это приводит к поискам новых технологических подходов, которые позволят осуществлять работу нейронных сетей быстрее и эффективнее, в частности с использованием графических процессоров или полупроводниковых схем специального назначения. Отдельно необходимо отметить развивающиеся направления гибридных оптоэлектронных систем, основанных на обработке оптических импульсов [56] или резервуарных вычислениях [57]. В данной статье рассматривается направление, связанное с полностью оптическими нейронными сетями глубокого обучения, которое предлагает принципиально новую парадигму.

Оптические нейронные сети представляют структуру нанофотоники, имитирующую многослойный перцептрон. С большим интересом научным сообществом была встречена работа, в которой предложена структура, состоящая из набора последовательно расположенных дифракционных элементов, каждый из которых соответствует слою многослойной нейросети, а каждый пиксель на элементе – отдельному нейрону [58]. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждый такой пиксель можно считать центром излучения вторичных волн, амплитуда и фаза которых определяется произведением суммы падающих на этот пиксель волн и его комплексного коэффициента отражения или пропускания. Таким образом, каждый из нейронов соединён со всеми нейронами предыдущего слоя посредством падающего излучения и со всеми нейронами следующего слоя посредством излучаемых вторичных волн. При этом вклад нейрона определяется его комплексным коэффициентом пропускания, который задаётся в процессе обучения нейросети вариацией метода обратного распространения ошибки. На основе такого подхода была создана оптическая нейронная сеть, каждый слой которой представлял собой метаповерхность с пикселями разной толщины и которая успешно решала задачу классификации рукописных цифр [58]. По тому же принципу была смоделирована нейронная сеть, интегрированная на чипе, каждый слой которой представлял собой слоты в поверхности волновода. Такая сеть была использована для решения задачи диагностики коронарной болезни сердца [59].

Альтернативной платформой для оптических нейронных сетей могут служить интегрированные на чипе фотонные интегральные сети из волноводов, взаимодействующих друг с другом по принципу интерферометров Маха-Цендера [60]. При данном подходе каждый блок из набора интерферометров позволяет осуществить операцию матричного умножения (базовую операцию искусственной нейронной сети), а добавление между этими блоками нелинейных элементов обеспечивает нелинейную функцию активации нейронов. Исполненная таким образом нейронная сеть позволила успешно решить задачи классификации гласных звуков [60].

При таком подходе обучение оптической нейронной сети происходит на стадии компьютерного моделирования и расчёта параметров фотонной структуры. После этого созданная оптическая нейронная сеть будет выполнять предписанную задачу со скоростью света без выделения тепла и необходимости в дополнительном питании, что является неоспоримым преимуществом перед электронными аналогами.

Широкий спектр возможностей открывается в случае, если на вход подобной нейронной сети подаётся мультиспектральное излучение (см. рисунок 4). За счёт усложнения и вариативности анализа, который может быть осуществлён над спектром, подобное устройство

может быстро и эффективно решать задачи в области обеспечения безопасности и повышения качества жизни человека.

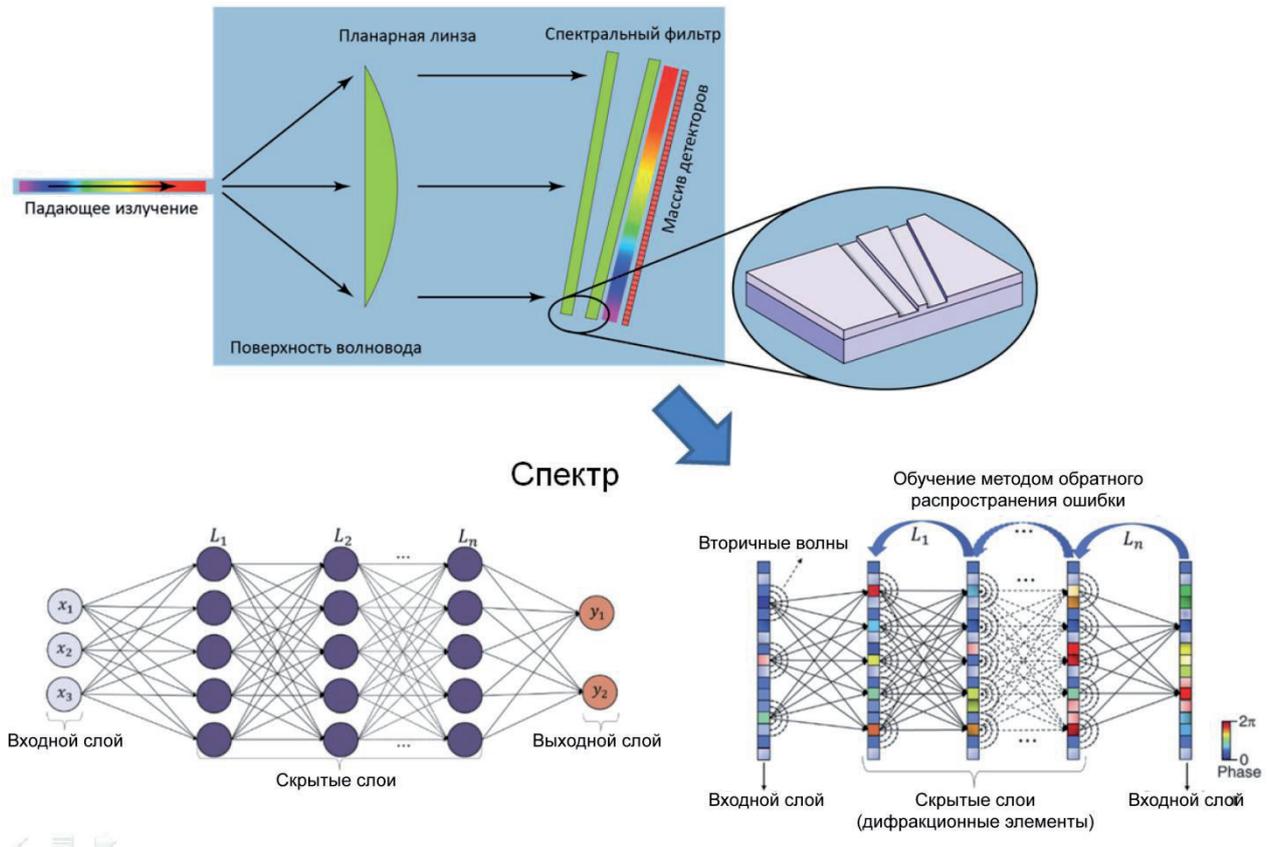


Рисунок 4 – Концепция интеллектуальной системы, состоящей из планарного спектрометра и оптической нейронной сети

## 6 Заключение. Рынок фотоники

Несмотря на то, что фотоника не имеет такой мощной производственной основы и универсальной компонентной базы, как электроника, уже сейчас международное сообщество SPIE (*Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*) оценивает объём мирового рынка фотоники в 2,02 трлн. долларов (см. рисунок 5) [61]. И большая часть этого рынка – чрезвычайно конкурентные потребительские технологии и сфера развлечений. Сферы обороны и безопасности, идущие следом, обеспечивают лишь шестую часть спроса. Это наглядно демонстрирует, что фотоника, как технология 21-го века, будет развиваться по иным законам, нежели электроника в веке 20-ом. Каждый Умный дом, контролируемый оптическими датчиками, каждый Умный город, покрытый комплексом беспроводных оптических сетей, каждый Умный автомобиль будут собирать невидимые глазу данные и обрабатывать их со скоростью света, принимая всё более совершенные решения. Фотоника имеет потенциал повсеместного распространения, и в данной статье рассмотрены лишь некоторые из наиболее перспективных отраслей.

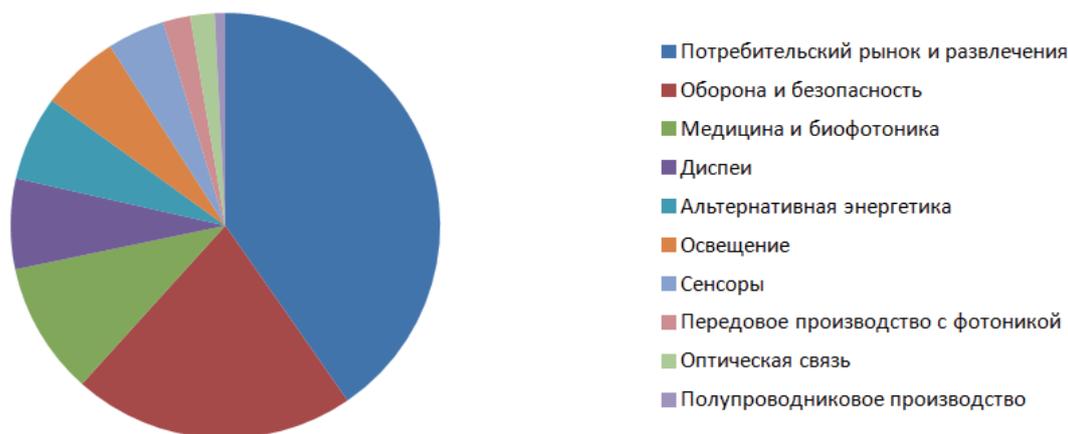


Рисунок 5 – Исследование SPIE мирового рынка фотоники [61]

## Благодарности

Работа выполнена благодаря финансированию Минобрнауки России новых лабораторий под руководством молодых ученых в рамках нацпроекта «Наука и университеты» (проект FSSS-2021-0016) в лаборатории «Фотоника для умного дома и умного города» Самарского университета.

## Список источников

- [1] *Intel*. Официальный сайт. – <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/architecture-and-technology/silicon-photonics/silicon-photonics-overview.html>.
- [2] *IBM*. Официальный сайт. – <https://www.zurich.ibm.com/st/photonics/optics.html>.
- [3] **Elosua, C.** Volatile Organic Compound Optical Fiber Sensors: A Review / C. Elosua, I. R. Matias, C. Barriain, F. J. Arregui // *Sensors*. 2006. Vol. 6(11).
- [4] **Petibois, C.** Chemical Mapping of Tumor Progression by FT-IR Imaging: Towards Molecular Histopathology / C. Petibois, G. Deleris // *Trends Biotechnol.* 2016. Vol. 24. P.455–462.
- [5] **Ragai, J.** The Scientific Detection of Forgery in Paintings / J. Ragai // *Proc. Am. Philos. Soc.* 2013. Vol.157. P.164–175.
- [6] **Montero-Orille, C.** Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept / C. Montero-Orille, X. Prieto-Blanco, H. GonzalezNunez, R. de la Fuente // *Applied Optics*. 2011. Vol. 50(35). P.6487-6494.
- [7] **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. 2015. Т.39, № 2. С.211-217.
- [8] **Yebo, N.** On-Chip Arrayed Waveguide Grating Interrogated Silicon-on-Insulator Microring Resonator-Based Gas Sensor / N. Yebo, W. Bogaerts, Z. Hens, and R. Baets // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2011. Vol. 23. P.1505–1506.
- [9] **Gatkine, P.** Arrayed waveguide grating spectrometers for astronomical applications: new results / P. Gatkine, S. Veilleux, Y. Hu, J. Bland-Hawthorn, M. Dagenais // *Opt. Express*. 2017. Vol.25. P.17918–17935.
- [10] **Ma, X.** Passive Coherent Polarization Beam Combination of a Four-Fiber Amplifier Array / X. Ma, M. Li, and J. He // *IEEE Photon. J.* 2013. Vol.5. 7101307 (8 pp.).
- [11] **Momeni, B.** Integrated photonic crystal spectrometers for sensing applications / B. Momeni, E. S. Hosseini, M. Askari, M. Soltani, A. Adibi // *Opt. Commun.* 2009. Vol.282. P.3168–3171.
- [12] **Xia, Z.** High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators / Z. Xia, A. A. Eftekhar, M. Soltani, B. Momeni, Q. Li, M. Chamanzar, S. Yegnanarayanan, and A. Adibi // *Opt. Express*. 2011. Vol.19. P.12356–12364.
- [13] **Wang, S.-W.** Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array / S.-W. Wang, C. Xia, X. Chen, W. Lu, M. Li, H. Wang, W. Zheng, and T. Zhang // *Opt. Lett.* 2007. Vol.32. P. 632–634.
- [14] **Li, E.** Broadband on-chip near-infrared spectroscopy based on plasmonic grating filter array / E. Li, X. Chong, F. Ren, and A.X. Wang // *Opt. Lett.* 2016. Vol.41. P.1913–1916.

- [15] **Emadi, A.** Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter / A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, and R. Wolffenbuttel // *Opt. Express*. 2012. Vol.20. P.489–507.
- [16] **Ayerden, N.P.** Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter / N. P. Ayerden, G. de Graaf, and R. F. Wolffenbuttel // *Opt. Express*. 2016. Vol.24. P.2981–3002.
- [17] **Emadi, A.** Linear variable optical filter-based ultraviolet microspectrometer / A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, P. Enoksson, J. H. Correia, and R. Wolffenbuttel // *Appl. Opt.* 2012. Vol.51. P.4308–4315.
- [18] **Hendrix, K.** Linear variable filters for NASA’s OVIRS instrument: pushing the envelope of blocking / K. Hendrix // *Appl. Opt.* 2017. Vol.56. P.201–205.
- [19] **Sheng, B.** Linear variable filters fabricated by ion beam etching with triangle-shaped mask and normal film coating technique / B. Sheng, P. Chen, C. Tao, R. Hong, Y. Huang, and D. Zhang // *Chin. Opt. Lett.* 2015. Vol.13. 122301 (4 pp.).
- [20] **Calafiore, G.** Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy / G. Calafiore, A. Koshelev, S. Dhuey, A. Goltsov, P. Sasorov, S. Babin, V. Yankov, S. Cabrini, and C. Peroz // *Light: Science & Applications*. 2014. Vol.3. e203 (7 pp.).
- [21] **Babin, S.** Digital optical spectrometer-on-chip / S. Babin, A. Bugrov, S. Cabrini, S. Dhuey, A. Goltsov, I. Ivonin, E.-B. Kley, C. Peroz, H. Schmidt, and V. Yankov // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol.95. 041105 (3 pp.).
- [22] **Peroz, C.** Multiband wavelength demultiplexer based on digital planar holography for on-chip spectroscopy applications / C. Peroz, C. Calo, A. Goltsov, S. Dhuey, A. Koshelev, P. Sasorov, I. Ivonin, S. Babin, S. Cabrini, and V. Yankov // *Opt. Lett.* 2012. Vol.37. P. 695–697.
- [23] **Peroz, C.** High-resolution spectrometer-on-chip based on digital planar holography / C. Peroz, A. Goltsov, S. Dhuey, P. Sasorov, B. Harteneck, I. Ivonin, S. Kopyatev, S. Cabrini, S. Babin, and V. Yankov // *IEEE Photonics Journal*. 2011. Vol.3. P.888–896.
- [24] **Mossberg, T.** Planar holographic optical processing devices / T. Mossberg // *Opt. Lett.* 2001. Vol. 26. P.414–416.
- [25] **Faraji-Dana, M.** Compact folded metasurface spectrometer / M. Faraji-Dana, E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, H. Kwon, and A. Faraon // *Nature Communications*. 2018. Vol.9. 4196 (8 pp.).
- [26] **Zhu, A.Y.** Compact Aberration Corrected Spectrometers in the Visible Using Dispersion Tailored Metasurfaces / A.Y. Zhu, W.T. Chen, J. Sisler, K.M.A. Yousef, E. Lee, Y.W. Huang, C.W. Qiu, and F. Capasso // *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol.7. 1801144 (8 pp.).
- [27] **Ding, F.** Beam-size-invariant spectropolarimeters using gap-plasmon metasurfaces / F. Ding, A. Pors, Y. Chen, V.A. Zenin, and S.I. Bozhevolnyi // *ACS Photonics*. 2017. Vol.4(4). P.943–949.
- [28] **Hsu, H.-Y.** A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer / H.-Y. Hsu, Y.-H. Lan, and C.-S. Huang // *IEEE Photonics Journal*. 2018. Vol.10(1). 4500109 (10 pp.).
- [29] **Liu, L.** A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters / L. Liu, H.A. Khan, J. Li, A.C. Hillier, and M. Lu // *Nanotechnology*. 2016. Vol.27(29). 295301 (6 pp.).
- [30] **Hsiung, C.T.** Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter / C.T. Hsiung and C.-S. Huang // *IEEE Sensors Letters*. 2018. Vol.2(4). P.1–4.
- [31] **Sheng, B.** Tunable and polarization-independent wedged resonance filter with 2D crossed grating / B. Sheng, H. Zhou, C. Tao, A. Zahid, Z. Ni, Y. Huang, R. Hong, D. Zhang // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2016. Vol.28(20). P.2211–2214.
- [32] **Yang, J.-M.** Gradient waveguide thickness guided-mode resonance biosensor / J.-M. Yang, N.-Z. Yang, C.-H. Chen and C.-S. Huang // *Sensors*. 2021. Vol.21(2). 376 (12 pp.).
- [33] **Dobbs, D.W.** Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal / D. W. Dobbs, I. Gershkovich, and B. T. Cunningham // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol.89. 123113 (3 pp.).
- [34] **Ganesh, N.** Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter / N. Ganesh, A. Xiang, N. B. Beltran, D. W. Dobbs, and B. T. Cunningham // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol.90. 081103 (3 pp.).
- [35] **Triggs, G.J.** Chirped guided-mode resonance biosensor / G.J. Triggs, Y. Wang, C.P. Reardon, M. Fischer, G.J.O. Evans, and T.F. Krauss // *Optica*. 2017. Vol.4(2). P.229–234.
- [36] **Qian, L.** Non-homogeneous composite GMR structure to realize increased filtering range / L. Qian, K. Wang, G. Wu, L. Zhu, C. Han, and C. Yan // *Opt. Express*. 2018. Vol.26(18). P.23602–23612.
- [37] **Ko, Y.H.** Resonant filters with concurrently tuned central wavelengths and sidebands / Y.H. Ko, N. Gupta, and R. Magnusson // *Opt. Lett.* 2020. Vol.45(21). P.6046–6049.
- [38] **Yang, N.-Z.** Biosensor based on two-dimensional gradient guided-mode resonance filter / N.-Z. Yang, C.-T. Hsiung, C.-S. Huang // *Optics Express*. 2021. Vol.29(2). P.1320–1332.
- [39] **Hung, Y.-J.** Optical spectrometer based on continuously-chirped guided mode resonance filter / Y.-J. Hung, C.-W. Kao, T.-C. Kao, C.-W. Huang, J.-J. Lin, and C.-C. Yin // *Opt. Express*. 2018. Vol.26. P.27515–27527.
- [40] **Fang, C.** Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge / C. Fang, B. Dai, Z. Li, A. Zahid, Q. Wang, B. Sheng, and D. Zhang // *Optics Letters*. 2016. Vol.41. P. 5302–5305.

- [41] **Hsiung, C.T.** Refractive index sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance / C.T. Hsiung and C.-S. Huang // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2019. Vol.31(3). P.253–256.
- [42] **Hsiung, C.T.** Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter / C.T. Hsiung and C.-S. Huang // *IEEE Sensors Letters*. 2018. Vol.2(4). P.1–4.
- [43] **Wang, Y.-C.** Lightweight torque sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance filter / Y.-C. Wang, W.-Y. Jang, and C.-S. Huang // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol.19(16). P.6610–6617.
- [44] **Бланк, В.А.** Изображающий гиперспектрометр – насадка / В.А. Бланк, Р.В. Скиданов // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара: Новая техника, 2017. С.253–255.
- [45] **Lugt, A.V.** Signal detection by complex spatial filtering / A.V. Lugt // *IEEE Trans. Inf. Theory*. 1964. Vol.10(2). P.139-145.
- [46] **Weiner, A.M.** Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators / A.M. Weiner // *Rev. Sci. Instr.* 2000. Vol.71. P.1929–1960.
- [47] **Silva, A.** Performing mathematical operations with metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // *Science*. 2014. Vol.343. P.160–163.
- [48] **Tan, S.** High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators / S. Tan, L. Xiang, J. Zou, Q. Zhang, Z. Wu, Y. Yu, J. Dong, X. Zhang // *Optics Letters*. 2013. Vol.38. P.3735–3738.
- [49] **Estakhri, N.M.** Inverse-designed metastructures that solve equations / N.M. Estakhri, B. Edwards, N. Engheta // *Science*. 2019. Vol.363. P.1333–1338.
- [50] **Cottle E. et al.**, [White paper] Optalysys Ltd. <https://optalysys.com/white-papers>.
- [51] **Doskolovich, L.L.** Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, and V.A. Soifer // *Opt. Express*. 2017. Vol.25. P.22328–22340.
- [52] **Bezus, E.A.** Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, and V.A. Soifer // *Opt. Express*. 2018. Vol.26. P.25156–25165.
- [53] **Zhou, Y.** Flat optics for image differentiation / Y. Zhou, H. Zheng, I.I. Kravchenko, J. Valentine // *Nat. Photon.* 2020. Vol.14. P.316–323.
- [54] **Zhu, T.** Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhu, Y. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // *Nature Communications*. 2017. Vol.8. 15391 (5 pp.).
- [55] **Нестеренко, Д.В.** Оптическое дифференцирование на основе эффекта Брюстера / Нестеренко Д.В., Колесникова М.Д., Любарская А.В. // *Компьютерная оптика*. 2018. Т.42(5). С.758-763.
- [56] **Prucnal, P.R.** Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing / P.R. Prucnal, B.J. Shastri, T.F. de Lima, M.A. Nahmias & A.N. Tait // *Adv. Opt. Phot.* 2016. Vol.8. P.228–299.
- [57] **Vandoorne, K.** Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip / K. Vandoorne, P. Mechet, T.V. Vaerenbergh, M. Fiers, G. Morthier, D. Verstraeten, B. Schrauwen, J. Dambre, P. Bienstman // *Nat. Commun.* 2014. Vol.5. 3541 (6 pp.).
- [58] **Lin, X.** All-optical machine learning using diffractive deep neural networks / X. Lin, Y. Rivenson, N.T. Yardimci, M. Veli, Y. Luo, M. Jarrahi, A. Ozcan // *Science*. 2018. Vol.361. P.1004-1008.
- [59] **Fu, T.** On-chip photonic diffractive optical neural network based on a spatial domain electromagnetic propagation model / T. Fu, Y. Zang, H. Huang, Z. Du, C. Hu, M. Chen, S. Yang, H. Chen // *Optics Express*. 2021. Vol.29. P.31924-31940.
- [60] **Shen, Y.** Deep learning with coherent nanophotonic circuits / Y. Shen, N. Harris, S. Skirlo et al. // *Nature Photon.* 2017. Vol.11. P.441–446.
- [61] SPIE. Official website. 2020 Optics and Photonics Industry Report (Fall Update) URL: <https://spie.org/news/2020-optics-and-photonics-industry-report>.

## Сведения об авторах



**Головастиков Никита Владимирович**, 1991 г. рождения. Окончил Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (2014), к.ф.-м.н. (2018). Заведующий научно-исследовательской лабораторией «Фотоника для умного дома и умного города» Самарского университета. Доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Специалист в области оптики и фотоники. ORCID: 0000-0002-0123-252X; Author ID (RSCI): 724573; Author ID (Scopus): 55292665900; Researcher ID (WoS): A-5556-2014. [golovastikov.nv@ssau.ru](mailto:golovastikov.nv@ssau.ru).

**Дорожкин Павел Сергеевич**, 1977 г. рождения. Окончил Московский физико-технический институт (1999), к.ф.-м.н. (2004). Заместитель руководителя Департамента квантовых коммуникаций ОАО "РЖД". Профессор Сколковского института науки и технологий. Специалист в области прикладных оптики и фотоники. Author ID (RSCI): 35101; Author ID (Scopus): 6701841337. [P.Dorozhkin@skoltech.ru](mailto:P.Dorozhkin@skoltech.ru).



**Сойфер Виктор Александрович**, 1945 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт им. С.П. Королева (1968), д.т.н. (1981), профессор (1983), академик РАН (2016), президент Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Член Международного оптического общества (SPIE), член правления Международной ассоциации распознавания образов (IAPR), член Межведомственного совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники. В списке научных трудов 700 работ. Author ID (RSCI): 3028; Author ID (Scopus): 36836834300; Researcher ID (WoS): C-3088-2017. [soifer@ssau.ru](mailto:soifer@ssau.ru)

Поступила в редакцию 20.11.2021, после рецензирования 20.12.2021. Принята к публикации 22.12.2021.

## Intelligent systems based on photonics\*

N.V. Golovastikov<sup>1,2</sup>, S.P. Dorozhkin<sup>3,4</sup>, V.A. Soifer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov), Samara, Russia

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of RAS, Samara, Russia

<sup>3</sup> Russian Railways, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

### Abstract

This paper discusses the prospects of photonics, shows the relevance and applicability of photonics research. The potential of photonics technologies to answer the socio-economic challenges of the digital transformation age is revealed. Opportunities that emerge with the introduction of photonic devices to various technical systems designed for environmental protection and quality of life improvement are demonstrated. Concrete photonics structures and devices for such key applications as spectroscopy, analog optical calculations, and optical neural networks are closely examined. Possible applications for photonic sensors and new type spectrometers are outlined, their competitive advantages explored. Various geometries of extra fine compact photonic spectrometers are presented: based on digital planar diagrams, integrated into the photonic waveguides, metasurfaces, diffraction gratings with varying parameters. The benefits of analog optical computations against conventional electronic devices are discussed. Various nanophotonic structures designed for differential and integral operators are studied, solutions for edge detection are proposed. The concept for artificial intelligence implementation on the photonics platform using optical neural networks is analyzed. Various solutions are examined: containing sequences of diffraction elements and based on Huygens–Fresnel principle, as well as planar structures comprised of waveguides that interact as Mach–Zehnder interferometer. SPIE estimation of the international

\* The article was prepared based on the materials of the report "Photonics for a smart home and smart city", presented by Academician V.A. Soifer at the AI Journey conference. - <https://ssau.ru/news/19765-viktor-soyfer-prinyal-uchastie-v-mezhdunarodnoy-konferentsii-po-iskusstvennomu-intellektu-ai-journey>.

photonics market proposes that the peak of interest for this field is yet to be achieved and photonics will claim its place in the future technological landscape.

**Key words:** *photonics, intelligent systems, spectrometry, optical computing, optical neural networks.*

**Citation:** *Golovastikov NV, Dorozhkin PS, Soifer VA.* Intelligent systems based on photonics [In Russian]. *Ontology of designing.* 2021; 11(4): 422-436. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-422-436.

**Acknowledgment:** Work was conducted in the new laboratory led by young scientists supported by the Ministry of Science and Higher education of the Russian Federation as part of the national project "Science and Universities" (project FSSS-2021-0016) in the research laboratory "Photonics for smart home and smart city" in Samara University.

## List of figures

Figure 1 - Ultracompact imaging hyperspectrometer

Figure 2 - Examples of planar photonics structures for optical differentiation and integration

Figure 3 - Edge detection using Brewster effect: (a, b) - original images, (б, r) - images after transformation

Figure 4 - Concept of a smart system comprising a planar spectrometer and an optical neural network

Figure 5 - SPIE estimation of international photonics market value

## References

- [1] Intel. Official website. – <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/architecture-and-technology/silicon-photonics/silicon-photonics-overview.html>.
- [2] IBM. Official website. – <https://www.zurich.ibm.com/st/photonics/optics.html>.
- [3] **Elosua C, Matias IR, Barriain C, Arregui FJ.** Volatile Organic Compound Optical Fiber Sensors: A Review. *Sensors.* 2006; 6(11).
- [4] **Petibois C, Deleris G.** Chemical Mapping of Tumor Progression by FT-IR Imaging: Towards Molecular Histopathology. *Trends Biotechnol.* 2016; 24: 455–462.
- [5] **Ragai J.** The Scientific Detection of Forgery in Paintings. *Proc. Am. Philos. Soc.* 2013; 157: 164–175.
- [6] **Montero-Orille C, Prieto-Blanco X, GonzalezNunez H, de la Fuente R.** Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept. *Applied Optics.* 2011; 50(35): 6487-6494.
- [7] **Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI.** Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element [in Russian]. *Computer Optics.* 2015; 39(2): 211-217.
- [8] **Yebo N, Bogaerts W, Hens Z, Baets R.** On-Chip Arrayed Waveguide Grating Interrogated Silicon-on-Insulator Microring Resonator-Based Gas Sensor. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2011; 23: 1505–1506.
- [9] **Gatkine P, Veilleux S, Hu Y, Bland-Hawthorn J, Dagenais, M.** Arrayed waveguide grating spectrometers for astronomical applications: new results. *Optics Express.* 2017; 25: 17918–17935.
- [10] **Ma X, Li M, He J.** Passive Coherent Polarization Beam Combination of a Four-Fiber Amplifier Array. *IEEE Photon. J.* 2013; 5: 7101307 (8 pp.).
- [11] **Momeni B, Hosseini ES, Askari M, Soltani M, Adibi A.** Integrated photonic crystal spectrometers for sensing applications. *Opt. Commun.* 2009; 282: 3168–3171.
- [12] **Xia, Z, Eftekhari AA, Soltani M, Momeni B, Li Q, Chamanzar M, Yegnanarayanan S, Adibi A.** High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators. *Optics Express.* 2011; 19: 12356–12364.
- [13] **Wang S-W, Xia C, Chen X, Lu W, Li M, Wang H, Zheng W, Zhang T.** Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array. *Opt. Lett.* 2007; 32: 632–634.
- [14] **Li E, Chong X, Ren F, Wang AX.** Broadband on-chip near-infrared spectroscopy based on plasmonic grating filter array. *Optics Letters.* 2016; 41: 1913–1916.
- [15] **Emadi A, Wu H, de Graaf G, Wolffenbittel R.** Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter. *Opt. Express.* 2012; 20: 489–507.
- [16] **Ayerden NP, de Graaf G, Wolffenbittel RF.** Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter. *Optics Express.* 2016; 24: 2981–3002.
- [17] **Emadi A, Wu H, de Graaf G, Enoksson P, Correia JH, Wolffenbittel R.** Linear variable optical filter-based ultraviolet microspectrometer. *Appl. Opt.* 2012; 51: 4308–4315.
- [18] **Hendrix K.** Linear variable filters for NASA's OVIRS instrument: pushing the envelope of blocking. *Appl. Opt.* – 2017; 56: 201–205.

- [19] **Sheng B, Chen P, Tao C, Hong R, Huang Y, Zhang D.** Linear variable filters fabricated by ion beam etching with triangle-shaped mask and normal film coating technique. *Chin. Opt. Lett.* 2015; 13: 122301 (4 pp.).
- [20] **Calafiore G, Koshelev A, Dhuey S, Goltsov A, Sasorov P, Babin S, Yankov V, Cabrini S, Peroz C.** Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy. *Light: Science & Applications.* 2014; 3: e203 (7 pp.).
- [21] **Babin S, Bugrov A, Cabrini S, Dhuey S, Goltsov A, Ivonin I, Kley E.-B, Peroz C, Schmidt H, Yankov V.** Digital optical spectrometer-on-chip. *Appl. Phys. Lett.* 2009; 95: 041105 (3 pp.).
- [22] **Peroz C, Calo C, Goltsov A, Dhuey S, Koshelev A, Sasorov P, Ivonin I, Babin S, Cabrini S, Yankov V.** Multiband wavelength demultiplexer based on digital planar holography for on-chip spectroscopy applications. *Optics Letters.* 2012; 37: 695–697.
- [23] **Peroz C, Goltsov A, Dhuey S, Sasorov P, Harteneck B, Ivonin I, Kopyatev S, Cabrini S, Babin S, Yankov V.** High-resolution spectrometer-on-chip based on digital planar holography. *IEEE Photonics Journal.* 2011; 3: 888–896.
- [24] **Mossberg T.** Planar holographic optical processing devices. *Optics Letters.* 2001; 26: 414–416.
- [25] **Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, Kamali SM, Kwon H, Faraon A.** Compact folded metasurface spectrometer. *Nature Communications.* 2018; 9: 4196 (8 pp.).
- [26] **Zhu AY, Chen WT, Sisler J, Yousef KMA, Lee E, Huang YW, Qiu CW, Capasso F.** Compact Aberration Corrected Spectrometers in the Visible Using Dispersion Tailored Metasurfaces. *Advanced Optical Materials.* 2019; 7: 1801144 (8 pp.).
- [27] **Ding F, Pors A, Chen Y, Zenin VA, Bozhevolnyi SI.** Beam-size-invariant spectropolarimeters using gap-plasmon metasurfaces *ACS Photonics.* 2017; 4: 943–949.
- [28] **Hsu HY, Lan Y-H, Huang C-S.** A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer *IEEE Photonics Journal.* 2018; 10: 4500109 (10 pp.).
- [29] **Liu L, Khan HA, Li J, Hillier AC, Lu M.** A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters *Nanotechnology.* 2016; 27: 295301 (6 pp.).
- [30] **Hsiung CT, Huang C-S.** Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter *IEEE Sensors Letters.* 2018; 2: P. 1–4.
- [31] **Sheng B, Zhou H, Tao C, Zahid A, Ni Z, Huang Y, Hong R, Zhang D** Tunable and polarization-independent wedged resonance filter with 2D crossed grating *IEEE Photonics Technology Letters* 2016; 28: P. 2211–2214.
- [32] **Yang J-M, Yang N-Z, Chen C-H, Huang C-S.** Gradient waveguide thickness guided-mode resonance biosensor *Sensors.* 2021; 21: 376 (12 pp.).
- [33] **Dobbs DW, Gershkovich I, Cunningham BT.** Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal *Appl. Phys. Lett.* 2006; 89: 123113 (3 pp.).
- [34] **Ganesh N, Xiang A, Beltran NB, Dobbs DW, Cunningham BT.** Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter *Appl. Phys. Lett.* 2007; 90: 081103 (3 pp.).
- [35] **Triggs GJ, Wang Y, Reardon CP, Fischer M, Evans GJO, Krauss TF.** Chirped guided-mode resonance biosensor *Optica.* 2017; 4: 229–234.
- [36] **Qian L, Wang K, Wu G, Zhu L, Han C, Yan C.** Non-homogeneous composite GMR structure to realize increased filtering range *Optics Express.* 2018; 26: 23602–23612.
- [37] **Ko YH, Gupta N, Magnusson R.** Resonant filters with concurrently tuned central wavelengths and sidebands *Optics Letters* 2020; 45: 6046–6049.
- [38] **Yang N-Z, Hsiung C-T, Huang C-S.** Biosensor based on two-dimensional gradient guided-mode resonance filter *Optics Express.* 2021; 29: 1320–1332.
- [39] **Hung Y-J, Kao C-W, Kao T-C, Huang C-W, Lin J-J, Yin C-C.** Optical spectrometer based on continuously-chirped guided mode resonance filter *Optics Express.* 2018; 26: 27515–27527.
- [40] **Fang C, Dai B, Li Z, Zahid A, Wang Q, Sheng B, Zhang D.** Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge *Optics Letters.* 2016; 41: 5302–5305.
- [41] **Hsiung CT, Huang C-S.** Refractive index sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance *IEEE Photonics Technology Letters.* 2019; 31: 253–256.
- [42] **Hsiung CT, Huang C-S.** Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter *IEEE Sensors Letters.* 2018; 2: 1–4.
- [43] **Wang Y-C, Jang W-Y, Huang C-S.** Lightweight torque sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance filter *IEEE Sensors Journal.* 2019; 19: 6610–6617.
- [44] **Blank VA, Skidanov RV.** Attachable imaging spectrometer [in Russian]. Book of abstracts of III International conference and school «Information technologies and nanotechnologies» (ITNT-2017) Samara: New technology. 2017. P.253-255.
- [45] **Lugt AV.** Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans. Inf. Theory.* 1964; 10(2): 139-145.
- [46] **Weiner AM.** Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators. *Rev. Sci. Instr.* 2000; 71: 1929–1960.

- [47] **Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N.** Performing mathematical operations with metamaterials *Science*. 2014; 343: 160–163.
- [48] **Tan S, Xiang L, Zou J, Zhang Q, Wu Z, Yu Y, Dong J, Zhang X.** High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators *Optics Letters*. 2013; 38: 3735–3738.
- [49] **Estakhri NM, Edwards B, Engheta N.** Inverse-designed metastructures that solve equations. *Science*. 2019; 363: 1333–1338.
- [50] **Cottle E, Michel F, Wilson J, New N, Kundu I.** [White paper] Optalysys Ltd. – <https://optalysys.com/white-papers>
- [51] **Doskolovich LL, Bezus EA, Golovastikov NV, Bykov DA, Soifer VA** Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide *Opt. Express*. 2017; 25: 22328–22340.
- [52] **Bezus EA, Doskolovich LL, Bykov DA, Soifer VA** Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances *Opt. Express*. 2018; 26: 25156–25165.
- [53] **Zhou Y, Zheng H, Kravchenko II, Valentine J.** Flat optics for image differentiation *Nat. Photon*. 2020; 14: 316–323.
- [54] **Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S.** Plasmonic computing of spatial differentiation *Nature Communications*. 2017; 8: 15391 (5 pp.).
- [55] **Nesterenko DV, Kolesnikova MD, Lyubarskaya AV.** Optical differentiation based on the Brewster effect *Компьютерная оптика*. 2018; 42: P. 758-763 [in Russian].
- [56] **Prucnal PR, Shastri BJ, de Lima TF, Nahmias MA, Tait AN.** Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing *Adv. Opt. Phot.* 2016; 8: P. 228–299.
- [57] **Vandoorne K, Mechet P, Vaerenbergh TV, Fiers M, Morthier G, Verstraeten D, Schrauwen B, Dambre J, Bienstman P.** Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip *Nat. Commun*. 2014; 5: 3541 (6 pp.).
- [58] **Lin X, Rivenson Y, Yardimci NT, Veli M, Luo Y, Jarrahi M, Ozcan A.** All-optical machine learning using diffractive deep neural networks *Science*. 2018; 361: 1004-1008.
- [59] **Fu T, Zang Y, Huang H, Du Z, Hu C, Chen M, Yang S, Chen H.** On-chip photonic diffractive optical neural network based on a spatial domain electromagnetic propagation model *Optics Express*. 2021; 29: 31924-31940.
- [60] **Shen Y, Harris N, Skirlo S. et al.** Deep learning with coherent nanophotonic circuits. *Nature Photon*. 2017; 11: 441–446.
- [61] SPIE. Official website. 2020 Optics and Photonics Industry Report (Fall Update) – <https://spie.org/news/2020-optics-and-photonics-industry-report>.
- 

## About the authors

**Nikita Vladimirovich Golovastikov** (b. 1991), graduated from S.P. Korolyov Samara national research university (2014); Candidate of Sciences in Physics (2018). Head of research laboratory “Photonics for smart home and smart city” in Samara university. Assistant professor in Samara university. Research interests include optics and photonics. ORCID: 0000-0002-0123-252X; Author ID (RSCI): 724573; Author ID (Scopus): 55292665900; Researcher ID (WoS): A-5556-2014. [golovastikov.nv@ssau.ru](mailto:golovastikov.nv@ssau.ru).

**Pavel Sergeevich Dorozhkin** (b. 1977), graduated from Moscow Institute of Physics and Technology (1999), Candidate of Sciences in Physics (2004). Deputy Director of Quantum Communication Department, Russian Railways. Professor of Skolkovo Institute of Science and Technology. Research interests include applied optics and photonics. Author ID (RSCI): 35101; Author ID (Scopus): 6701841337. [P.Dorozhkin@skoltech.ru](mailto:P.Dorozhkin@skoltech.ru).

**Victor Alexandrovich Soifer** (b. 1945), graduated from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute in 1968; advanced Doctor of Engineering (1981), Professor (1983); a full member of the RAS (2016), President of Samara National Research University. He is a fellow of the international society for optics and photonics (SPIE), a member of the governing board of the International Association for Pattern Recognition (IAPR), and a member of the interdepartmental council for the Russian Federation Government Awards in Science and Technology. His scientific publications include 700 research works. Author ID (RSCI): 3028; Author ID (Scopus): 36836834300; Researcher ID (WoS): C-3088-2017. [soifer@ssau.ru](mailto:soifer@ssau.ru).

---

Received November 20, 2021. Revised December 20, 2021. Accepted December 22, 2021.

---

## Формализация смысла. Часть 3. Формирование контекстов

А.Д. Редозубов

Фонд имени академика Натальи Бехтеревой, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В предыдущих частях статьи предпринята попытка начать описание подхода к созданию сильного искусственного интеллекта, основанного на смысле информации. Была предложена модель, в которой понятия описывались через связанные с ними точки зрения. Точка зрения задавалась как контекст, меняющий исходное описание на его трактовку. Было показано, что об осмысленности трактовки можно судить по её адекватности памяти предыдущего опыта. Описано пространство контекстов, задающее систему понятий, покрывающих определённую предметную область. В этой части статьи описан алгоритм, позволяющий создать исходную систему понятий, опирающуюся на наблюдаемые признаки явлений, и перейти от неё к соответствующим этим понятиям контекстам. Для пространства контекстов предложен способ создания кодов понятий, позволяющий кодами понятий передать систему их внутренней близости, проведено сравнение со свёрточными сетями. Пояснения предлагаемого подхода рассмотрено на примере обучения зрительной коры.

**Ключевые слова:** понятие, смысл, контекст, мозг, искусственный интеллект, сильный искусственный интеллект.

**Цитирование:** Редозубов, А.Д. Формализация смысла. Часть 3. Формирование контекстов / А.Д. Редозубов // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т. 11, №4(42). – С.437-449. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-437-449.

### Введение. Подходы к описанию контекстов

Статья является развитием предыдущих работ автора [1, 2], посвящённых поиску путей формализации смысла<sup>1</sup>.

В контекстно-смысловой модели окружающий мир с присущим ему многообразием отражается мозгом через систему ограниченного числа понятий. Поскольку понятия определяются соответствующими им контекстами, то пространство понятий оказывается дискретным. Любая информация приобретает трактовки только в контекстах, а вне контекстов оказывается неопределённой.

«Классический» подход подразумевает использование признаков описаний. В зависимости от модели элементы признакового описания могут иметь разную природу. Например, они могут быть бинарными и отражать наличие или отсутствие признака. Количественные признаки, выраженные вещественными числами, показывают степень выраженности признака в явлении, что позволяет совершать с объектами манипуляции, затруднённые в дискрет-

<sup>1</sup> Формализация смысла остаётся важной проблемой в создании систем с искусственным интеллектом (ИИ). В 1986 году математик и философ Джан-Карло Рота писал: «Интересно, когда ИИ преодолет смысловой барьер». Здесь фраза «смысловой барьер» относится к убеждению в том, что люди противостоят машинам. Люди действительно способны понимать ситуации, с которыми они сталкиваются, в то время как самые продвинутые современные системы ИИ не имеют человеческого понимания концепций, которому пытаются их научить. В 2018 году Институт Санта-Фе провел семинар «ИИ и барьер смысла». Участники из различных дисциплин (ИИ, робототехники, когнитивной психологии и психологии развития, поведения животных, теории информации, философии и др.) обсудили вопросы, связанные с феноменом понимания в живых системах и перспективами такого понимания в машинах. Результаты семинара обобщены в статье *Melanie Mitchell* «On Crashing the Barrier of Meaning in Artificial Intelligence» [*AI MAGAZINE. Summer 2020*. P.86-92].

Редакция журнала «Онтология проектирования» предлагает читателям изложить своё видение этой важной проблемы на его страницах, и статья Алексея Редозубова здесь рассматривается как призыв к плодотворной дискуссии. *Прим. ред.*

ном подходе. Например, веса нейронов нейронной сети выражаются вещественными числами и могут изменяться, настраиваясь на достижение определённого результата. На этом основаны градиентные методы, которые хорошо работают как для задач обучения с учителем, так и для обучения без учителя. Для обучения с учителем широко используется метод обратного распространения ошибки [3], для самообучения - Хеббовское обучение [4].

При описании формирования контекстов было показано, что для обучения необходим учитель, который должен уметь указывать на моменты, когда советующие контекстам явления проявляют себя. Его задача - дать контекстам начальное представление о мире, которое они смогут самостоятельно развить. Такими учителями могут быть классы, выделенные в окружающем мире известными методами, основанными на признаковых описаниях.

В практической реализации механизма формирования понятий удобно использовать комбинацию обоих подходов. На первом этапе, наблюдая за поступающей извне информацией и основываясь на признаках, можно приближенно выделять предположительно существующие в окружающем мире сущности. Когда приблизительное выделение сущностей завершено, можно использовать его результаты, в качестве учителя для обучения контекстов, построить правила преобразования и использования контекстов для детектирования соответствующих явлений.

## 1 Начальное выделение сущностей

Следуя двухэтапной схеме, на первом этапе решается задача кластеризации. Требуется произвести группировку множества объектов  $X$ , полученных при наблюдениях, на кластеры таким образом, чтобы объекты из одного кластера были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров. В результате надо получить множество кластеров  $A$ , в котором каждому кластеру  $a_i$  может быть сопоставлена функция, позволяющая определять уместность отнесения объекта к этому кластеру. Задача кластеризации относится к классу задач обучения без учителя.

Есть множество алгоритмов кластеризации. Часть из них построена на последовательной перегруппировке исходных данных с постепенным приближением к оптимальному разбиению. Такой подход известен как *EM*-алгоритм [5]. Его наиболее распространённая версия – метод *k*-средних. Сначала разбиение множества объектов производится случайным образом. Затем рассчитываются параметры классов, и данные перераспределяются по тем классам, к которым они оказываются ближе. Последние два шага повторяются до завершения перераспределения.

Другая группа алгоритмов основана на том, что по мере поступления новых данных описания классов постепенно адаптируются, приближаясь к некоторому оптимуму, например, «теория адаптивного резонанса» [6]. Суть её в том, что каждый класс (кластер) имеет свой прототип – образ, наиболее точно соответствующий этому классу. Для новой информации определяется, принадлежит ли она к одному из существующих классов, либо она является уникальной. Если информация не уникальна, то она используется для уточнения прототипа класса. В противном случае создаётся новый класс, за прототип которого принимается этот образ.

В адаптивном резонансе используется принцип «победитель забирает всё». Когда поступающий пример относится к какому-либо классу, то только прототип этого класса подлежит корректировке. Этот же принцип лежит в основе группы алгоритмов, позволяющих выделять в данных компоненты, отвечающие за наиболее устойчивые комбинации признаков.

Пример такого алгоритма - линейный сумматор. Его выход определяется как взвешенная сумма входа  $y = \sum_i w_i x_i$ .

Пусть его веса  $w_i$  иницируются случайными значениями. На его входы подаются примеры один за другим и изменяются значения его весов в сторону поступающих примеров тем сильнее, чем выше ответ сумматора  $\Delta w_i = \eta x_i y$ . Здесь  $\eta$  – параметр скорости обучения, который со временем уменьшается, что приводит к стабилизации системы. Такую операцию принято называть обучением по правилу Хебба [4]. Для ограничения роста весов после каждого шага производится их нормализация. Нормализованное правило Хебба называется правилом Ойа [7]:  $\Delta w_i = \eta y(x_i - y w_i)$ .

Алгоритм, построенный на основе приведённых правил, называется фильтром Хебба. Замечательное свойство этого фильтра в том, что он в результате обучения выделяет первую главную компоненту, свойственную набору подаваемых данных.

Можно объединить вместе несколько фильтров Хебба и организовать их согласованную работу: обучать в момент подачи примера только тот фильтр, который сильнее всего на этот пример реагирует. Такой результат можно получить, либо целенаправленно выбирая соответствующий фильтр, либо организовав фильтры в сеть и вводя в ней латеральные тормозящие связи. Настраиваясь на определённую компоненту, фильтр за счёт нормализации перераспределяет свои веса так, что приобретает повышенную чувствительность к этой компоненте и теряет чувствительность к остальным комбинациям признаков. Это позволяет другим фильтрам побеждать и обучаться, выделяя другие отличные друг от друга компоненты. На этом принципе основаны многие алгоритмы адаптивного выделения главных компонент и алгоритмы выделения независимых компонент.

Адаптивное выделение начальных сущностей хорошо подходит для рассматриваемой задачи. Как правило, на начальном этапе обучения не ограничиваются числом примеров.

## 2 Последовательное обучение

Идеализируя постановку задачи первичного обучения, можно предоставить системе самой выделить в данных все устойчивые сочетания признаков. Но признаки того, как проявляют себя явления, зависят от точек зрения на них. Поэтому вместо обнаружения одного явления на практике неизбежно встречается множество его реализаций. Например, если попытаться понять, как выглядит куб, то обнаружится, что ему соответствует множество разных по виду проекций, зависящих от направления взгляда.

Требуется сначала выделить те явления, которые можно уверенно определить через имеющиеся признаки и которые будут удобными контекстами для рассмотрения оставшегося многообразия признаков. Выделить такие «удобные» явления в общем случае можно методом случайных подпространств [8, 9].

Пусть входные данные представлены набором признаков. Из этого набора можно случайным образом выделить часть признаков. В полученном подпространстве попытаться найти возможные устойчивые сочетания и построить вокруг этих сочетаний контексты. Проверить, позволят ли эти контексты удачно описать оставшееся многообразие признаков.

Такую процедуру надо повторить многократно для разных подпространств. Если подпространств будет много, то есть шанс, что в каком-нибудь из них найдётся решение поставленной задачи.

В природе этот принцип реализуется за счёт естественного отбора, когда эксперименты по построению удачных подпространств делаются за счёт многочисленных генетических мутаций, влияющих на строение мозга.

Для создания сильного искусственного ИИ не обязательно повторять весь эволюционный путь человека. Многие результаты могут быть получены из исследований мозга и копирования тех решений, что уже имеются в природе.

### 3 Пример обучения зрительной коры

#### 3.1 Начальное обучение

Пояснить предлагаемый подход можно на упрощённой последовательности формирования абстрактной зрительной коры.

На сетчатке глаза формируется изображение, которое в виде пиксельного описания подаётся на зрительную кору. Глаз способен совершать различные движения, переводящие взгляд в пределах своего зрительного поля.

Сетчатку можно представить прямоугольной областью на поверхности шара (рисунок 1). Перевод направления взгляда можно задать двумя углами сферической системы координат  $\theta, \varphi$ . Для простоты на рисунке 1 сетчатка изображена плоской и считается, что перевод взгляда равносильно сдвигу изображения на сетчатке.

Каждому сдвигу глаза  $p$  соответствует пара  $(\theta, \varphi)$ , которой можно сопоставить единичный трёхмерный вектор  $l$ , описывающий изменение направления взгляда.

$$l = (\sin \vartheta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$$

Информацию, которая поступает от глаза, можно представить матрицей состояний пикселей сетчатки  $s$ ; направлению движения глаза соответствует значение вектора  $l$ .

Пусть в результате проб и ошибок из полного пространства признаков выбрано подпространство, описывающее только сдвиги глаза. Пусть глаз совершает случайные движения. Задача – описать все явления  $p$  с некоторой дискретностью  $N_p$ . Для этого создаётся группа связанных фильтров Хебба, состоящая из  $N_p$  элементов.

За значениями смещения глаза  $l$  наблюдает группа фильтров. В результате наблюдения пространство возможных смещений разбивается на  $N_p$  значений, равномерно покрывающих пространство смещений и описываемых весами фильтров. В итоге получается набор векторов  $L$ , которые соответствуют различным возможным сдвигам глаза  $L = \{l_1 \dots l_{N_p}\}$ .

Можно создать пространство контекстов  $C$  такое, что  $N_c = N_p$ .

$$C = \{c_1 \dots c_{N_c}\}$$

Каждому контексту  $c_i$  сопоставляется соответствующий элемент  $l_i$ .

На пространство контекстов можно подать обучающие примеры, которые будут возникать в момент движения глаза. Каждый пример будет содержать описание картины до смещения  $s$ , вектор смещения  $l$  и описание картины после смещения  $s'$  [2]. Такой пример можно интерпретировать как то, что явление смещения  $p$  изменило описание мира с  $s$  на  $s'$ .

$$s \xrightarrow{p} s'$$

Для обучения контекстов достаточно при подаче каждого примера определить, к какому элементу множества  $L$  ближе всего текущее значение  $l$  и обучать на этом примере соответствующий контекст. Суть такого обучения – создание у контекстов способности при подаче на них любого изображения моделировать результат, который возник бы после соответствующего этому контексту сдвига, в данном случае глаза.

На основе значений векторов  $L$  можно создать начальное приближение для матрицы близости контекстов  $D_c$  так, чтобы близкие сдвиги давали значения, близкие к единице, а сдвиги, отличные на величину более некоего характеристического отклонения  $a$ , показывали нулевую близость. Например:

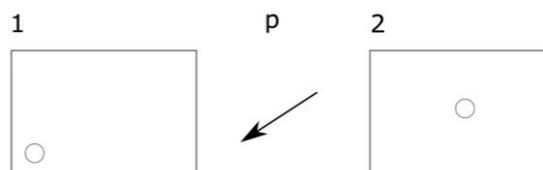


Рисунок 1 - Изображение до сдвига (1), сдвиг глаза  $p$ , изображение после сдвига (2) [2]

$$b = (l_i, l_j), d_{ij} = \begin{cases} \frac{b-a}{1-a}, & b \geq a \\ 0, & b < a \end{cases}.$$

Параметр  $a$  здесь отражает тот факт, что объекты реального мира могут иметь определённые «размеры», за пределами которых их сравнение не имеет смысла. Корректный выбор этого параметра позволяет сделать начальное приближение более точным.

Описанное задание  $D_C$  приблизительно отражает близость контекстов. Более точные значения могут быть получены позже, когда при накоплении опыта возникнут значения корреляций, рассчитанные из ответов контекстов на реальные стимулы.

В результате выполнения этого этапа получено начальное выделение сущностей, в данном случае всех возможных смещений, и пространство контекстов  $K = (C, D_C)$ , подготовленное для дальнейшего обучения.

### 3.2 Пространственная организация контекстов

Для удобства полученные контексты можно разместить на плоскости так, чтобы это размещение некоторым образом передавало структуру близости контекстов. Для этого можно воспользоваться процессом упорядочивания, аналогичным сегрегации Шеллинга [10]. Пусть прямоугольная область разбита на ячейки так, что число ячеек немного превосходило число контекстов. Для ячеек заданы координаты в виде номеров их позиций по горизонтали и вертикали. В ячейках случайным образом размещены контексты.

Осуществляется последовательный перебор ячеек. Для выбранной ячейки проверяется, как изменится «энергия системы», если поменять её с какой-либо соседней ячейкой. Если окажутся перестановки, уменьшающие энергию системы, то выбирается наилучшая.

Циклы перебора повторяются до тех пор, пока состояние системы не стабилизируется.

Если задаться целью, чтобы размещение отражало близость контекстов, то энергию узла, содержащего контекст  $i$ , можно представить в виде:

$$e_i = \sum_j d_{ij} r(e_i, e_j),$$

где  $r(e_i, e_j)$  – евклидово расстояние между двумя узлами, а  $d_{ij}$  – элемент матрицы  $D_C$ .

Если представить, что между двумя контекстами с ненулевой близостью должна быть протянута связь и задаться целью минимизировать общую длину таких связей, то энергия будет представлена в виде:

$$e_i = \sum_j \text{sign}(d_{ij}) r(e_i, e_j).$$

Последний случай хорошо подходит для описания природы пространственной организации реальной коры. Из принципа минимизации длины связей можно воспроизвести карты пространственной организации зрительной коры, аналогичные получаемым в результате экспериментов (рисунок 2 [11]).

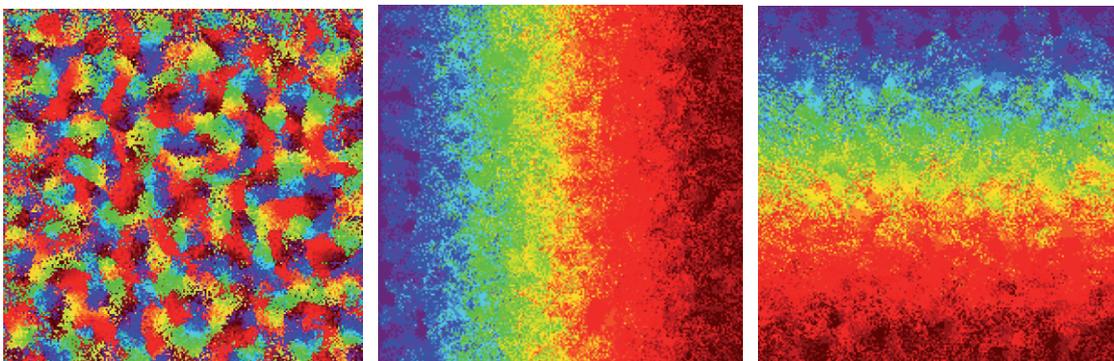


Рисунок 2 - Компьютерное моделирование карты коры

Пространство контекстов кроме смещения учитывает ещё и возможные повороты. Каждому контексту соответствует своя комбинация смещения и поворота. На рисунке 2 слева представлена карта ориентаций, в середине - карта смещений по  $x$ , справа - по  $y$ .

При моделировании пространственную организацию делать необязательно, поскольку близость контекстов, используемая для вычислений, задаётся соответствующей матрицей. Организация на плоскости показательна для сопоставления результатов моделирования с реальной корой. Кроме того, такая расстановка очень удобна для визуализации ответов искусственной коры на подаваемые стимулы. Близость на плоскости похожих контекстов позволяет наблюдать картину их активации в виде хорошо выраженных пятен.

### 3.3 Формирование памяти

После предварительного создания пространства контекстов начинается его продвинутое обучение, связанное с формированием памяти.

Пусть на кору подаются разные зрительные образы, например, простые геометрические фигуры одного масштаба, расположенные в разных частях изображения. На этом этапе глаз считается неподвижным и взаимодействует на каждом шаге только с одним неподвижным изображением.

Создаётся первое воспоминание. Для этого произвольная фигура помещается в центр изображения. Формируется описание  $s$ . Трактовка  $s'$  в контексте, который соответствует нулевому смещению, совпадает с исходной информацией  $s$ . Эта трактовка запоминается как элемент памяти  $m_1$ . Поскольку все контексты должны содержать общую память, то это воспоминание дублируется в памяти  $M$  всех контекстов.

При подаче новых изображений на каждом шаге описание  $s$  поступит на все контексты пространства  $K$ . Каждый из контекстов получит свою трактовку, которая будет описанием результата сдвига исходного изображения на смещение, предусмотренное контекстом. Каждый контекст сравнит трактовку с памятью и получит свою оценку того, насколько он подходит для интерпретации этого изображения. Максимальная оценка будет в том контексте, который «сдвинет» исходное изображение так, что приведёт фигуру на изображении в центр картинки (см. рисунок 1).

Определяется контекст-победитель. Поскольку изображения подаются с одной фигурой, то ответом коры будет одно пятно активности. Центр этого пятна определяется как контекст с максимальной оценкой.

Победившая трактовка запоминается во всех контекстах. То есть, каждый из контекстов запомнит не ту трактовку, что вычислил он, а ту, что возникла у победителя. Этот означает, что контекст-победитель приводит изображение фигуры к центру картинки. Это центрированное изображение и запоминают все остальные контексты.

Если подать на кору изображение сразу с несколькими фигурами, то в ответе будет столько пятен - сколько фигур на изображении. В этом случае можно найти победителя в каждом из пятен и запомнить каждую из полученных трактовок.

В результате подачи  $N_m$  примеров в каждом из контекстов возникнет одна и та же память  $M$ , состоящая из победивших трактовок  $m$ , т.е. из изображений центрированных фигур  $M = \{m_1 \dots m_{N_m}\}$ .

При сформированной памяти победа какого-либо контекста означает, что при смещении в этом контексте исходная фигура наиболее точно соответствует чему-то ранее виденному. Т.е. одновременно формируется представление об изображении (трактовка  $s'$ ) и знание, где размещается это изображение (смещение контекста  $l$ ).

Это же можно сформулировать иначе. Смещение  $p$ , описываемое вектором  $l$ , получено не по значениям элементов вектора  $l$ , а потому, что в контексте этого смещения трактовка ин-

формации в определённом смысле совпала с памятью. Здесь совершён переход от описания смещения в терминах признаков (координат) к его описанию через связанный с ним контекст. Теперь можно утверждать, что присутствует определённое смещение и тогда, когда признаки, которые послужили его определением, не наблюдаются.

Для приведённого примера результат может показаться тривиальным, но он хорошо описывает общий принцип перехода от признакового определения понятия к его заданию через контекст, который и содержит в себе смысл связанного с понятием явления. Задание смещения через координаты формально его описывает, но никак не связано с его смыслом. Координаты не содержат сведений о том, как должен сдвинуться глаз. А смысл смещения – в его применении. Таким образом, контекст позволяет перейти от «формального» задания понятия к «содержательному», от признаков, за которыми нет продолжения, к знанию о сути самого понятия, выраженной через его взаимодействие с миром.

#### 4 Сравнение со свёрточными сетями

В приведённом примере много общего с концепцией свёрточных сетей [2, 12]. Поскольку анализ зрительной информации требует узнавать одни и те же образы независимо от их положения на изображении, то принцип использования «общей памяти» для разных «взглядов» оказывается единственно возможным решением.

В свёрточных сетях на уровне архитектуры задаются правила свёртки, которые позволяют «примерять» любой образ к разным частям изображения. Имея образ какой-либо фигуры, можно «двигать» его по всему изображению и следить за тем, насколько он совпадает с текущей частью изображения. Это можно интерпретировать как попытку взглянуть на одно и то же изображение с разных точек зрения (рисунок 3).

В процессе обучения свёрточные сети выделяют образы, характерные для подаваемых изображений. Эти образы формируют набор ядер свёртки, т.е. множество тех образов, с которыми происходит сравнение. Если сопоставить позиции свёртки с контекстами, то набор ядер свёртки оказывается памятью, общей для всех контекстов.

При всём сходстве у контекстно-смыслового подхода и концепции свёрточных сетей есть несколько принципиальных отличий.

Главное отличие в том, что в свёрточных сетях правила свёртки задаются априори, как очевидное знание о природе зрительной информации. В рассматриваемом подходе эти знания появляются в процессе построения пространства контекстов. В случае первичной обработки изображений результат оказывается одинаков. Но для других задач свёрточные сети оказываются работоспособны только в тех случаях, когда явно удаётся привести данные к такому виду, для которого возможно вручную прописать разумные правила свёртки. Контекстно-смысловой подход потенциально позволяет сформировать пространство контекстов для любой информации и может работать с данными произвольной природы.

Свёрточные сети имеют единый набор ядер свёртки. Это следствие априорного допущения, что образы одинаково переносимы от одного места изображения к другому. В общем

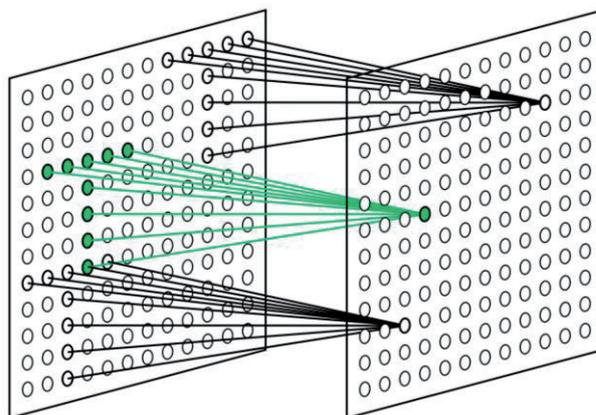


Рисунок 3 - Рецептивные поля простых клеток, настроенных на поиск выбранного паттерна в разных позициях [13]

случае это не так, и перенос опыта из одного контекста в другой требует предварительного анализа возможности такого переноса [1, 2]. Был предложен механизм, в котором каждый контекст имеет собственную копию памяти, и дополнительные данные, позволяющие судить о применимости их в соответствующем контексте.

Многие существенные отличия диктуются различиями архитектуры. Свёрточные сети на выходе имеют набор матриц, соответствующих числу ядер свёртки. Каждая матрица отражает отклик на соответствующее ей ядро всех позиций изображения, в которых происходила свёртка. Это соответствует идеологии нейронных сетей, когда выходной слой является развёрнутым признаковым описанием. Чтобы понизить размерность такого выхода, обычно используется процедура пулинга [14], когда значения нескольких соседних элементов матрицы заменяются одним, например, максимальным значением - снижение размерности происходит за счёт «загрубления» имеющейся информации. В контекстно-смысловом подходе информация представляется в форме семантических описаний, имеющих языковую природу.

## 5 Принципы кодирования понятий

Понятие  $c$  определяется контекстом  $k$ , который передаёт суть понятия и знаком  $t$ , обозначающим понятие  $c = (t, k)$ .

Если единственная задача знака – указать на понятие, то знаком  $t$  может быть, например, число, уникальное для каждого контекста (уникальный токен).

Множество используемых знаков образует словарь  $T$  языка  $L$ .

$$T = \{t_1 \dots t_{Nd}\}$$

Описание  $s$  на языке  $L$  может быть записано как последовательность знаков.

$$s = (t^1, \dots, t^{Ns})$$

Такое семантическое описание для своей обработки требует знания синтаксиса  $Y$ .

Важно, что для пространства контекстов каждый из используемых знаков связан с одним из контекстов, который хранит в себе понимание этого знака. Пространство контекстов содержит не только формальные сведения о существовании понятий, но и определяющие эти понятия сути.

Поскольку каждый контекст содержит в себе полную копию памяти, доступной пространству контекстов, то можно говорить о том, что каждое понятие «содержит в себе весь мир». Правила трактовки информации в заданном контексте и полная память о всём существующем опыте есть полноценное описание понятия, учитывающее все известные проявления стоящего за понятием явления.

Но понимание сути понятия оказывается связано с той зоной коры, где находится соответствующий понятию контекст. Когда используются рекуррентные принципы внутри одного пространства контекстов, используются знаки, которые для этого пространства контекстов определены соответствующими контекстами. Но, когда информация передаётся на другую зону коры, то для неё используемые знаки оказываются лишены смысла. Новая зона не может напрямую перенять смысл тех понятий, из которых строятся поступающие на неё описания, но может сформировать набор собственных понятий. Поэтому обучение новой зоны коры должно происходить заново. При этом новое пространство контекстов не обязано просто повторять у себя все поступающие понятия. Его задача – построить новый понятийный базис, позволяющий удачно отражать явления, описываемые всей совокупностью поступающих по системе проекций данных.

Не имея возможности передать смыслы используемых понятий, в записи информации можно сохранить систему их близости. Так, описывая пример с движением глаза, использованы векторы, задающие направление взгляда. В векторном представлении заложена воз-

возможность определять близость этих направлений. Для любого пространства контекстов существует приём, позволяющий естественным образом создавать коды, отражающие близость описываемых этими кодами явлений.

Пусть дано сформированное пространство контекстов  $K = (C, D_C)$ , размещённое на плоскости. Если подать некое описание  $s$ , содержащее одно явление  $p$ , то описание вызовет максимальный ответ в наиболее близком к этому явлению контексте  $c$ . Но поскольку и близкие по смыслу контексты дадут не нулевой ответ, то общая картина на плоскости размещения контекстов будет выглядеть как некое пятно.

Есть две основные возможности описать ответ пространства контекстов на явление  $p$ . Можно определить максимум в полученном пятне активности, соответствующий наиболее подходящему контексту  $c_i$ . При этом знак  $t$  этого контекста будет ответом. Можно сказать, что обнаружено явление, именованное как  $t$ .

Другой способ позволяет получить естественный код  $e$  явления  $p$ . Для этого следует воспользоваться матрицей близости  $D_C$  и определить соседние по активности к контексту-победителю  $c_i$  контексты. Для контекста  $c_j$  степень его соседства  $f$  определится как произведение активности этого контекста  $R_j$  и его близости к победителю  $f_j = R_j d_{ij}$ .

$N_e$  наиболее активных по  $f$  соседей создадут пятно нужного размера  $N_e$ .

Каждому контексту можно сопоставить элемент в битовом векторе размерностью, равной общему числу контекстов  $N_C$ , и создать битовый вектор  $e$  размерности  $N_C$ , описывающий явление  $p$ . Для этого можно спроецировать на вектор полученное пятно соседей, т.е. в векторе длиной  $N_C$  обратить в единицы все элементы, соответствующие пятну, и в ноль - все остальные.

Такой вектор  $e$  будет описывать явление  $p$  не через один контекст, а через их совокупность. Удобство такого представления в том, что оно позволяет сравнивать два явления, сопоставляя их бинарные векторы  $e$ . Поскольку близкие явления создают похожие пятна, то сравнение соответствующих им бинарных векторов покажет степень пересечения этих пятен.

Если остаться на уровне пространства контекстов, то для определения близости понятий используется матрица близости контекстов  $D_C$ . Но при передаче информации вовне представление о близости теряется. Описание через естественные бинарные векторы позволяет сохранить в кодах метрику близости понятий. Такие вектора во многом соответствуют хорошо известным кодам Грея.

На практике такие коды трудно применимы в силу своей высокой размерности. Но удобными оказываются коды, полученные за счет хеширования векторов  $e$ . Для преобразования вектора  $e$  длиной  $N_C$  в хеш  $\hat{e}$  длиной  $N_h$  случайным образом сопоставляется каждому элементу длинного вектора один элемент короткого и задаётся функция  $h$ , которая выполняет логическое «или» для элементов длинного вектора, попадающих в одну и ту же позицию короткого  $\hat{e} = h(e)$ .

Такие коды будут компактными, но при этом сохраняют возможность сравнения. За счёт хеширования в них появится определённый «шум». Но всегда можно выбрать такой порог сравнения, при котором шум будет гарантированно ниже этого порога.

На рисунке 4 приведён пример сравнения хешированных векторов при  $N_C=2000$ ,  $N_h=128$  и размере пятна в 40 бит. Для сравнения были взяты 2000 естественных бинарных векторов. Каждый из них состоял из 40 единиц и 1960 нулей. Векторы были приписаны к условным позициям от 1 до 2000. Для сравнения с остальными был взят вектор в позиции 1000. Векторы в соседних позициях отличались друг от друга на один бит. Векторы рядом с вектором «1000» постепенно теряли с ним сходство и при удалении на 40 позиций и более уже не имели с ним общих единиц. Из каждого вектора был создан его хеш длиной 128 бит.

На верхнем графике рисунка 4 показаны результат скалярного произведения каждого из хешей с хешем вектора «1000». По оси  $x$  - позиция перемножаемого вектора, по оси  $y$  - результат перемножения. На среднем графике показано расстояние Хемминга между хешами в соответствующих позициях и хешем вектора «1000», на нижнем - число единиц в каждом из хешей.

Примечательно, что уровень шума не зависит от значения  $N_c$ . Это позволяет использовать такое кодирование для контекстных пространств любого размера.

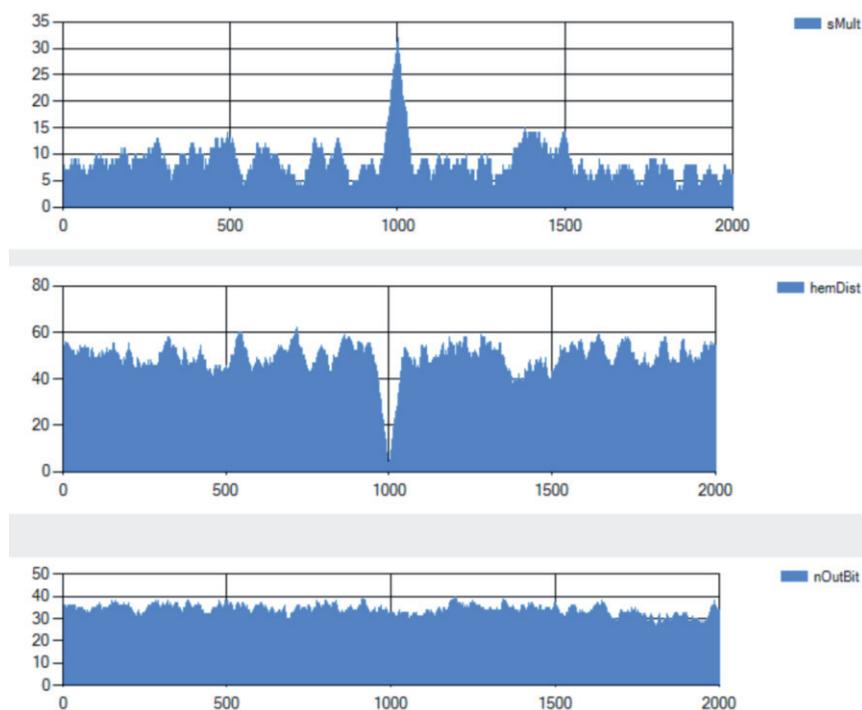


Рисунок 4 – Сравнение хешей, полученных из естественных векторов

## 6 Подходы к информационной модели мозга

Вопрос о дискретности понятий (и о том, какие операции над информацией допустимы) связан с вопросом о моделях мозга.

Цифровой подход исходит из аналогии мозга с цифровым компьютером, где информация представляется в виде двоичных чисел, а машинное слово есть фрагмент данных фиксированного размера, обрабатываемый как единое целое. Количество бит в машинном слове принято называть размером слова. Разрядность слова задаёт число его возможных состояний.

Аналоговый подход использует параметры, которые описываются вещественными числами. Это могут быть, например, элементы вектора признакового описания или же веса искусственного нейрона. Представление об аналоговой модели работы мозга широко распространено [15, 16].

Между аналоговым и цифровым подходами нет чёткой границы. Так, естественные коды коры могут быть с равным успехом отнесены и к аналоговым, и к цифровым. Можно говорить о том, что решение задач, возникающих при построении сильного искусственного интеллекта, требует использования сильных сторон этих методов и умения их комбинировать.

### Заключение

В этой части статьи показаны базовые принципы создания пространства контекстов и возможные формы представления явлений через бинарные коды.

Развитие исследований представляется в направлениях рассмотрения механизмов работы с этими кодами, принципов работы с семантической информацией и алгоритмов реализации принципов обучения с подкреплением в контекстно-смысловой модели.

## Благодарности

Автор благодарит Дмитрия Кашицына, Дмитрия Шабанова и Николая Боргеста за помощь в обсуждении и подготовке настоящей статьи.

## Список источников

- [1] *Редозубов, А.Д.* Формализация смысла. Часть 1 / А.Д. Редозубов // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т. 11, №2(40). – С.144-153. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-2-144-153
- [2] *Редозубов, А.Д.* Формализация смысла. Часть 2. Пространство контекстов / А.Д. Редозубов // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т.11, №3(41). – С.309-319. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-309-319.
- [3] *Werbos, P.* Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences / P. Werbos // Harvard University, 1974.
- [4] *Hebb, D.* The Organization of Behavior, New York: Wiley & Sons, 1949.
- [5] *Dempster, A.P.* Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm / A.P. Dempster, N.M. Laird, D.B. Rubin // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B.*, 1977. V.39/ N 1. P.1–38.
- [6] *Carpenter, G.A.* Adaptive Resonance Theory, The Handbook of Brain / G.A. Carpenter, S. Grossberg // *Theory and Neural Networks*, Second Edition, Cambridge, MIT Press, 2003, p.87-90.
- [7] *Oja, E.* Simplified neuron model as a principal component analyzer / E. Oja // *Journal of Mathematical Biology*, 1982. V.15. N3, p.267–273.
- [8] *Ho, T.K.* The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests / Т.К. Хо // *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998. V.20, N8. P.832–844.
- [9] *Bryll, R.* Attribute bagging: improving accuracy of classifier ensembles by using random feature subsets / R. Bryll, R. Gutierrez-Osuna, F. Quek // *Pattern Recognition*, 2003. V.36, N6. P.1291–1302,
- [10] *Schelling, T.C.* Micromotives and Macrobehavior / T. C. Schelling // W.W. Norton and Co, 1978. 256 p.
- [11] *Crair, M.C.* The Role of Visual Experience in the Development of Columns in Cat Visual Cortex / M.C. Crair, D.C. Gillespie, M.P. Stryker // *Science*, V.23, N279, p.566–570, 1998. DOI:10.1126/SCIENCE.279.5350.566.
- [12] *LeCun, Y.* Convolutional networks for images, speech, and time-series / Y. LeCun, Y. Bengio // *Handbook of brain theory and neural networks*, Cambridge, MIT Press, 1995. P.3361.
- [13] *Fukushima, K.* Artificial vision by multi-layered neural networks: Neocognitron and its advances / K. Fukushima // *Neural Networks*, 2013. V.37. P.103-119. DOI:10.1016/j.neunet.2012.09.016.
- [14] *LeCun, Y.* Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard and L. D. Jackel // *Neural Computation*, 1989. V.1, N 4. P.541-551. DOI: 10.1162/neco.1989.1.4.541.
- [15] *McCulloch, W.* A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity / W. McCulloch and W. Pitts. // *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5, No. 1-2, 1943. P.99-115.
- [16] *Хьюбел, Д.* Глаз, мозг, зрение / Д. Хьюбел; Перевод с англ. О. В. Левашова, Г. А. Шараева; Под ред. А. Л. Бызова. - М. : Мир, 1990. - 239 с.

## Сведения об авторе



*Редозубов Алексей Дмитриевич*, 1968 г. рождения. Прикладной математик. Учился в Ленинградском политехническом институте. Длительное время занимался изучением механизмов восприятия художественных произведений, математическим анализом явлений и построением объясняющих моделей. Соучредитель Фонда поддержки научных исследований механизмов работы мозга, лечения его заболеваний, нейромоделирования имени академика Натальи Петровны Бехтеревой. Область интересов – создание сильного искусственного интеллекта, основанного на нейрофизиологии. Author ID (Scopus): 57218267840. [galdrd@gmail.com](mailto:galdrd@gmail.com).

*Поступила в редакцию 09.11.2021, после рецензирования 14.12.21. Принята к публикации 22.12.2021.*

## Formalization of the meaning. Part 3. Formation of contexts<sup>2</sup>

**A.D. Redozubov**

*Fund named after Academician Natalia Bekhtereva, St. Petersburg, Russia*

### Abstract

The previous parts of this article have attempted to begin describing an approach to building strong artificial intelligence based on sense of information. A model was proposed in which concepts were described through related points of view. The point of view was set as a context that changes the original description to its interpretation. It was shown that the meaningfulness of the interpretation can be judged by its adequacy to the memory of previous experience. The space of contexts is described, which defines a system of concepts that cover a certain subject area. In this part of the article, an algorithm is described that allows you to create an initial system of concepts based on the observable signs of phenomena, and move from it to the contexts corresponding to these concepts. For the space of contexts, a method for creating concept codes is proposed, which allows concept codes to convey the system of their internal proximity, a comparison with convolutional networks is made. Explanations of the proposed approach are considered on the example of training the visual cortex.

**Keywords:** *concept, meaning, context, brain, artificial intelligence, strong artificial intelligence.*

**Citation:** 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.

**Acknowledgment:** The author thanks Dmitry Kashitsyn, Dmitry Shabanov, and Nikolay Borgest for their help in discussing and preparing this article.

### List of figures

Figure 1 – Pre-shift image (1), eye-shift  $p$ , post-shift image (2) [2]

Figure 2 – Computer simulation of a map of the cortex

Figure 3 – Receptive fields of simple cells configured to search for the selected pattern in different positions [13]

Figure 4 – Comparison of hashes derived from natural vectors

### References

- [1] **Redozubov AD.** Formalization of the meaning. Part 1 [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(2): 144-153. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-2-144-153.
- [2] **Redozubov AD.** Formalization of the meaning. Part 2. Space of contexts [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(3): 309-319. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-309-319.
- [3] **Werbos P.** Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Harvard University, 1974.
- [4] **Hebb D.** The Organization of Behavior, New York: Wiley & Sons, 1949.
- [5] **Dempster AP, Laird NM, Rubin DB.** Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B.*, 1977; 39(1): 1–38.

---

<sup>2</sup> The article is a development of the author's previous works [1, 2], devoted to the search for ways to formalize the meaning.

The formalization of meaning remains an important problem in the creation of artificial intelligence (AI) systems. In 1986, the mathematician and philosopher Gian-Carlo Rota wrote, "I wonder when AI will break the barrier of meaning." Here the phrase "semantic barrier" refers to the belief that humans are opposed to machines. Humans are truly capable of understanding the situations they face, while the most advanced AI systems today do not have the human understanding of the concepts they are trying to teach them. In 2018, the Santa Fe Institute held a seminar "AI and the Barrier of Sense". Participants from various disciplines (AI, robotics, cognitive and developmental psychology, animal behavior, information theory, philosophy, etc.) discussed issues related to the phenomenon of understanding in living systems and the prospects for such understanding in machines. The results of the workshop are summarized in Melanie Mitchell's article "On Crashing the Barrier of Meaning in Artificial Intelligence" [AI MAGAZINE. Summer 2020. P.86-92].

The editorial board of the *Ontology of Design* magazine invites readers to present their vision of this important problem on its pages, and the article by Alexey Redozubov is viewed here as a call for fruitful discussion. *Note ed.*

- 
- [6] **Carpenter GA, Grossberg S.** Adaptive Resonance Theory. The Handbook of Brain. Theory and Neural Networks, Second Edition, Cambridge, MIT Press, 2003, p.87-90.
- [7] **Oja E.** Simplified neuron model as a principal component analyzer. *Journal of Mathematical Biology*, 1982; 15(3): 267–273.
- [8] **Ho TK.** The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998; 20(8): 832–844.
- [9] **Bryll R, Gutierrez-Osuna R, Quek F.** Attribute bagging: improving accuracy of classifier ensembles by using random feature subsets. *Pattern Recognition*, 2003; 36(6): 1291–1302,
- [10] **Schelling TC.** Micromotives and Macrobehavior. W.W. Norton and Co, 1978. 256 p.
- [11] **Crair MC, Gillespie DC, Stryker MP.** The Role of Visual Experience in the Development of Columns in Cat Visual Cortex. *Science*, 1998; 23(279): 566–570. DOI:10.1126/SCIENCE.279.5350.566.
- [12] **LeCun Y, Bengio Y.** Convolutional networks for images, speech, and time-series. Handbook of brain theory and neural networks, Cambridge, MIT Press, 1995. P.3361.
- [13] **Fukushima K.** Artificial vision by multi-layered neural networks: Neocognitron and its advances. *Neural Networks*, 2013; 37: 103-119. DOI:10.1016/j.neunet.2012.09.016.
- [14] **LeCun Y, Boser B, Denker JS, Henderson D, Howard RE, Hubbard W, Jackel LD.** Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1989; 1(4): 541-551. DOI: 10.1162/neco.1989.1.4.541.
- [15] **McCulloch W, Pitts W.** A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 1943; 5(1-2): 99-115.
- [16] **Hubel D.** Eye, brain and vision. Scientific American Library, NY. 1988.
- 

### About the author

**Alexey Redozubov** (b. 1968), an applied mathematician. Studied applied mathematics at the Leningrad Polytechnic Institute. For many years he studied the mechanisms of perception of works of art, mathematical analysis of the phenomenon and the construction of an explanatory model. He is a co-founder of the Fund for the support of scientific research of brain mechanisms, treatment of its diseases, and neuro-modeling named after Academician Natalya Bekhtereva. His area of interest is the creation of strong artificial intelligence based on neurophysiology. Author ID (Scopus): 57218267840. [galdrd@gmail.com](mailto:galdrd@gmail.com).

---

*Received November 09, 2021. Revised December 14, 2021. Accepted December 22, 2021.*

---

## ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.896

DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-450-463

### Сквозное проектирование автоматизированных систем на основе онтологий

В.Н. Негода, А.А. Куликова

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

#### Аннотация

В настоящее время проводится большое количество исследований по применению онтологий при разработке автоматизированных систем. Онтологическое моделирование позволяет повысить эффективность процесса разработки программного обеспечения. Разделение труда при разработке автоматизированных систем способствует появлению семантических разрывов между фазами проектного процесса. Практика использования широкого спектра артефактов проектирования, пригодных для повторного применения, является фактором риска нарушения концептуальной целостности, непротиворечивости и полноты разрабатываемых проектных решений. В статье предлагаются: новый подход к онтологическому моделированию автоматизированных систем, который обслуживает проектный процесс их разработки на всех стадиях проектирования вплоть до реализации; новая структура метаданных онтологических спецификаций автоматизированных систем, которая позволяет учитывать семантически важные сущности и особенности разрабатываемой системы. Показано, что применение данного подхода значительно снижает трудозатраты при проектировании сложной автоматизированной системы в условиях изменения требований на различных стадиях создания системы. Применение онтологических моделей в проектном процессе способствует повышению концептуальной целостности, непротиворечивости и полноты разрабатываемых проектных решений.

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, автоматизированные системы, сквозное проектирование, вопросно-ответное моделирование, онтология проекта.

**Цитирование:** Негода, В.Н. Сквозное проектирование автоматизированных систем на основе онтологий / В.Н. Негода, А.А. Куликова // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.450-463. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-450-463.

#### Введение

Проектирование сложных автоматизированных систем (АС) в соответствии с широко применяемыми стандартами [1-2] представляет собой многоэтапный процесс, в который вовлекаются различные группы специалистов, многообразные технологии проектирования и инструментальные средства поддержки исследования объекта автоматизации. Этот процесс включает: анализ требований, формирование и документирование проектных решений, моделирование и прототипирование, программирование, тестирование и верификацию. Разделение труда и разнообразие применяемых технологий и инструментальных средств способствует возникновению *информационных (семантических) разрывов* в ходе проектирования [3-6], что приводит к нарушениям *непротиворечивости, концептуальной целостности и полноты* всей совокупности проектных решений.

Подобные нарушения чаще всего возникают в ходе интерпретации проектных спецификаций, передающихся от одних проектировщиков другим. Характерными свойствами спецификаций проектных решений АС являются *многокомпонентность и гетерогенность* – коли-

чество сущностей, фигурирующих в различных проектных диаграммах и их описаниях, обычно велико, и эти сущности довольно разнородны. Применение технологий онтологического моделирования в специфицирование проектных решений позволяет автоматизировать интерпретацию разнородных спецификаций и создаёт условия для сквозного проектирования АС с существенно меньшей вероятностью возникновения информационных разрывов [7].

В работе [8] представлена технология онтологического моделирования систем логического управления (СЛУ), которые являются распространённым классом АС управления технологическими процессами [9]. В ходе разработки и исследования этой технологии авторами обнаружены возможности обеспечить сквозное проектирование АС за счёт использования композиции трёх видов онтологических моделей (ОМ): онтологии требований, онтологии процесса проектирования и онтологии программной реализации проектных решений. Такая возможность наглядно проявляется в примере автоматической генерации части программного кода СЛУ на основе совокупности спецификаций этих трёх видов ОМ.

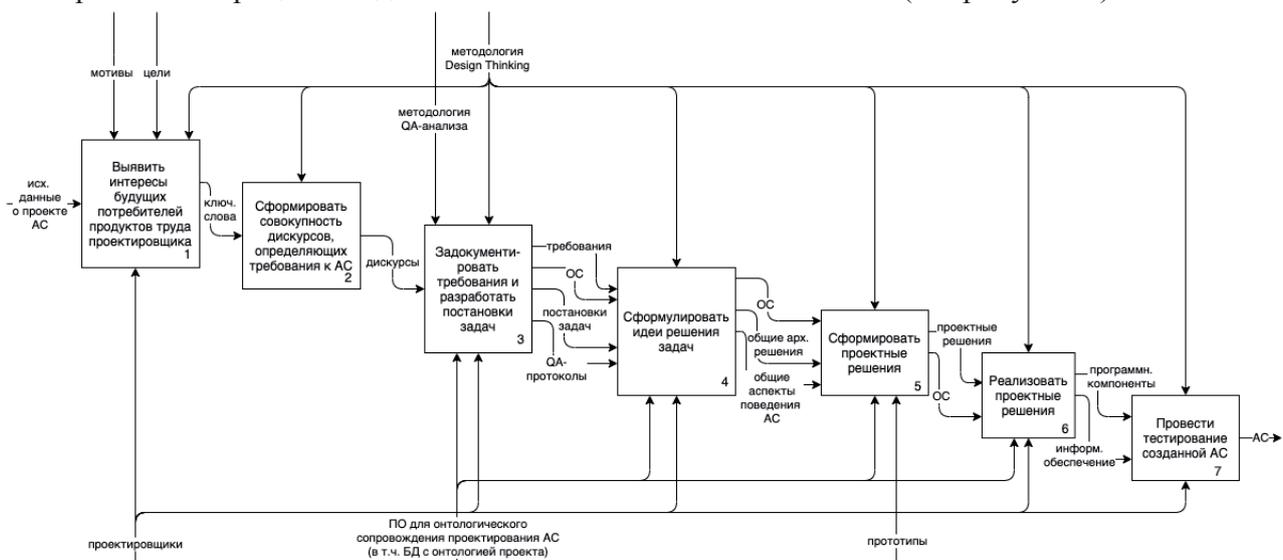
В настоящей работе выполнено теоретическое обобщение результатов экспериментов по применению онтологий в проектировании АС, положенных в основу разработки подхода к сквозному проектированию АС.

## 1 Основные положения

Проектный процесс строится на основе механизмов *проектного мышления* (*Design Thinking*, DT-подход) [10-12] и *вопросно-ответного моделирования* рассуждений проектировщика с использованием технологий онтологического моделирования [13] и прототипов проектных решений, представляющих собой результаты опыта предыдущих проектов либо текущих проектных экспериментов.

Оба механизма моделируют рассуждения проектировщика с ориентацией на *мотивационно-целевую составляющую* требований к разрабатываемой системе. Последовательная реализация DT-подхода и вопросно-ответный анализ артефактов, генерируемых на каждом из его этапов (текстов требований, формулировок проектных задач, описаний идей их решения и др.) постепенно снижает неопределённость проектной ситуации и приводит к достижению проектировщиком такого понимания проекта АС, которое является необходимым и достаточным для его успешного завершения.

Проектный процесс создания АС включает несколько этапов (см. рисунок 1).



### 1.1 Выявление интересов будущих потребителей продуктов труда проектировщика

На этом этапе системный аналитик формирует исходное представление о проекте в вербальной форме – например, в формате *ключевых слов*, указывающих на обнаруженные данные о проекте АС, которую требуется разработать, – и фокусируется на неопределённости исходных спецификаций задач проекта. Тем самым формируется целеориентирующая основа для вопросно-ответного моделирования в ходе анализа требований. Онтологические спецификации (ОС), возникающие при этом, охватывают *мотивы* и *цели* пользователей создаваемой АС, а также предположения о её свойствах, благодаря которым планируется достичь поставленных целей [14].

### 1.2 Формирование совокупности дискурсов, определяющих требования к АС

Далее формируется совокупность дискурсов  $D$ , представляющих собой короткие тексты на естественном языке, определяющие требования к АС в контексте мотивов и целей её заказчика. Каждый дискурс содержит исходную неопределённость, которая может быть снижена за счёт генерирования вопросов  $Q$  и формулирования ответов на них  $A$ . При этом каждый ответ  $A_n$  будет также содержать неопределённость, которая будет меньше исходной и также может быть снижена за счёт генерирования новых вопросов и формулирования новых ответов. В результате такого вопросно-ответного анализа формируется  $QA$ -протокол в виде дерева вопросов и ответов, который используется в качестве основы для онтологического специфицирования АС и формирования онтологии проекта  $O^P$ . Особенности методологии  $QA$ -моделирования, а также примеры задач по разработке АС, в ходе которых успешно применяется вопросно-ответный подход, представлены в [15].

$QA$ -протокол позволяет отследить логику совместных рассуждений представителей заказчика и проектировщиков, выявить требования к АС, ассоциировать вытекающие из требований проектные задачи с единицами опыта (существующими проектными решениями, пригодными для повторного использования), а также снабдить ОС проекта мотивами конечных потребителей установлением отношений сущностей мотивов и целей с сущностями требований. ОС требований образуют основу для трёх видов проектных процедур последующих этапов: документирования требований, разработки постановок задач и верификации проектных решений.

### 1.3 Документирование требований и разработка постановок задач

На данном этапе происходит осмысление требований, представленных в форме совокупности дискурсов  $D$ , на основе вопросно-ответного моделирования. При этом строятся такие формулировки требований, которые устраивают заказчика и исполнителя проекта АС по степени достижения целей и уровням рисков осуществимости в рамках согласованных ограничений бюджета и времени разработки. Результаты  $QA$ -анализа служат основой для документирования требований согласно общепринятым стандартам, а также разработки совокупности постановок задач, реализация которых обеспечивает создание АС.

ОС содержат отношения между требованиями и постановками задач, которые позволяют контролировать полноту покрытия всей совокупности требований сущностями постановок задач. Высокий уровень автоматизации функции такого контроля обеспечивается за счёт интерпретируемости ОС, последовательно наращиваемых на каждом этапе.

Совокупность постановок задач является основой для проектного менеджмента – формирования команд исполнителей, распределения задач, контроля исполнения. Интерпретируемость ОС обеспечивает контролируемость покрытия требований содержанием документов, планирующих проектный процесс, и спецификацию проектных решений.

## 1.4 Формулировка идей решения задач

*Идеи решения задач* образуют концептуальную основу проекта АС в виде совокупности архитектурных решений, общей структурно-функциональной организации и общих аспектов поведения, которые фиксируются в спецификациях онтологии проекта, связанных отношениями вида «быть основанным», «быть обусловленным», «являться детализацией» со спецификациями предыдущих этапов проектирования.

## 1.5 Формирование проектных решений

*Проектные решения* формируются с использованием прототипов, в качестве которых могут представляться спецификации алгоритмов, агрегатов данных, процедур обработки из предыдущих проектов команды разработчиков и доступных библиотек шаблонов проектирования, классов и других программно-информационных ресурсов, рассматриваемых в рамках *DT*-подхода в качестве базы опыта [16, 17]. В ОС на этом этапе важную роль играет отношение «быть реализованным». Это отношение фиксирует факты реализации требований, идей, алгоритмов и других проектных решений через программно-информационные прототипы.

## 1.6 Реализация проектных решений

*Реализация всей совокупности проектных решений* производится через связанную совокупность программных компонентов и исходное информационное обеспечение, достаточное для организации тестирования АС.

## 1.7 Тестирование созданной АС

ОС проекта организуются таким образом, что на их основе может быть сгенерирован тестируемый прототип АС, созданный в рамках *DT*-подхода. Связывание сущностей такого прототипа с ОС порождает свойство концептов «быть материализованным» на мета-уровне.

## 2 Организация сквозного проектирования АС

Предлагается модель для специфицирования проектных решений в форме онтологии:

$$O^P = (C, R, F, Pr, Agg, A),$$

где  $C$  – множество концептов,  $R$  – множество отношений семантических типов,  $F$  – множество  $n$  функций интерпретации, определяемых как множество отображений:

$$F = \{f_n: C^* \times R^* \rightarrow C^{**} \times R^{**} \mid C^*, C^{**} \subseteq C; R^*, R^{**} \subseteq R\}$$

$Pr$  – множество свойств понятий и отношений:  $Pr = \{(pr_i, e_j) \mid pr \in Pr, e \in C \cup R\}$

$Agg$  – множество агрегатов,  $A$  – множество аксиом.

Под концептами понимаются классы понятий  $CC$ , характерные для АС, и их экземпляры  $CI$ , специфицирующие конкретную систему. Т.е. отношение «быть экземпляром класса общего понятия в конкретной АС» является структурообразующей основой, декомпозирующей множество концептов и отношений:

$$C = CC \cup CI, R = R^{CC} \cup R^{CI} \cup R^{CCI},$$

где  $R^{CC} \subseteq CC \times CC$ ,  $R^{CI} \subseteq CI \times CI$ ,  $R^{CCI} \subseteq CC \times CI$ .

Дополнительно определены структурообразующие типы концептов и отношений:

$$C = C^I \cup C^J \cup C^D \cup C^S \cup C^T, R = R^I \cup R^J \cup R^D \cup R^S \cup R^T,$$

где  $C^I$  – концепты, представляющие этапы проектирования, а  $R^I$  – отношения непосредственного следования между концептами, добавляемыми в онтологию проекта на каждом этапе проектирования;  $C^J$  – концепты, представляющие множество проектных задач, характерных

для процессов проектирования АС, а  $R^J$  – отношения обусловленности между концептами, связанными с конкретными проектными задачами;  $C^D$  и  $R^D$  – концепты и отношения, обслуживающие документирование разрабатываемой АС (например, названия структурных элементов *UML*-диаграмм и типовые связи между такими элементами или названия типовых полей проектной документации, определяемых в соответствии со стандартами);  $C^S$  и  $R^S$  – концепты и отношения, представляющие спецификации конкретной АС;  $C^T$  и  $R^T$  – концепты и отношения, определяющие правила верификации проектных решений и тестирования программ, а также поддерживающие итоговую аттестацию АС через комплексное тестирование и выполнение программы испытаний.

Процедуру формирования и модификации *ОМ* проекта можно разделить на работу с метаданными *ОС* и работу со спецификациями конкретной АС. Данная процедура выполняется итеративно, обеспечивая наращивание *ОС* на каждом этапе проектного процесса.

## 2.1 Формирование метаданных онтологии проекта

Формирование метаданных онтологии проекта осуществляется следующей последовательностью шагов.

- 1) формирование или модификация пространства агрегатов *Agg* – путём выделения следующих групп:
  - этапы проектного процесса  $I$ , а также производимые на каждом из них артефакты проектирования (рассуждения проектировщика, проектная документация, *UML*-диаграммы, программа автоматизации), подвергающиеся онтологическому специфицированию:  $a^I: I \rightarrow Agg^*$ ;
  - проектные задачи, проектные решения и проектные операции;
  - прототипы, представляющие прецеденты  $P$  в накопленном опыте автоматизации – готовые и подтвердившие свою состоятельность проектные решения, пригодные для повторного использования, которые подвергаются онтологическому специфицированию для ассоциирования с другими сущностями проекта:  $a^P: P \rightarrow Agg^*$ .
- 2) формирование или модификация множества классов понятий  $CC^i$ , характеризующих объект проектирования на этапе проектного процесса  $i$ . Классы таких понятий соответствуют типичным сущностям АС, например: входы и выходы АС; операции и действия АС; события, возникающие в АС; сообщения о событиях, действиях, значениях входов и выходов; процессы, осуществляемые в ходе функционирования АС и объекта автоматизации; функциональные, параметрические и иные требования; протоколы о ходе функционирования системы и др. Экземпляры  $CI^i$  созданных классов связываются с сущностями артефактов проектирования текущего этапа  $Atf^i$  (спецификациями требований, *UML*-диаграммами, исходным кодом программы автоматизации и др.) отношением материализации, которое задаётся функцией:  $m^i: CI^i \rightarrow Atf^i$ .
- 3) формирование или модификация аксиом  $A^i$ , накладывающих ограничения на структуру метаданных *ОС*: аксиомы описывают возможные типы семантических отношений  $RT^i$  между понятиями  $CI^i$  различных классов  $CC^i$  (при этом определяются конкретные классы, которые могут быть связаны определёнными типами отношений), а также возможность связывания этих классов с определёнными агрегатами *Agg*:

$$ax^R: \{(cc_n, cc_m) | cc \in CC; n, m \in \mathbb{N}; n, m \in [1, |CI|\}\} \rightarrow \{rt_p | rt \in RT, p \in \mathbb{N}, p \in [1, |RT|\}\} \\ ax^{Agg}: CC \rightarrow Agg.$$

## 2.2 Формирование ОС АС

Формирование ОС разрабатываемой АС осуществляется следующей последовательностью шагов.

- 1) формирование экземпляров классов понятий  $CI_j^i$ , соответствующих конкретным сущностям АС, включающее два процесса:

- связывание дискурсов из множества  $D$  и результатов их  $QA$ -анализа с понятиями  $C_j^i$  онтологии проекта:

$$l^i: D \times QA^i \rightarrow \{(cc_j^i, ci_j^i) | cc \in CC, ci \in CI\} \times \{(ci_j^i, ci_d^i, rt) | d = f(D), rt \in RT\};$$

- трансформация продуктов онтологического специфицирования, выполненного на предыдущих этапах проектного процесса,  $O^{i-1}$  и связывание их с концептами  $C_j^i$  в соответствии с результатами вопросно-ответного моделирования  $QA^i$ :

$$t^i: O^{i-1} \times QA^i \rightarrow \{(cc_j^i, ci_j^i) | cc \in CC, ci \in CI\} \times \{(ci_j^{i-1}, ci_j^i, r) | ci \in CI\}.$$

- 2) описание множества свойств понятий  $Pr$  и их значений  $V$ : в качестве свойств могут быть заданы, например, имена  $Nm$  сущностей  $E$  АС в конкретном артефакте:

- термины, используемые в спецификациях требований;
- имена объектов, например, состояний АС, используемые для создания UML-диаграмм;
- имена классов, функций, параметров, используемых в исходном коде программы автоматизации:

$$p: \{(e_n, nm_n) | e \in E, nm \in Nm\} \rightarrow \{(pr_m, v_m) | pr \in Pr, v \in V\}$$

Проектный процесс характерен включением множеств *пространства имён*, что является одной из причин информационных разрывов. Включение пространств имён в ОМ АС способствует снижению когнитивных усилий проектировщиков на осознание того, что разными именами названа одна и та же сущность.

- 3) описание отношений между понятиями  $R$ , которые формируются на основе содержания дискурсов  $D$  и связанных с ними  $QA$ -протоколов в соответствии с аксиомами  $A$ :

$$r^i: D \times QA \times A \rightarrow \{(c_n, c_m, rt)\}.$$

- 4) агрегация концептов и отношений в соответствии с аксиомами  $A^i$  – важное отличие агрегатов от классов заключается в том, что один и тот же элемент ОМ может относиться сразу к нескольким агрегатам:

$$agg^i: \{e^i | e \in C \cup R\} \times A^i \rightarrow \{(e^i, agg) | agg \in Agg\}.$$

- 5) формирование выборок ОС АС, пригодных для генерирования артефактов проектирования (документации, *UML*, исходного кода) на основе соответствующих агрегатов:

$$g^i: C_i^D \times R_i^D \times Agg^i \rightarrow C^* \times R^*$$

## 3 Оценка эффектов создания ОМ проекта для СЛУ

Для оценки эффектов описываемого подхода разработана ОМ *СЛУ роботами-плиткоукладчиками*, осуществляющими укладывание плитки на негоризонтальной поверхности. С правой стороны робота-плиткоукладчика находятся манипуляторы укладки плитки на бетонное основание. Чтобы не двигаться по уже уложенным плиткам, робот движется по квадратной спирали по часовой стрелке. На рисунке 2 показана схема возможной траектории движения такого робота, записи в клетках которой имеют следующий формат:

*НомерПлитки\_НомерВитка: x, y, НаправлениеДвиженияПослеУкладкиПлитки,*

где  $x, y$  – координаты робота в такой системе координат, где единица соответствует одному плиткоместу. Плитки нумеруются с 0.

25_3: -2, 3 →	26_3: -1, 3 →	27_3: 0, 3 →	28_3: 1, 3 →	29_3: 2, 3 →	30_3: 3, 3 ↓
24_3: -2, 2 ↑	09_2: -1, 2 →	10_2: 0, 2 →	11_2: 1, 2 →	12_2: 2, 2 ↓	31_3: 3, 2 ↓
23_3: -2, 1 ↑	08_2: -1, 1 ↑	01_1: 0, 1 →	02_1: 1, 1 ↓	13_2: 2, 1 ↓	32_3: 3, 1 ↓
22_3: -2, 0 ↑	07_2: -1, 0 ↑	00_1: 0, 0 ↑	03_1: 1, 0 ↓	14_2: 2, 0 ↓	33_3: 3, 0 ↓
21_3: -2, -1 ↑	06_2: -1, -1 ↑	05_2: 0, -1 ←	04_2: 1, -1 ←	15_2: 2, -1 ↓	34_3: 3, -1 ↓
20_3: -2, -2 ↑	19_3: -1, -2 ←	18_3: 0, -2 ←	17_3: 1, -2 ←	16_3: 2, -2 ←	35_3: 3, -2 •

Рисунок 2 – Схема траектории движения робота-плиткоукладчика

В качестве инструментальной основы для реализации ОМ выбрана СУБД *Neo4j*, которая базируется на структуре *LPG (Labeled Property Graph)* и активно применяется на практике, в том числе для решения задач, связанных с онтологическим моделированием [18].

### 3.1 Описание ОС СЛУ на мета-уровне

ОМ рассматривается как совокупность ОС, охватывающих этапы проектного процесса: анализ требований, формирование проектных решений и реализация. Множество пространство агрегатов  $Agg = \{Requirements, Solutions, Development\}$  представлено с помощью тегов узлов и связей графа в базе данных, где тег *Requirements* имеют спецификации, относящиеся к этапу анализа требований, *Solutions* – к этапу формирования проектных решений и *Development* – к этапу реализации программы автоматизации.

Классы понятий представлены следующими множествами:

- на уровне требований:  $CC^R = \{Source, Inputs, Outputs, Events, Actions, Conditions\}$ , где *Source* – описания требований к системе на естественном языке, в том числе дискурсы; *Inputs* и *Outputs* – входы и выходы СЛУ; *Events* – события, возникающие в СЛУ; *Actions* – операции СЛУ; *Conditions* – спецификации элементов технических условий;
- на уровне проектных решений:  $CC^S = \{States, Transitions, Predicates, Actions\}$ , где *States* – состояния СЛУ; *Transitions* – переходы между состояниями; *Predicates* – условия перехода между состояниями, *Actions* – операции и действия, которые необходимо выполнить до либо после переходов в соответствии с требованиями;
- на уровне реализации:  $CC^D = \{Operations, Functions, Parameters\}$ , где *Operations* – операции, *Functions* – функции, *Parameters* – параметры, использованные в исходном коде программы автоматизации.

В качестве аксиом заданы: принадлежность классов понятий определённым агрегатам и обязательное наличие определённых типов семантических связей между классами. Примеры аксиом второго типа на языке логики предикатов имеют вид: *вызывать (Transition, Action)*; *предшествовать (Transition, Action)*; *переходить в (State, State)*; *быть переходом из (Transition, State)*; *быть переходом в (Transition, State)* и др.

ОС уровня проектных решений отчасти наследуют спецификации уровня требования, а спецификации уровня реализации - спецификации уровня проектных решений.

### 3.2 Использование ОС СЛУ для генерирования артефактов проектирования

ОС проекта на всех уровнях организованы таким образом, что являются пригодными для генерирования таких артефактов проектирования, как фрагменты технического задания, *UML*-диаграммы (в частности, диаграмма состояний), исходный код программы автоматизации СЛУ на языке *C*. Программы автоматизации обработки ОС для генерирования перечисленных артефактов реализованы с помощью *Cypher*-запросов к базе данных *Neo4j* и скриптов на языке *Python*.

Фрагменты технического задания на разработку СЛУ роботами-плиткоукладчиками, сгенерированные на основе ОС уровней требований и проектных решений:

- реализация СЛУ должна предусматривать следующие состояния: завершённость процесса; инициализация; движение вперёд; аварийное состояние; движение вправо; движение назад; движение влево;
- переход из состояния «инициализация» в состояние «аварийное состояние» должен осуществляться при условии превышении времени пребывания в состоянии инициализации;
- переход из состояния «инициализация» в состояние «движение вперёд» должен осуществляться при условии завершения инициализации; после перехода из состояния «инициализация» в состояние «движение вперёд» должно осуществляться движение к начальной точке.

На рисунке 3 показаны ОС уровня проектных решений, визуализированные в виде графа в среде *Neo4j Browser*, на рисунке 4 – сгенерированный на их основе фрагмент диаграммы состояний СЛУ. Для визуализации диаграммы состояний использован инструмент *PlantUML*, позволяющий создавать диаграммы из описаний на формальном языке (формальные спецификации оказалось возможным сгенерировать на основе данных из ОМ проекта).

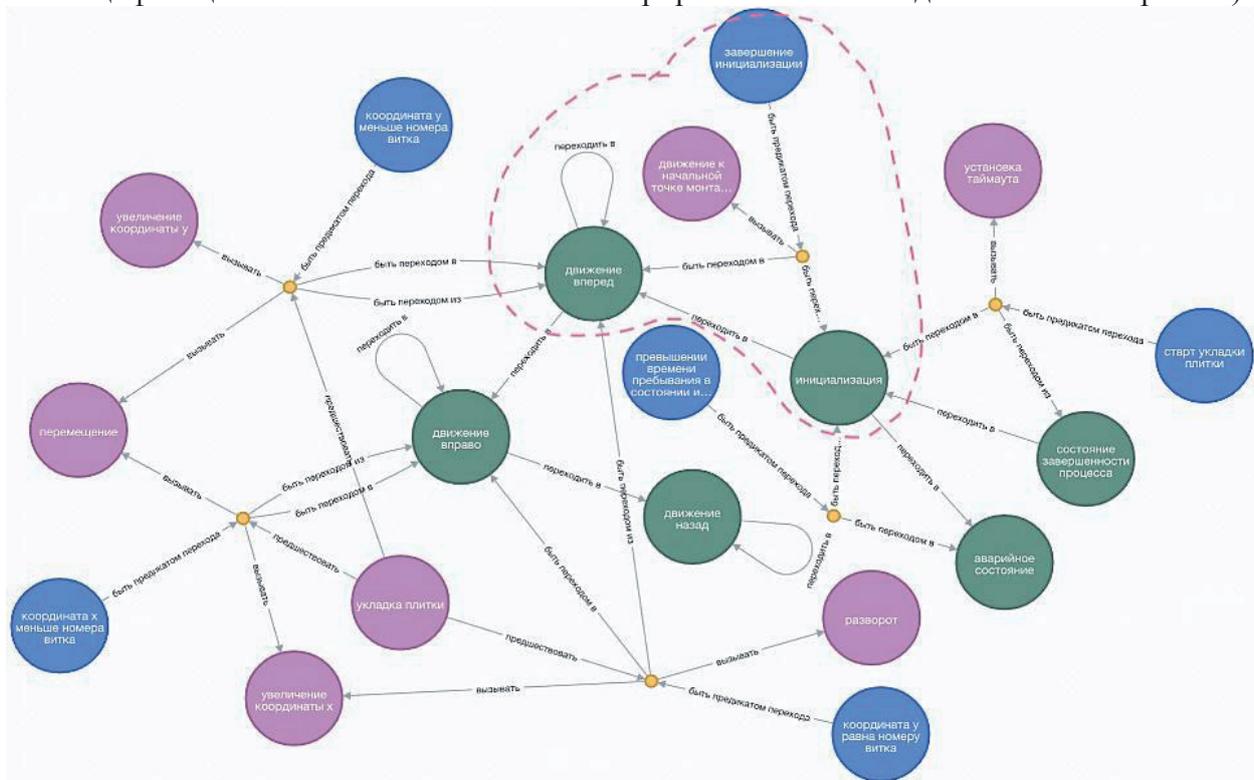


Рисунок 3 – Фрагмент онтологии проекта СЛУ роботами-плиткоукладчиками уровня проектных решений

ОС уровня проектных решений строятся с учётом заданной формальной структуры метаданных на основе спецификаций требований, к которым относятся в том числе дискурсы. Примером описания может служить следующий текст: «Существует некоторый процесс инициализации, за которым могут скрываться последовательные подпроцессы загрузки контейнера с плитками и подпроцесс движения к начальной точке монтажа. Начало этого процесса задаётся некоторым внешним воздействием – старт укладки плитки». На рисунке 3 отмечены концепты и отношения, полученные на основе QA-анализа данного текста. Фрагмент QA-анализа данного дискурса:

**Qn.** Можно ли рассматривать процесс инициализации как состояние?

**Ан.** Процесс инициализации рассматривается как одно из состояний разрабатываемой СЛУ роботами-плиткоукладчиками. ...

**Qn.m.** Что происходит с роботом после завершения инициализации?  
**An.m.** После завершения инициализации робот начинает движение вперёд. ...

На рисунке 5 представлен фрагмент кода программы автоматизации на языке C, сгенерированного на основе ОС уровня реализации.

ОС уровня реализации формируются автоматизированно, за счёт реализации функций интерпретации, ставящих понятия уровня проектных решений в соответствие понятиям уровня реализации.

Интерфейс формирования онтологии реализации управляется ОМ – при добавлении каждого нового понятия в онтологию реализации он автоматически связывается с соответствующим понятием онтологии проектирования отношением «наследоваться от».

Имена понятий уровня реализации генерируются средствами автоматического перевода в соответствии с выбранным типом (*CamelCase*, *lowerCamelCase* и *snake\_case*), которые могут быть изменены.

Семантические связи между понятиями уровня реализации наследуются из ОС уровня проектных решений, часть из которых (например, связи «быть предикатом перехода», «переходить в», «вызывать», «предшествовать») служит логической основой для генерации кода.

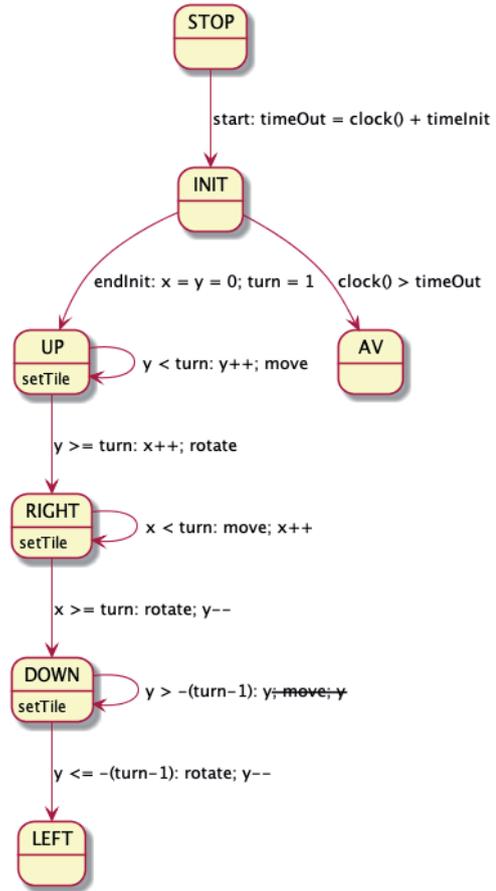
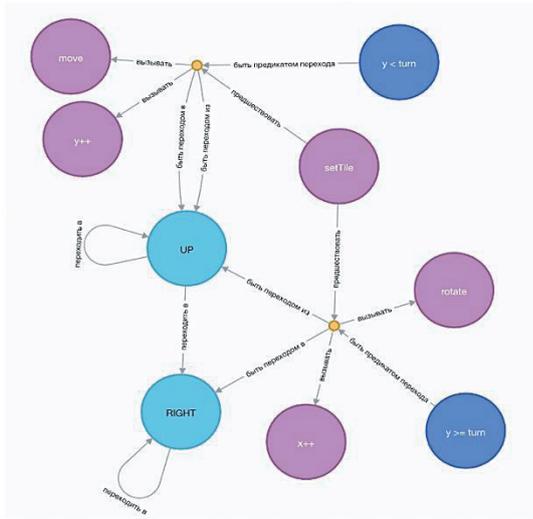


Рисунок 4 – Фрагмент сгенерированной на основе ОС диаграммы состояний



```
void step(void) {
    switch (state) {
        case UP:
            setTile(); /* Укладывание плитки */
            if (y < turn) { /* Справа от плиткоукладчика есть уложенные плитки */
                state = UP;
                y++; /* Увеличение значения координаты y на одну единицу */
                move(); /* Перемещение к следующему плиткоместу */
            }
            if (y >= turn) { /* Справа от плиткоукладчика нет уложенных плиток */
                state = RIGHT;
                x++; /* Увеличение значения координаты x на одну единицу */
                rotate(); /* Поворот */
            }
            break;
        case STOP:
            if (!start) { /* Нет сигнала на старт укладки плитки */
                state = STOP;
            }
            if (start) { /* Получен сигнал на старт укладки плитки */
                state = INIT;
                init(); /* Выполнение инициализации */
                timeOut = clock() + timeInit; /* Установка ограничения на пребывание в состоянии инициализации */
            }
            break;
    }
}
```

Рисунок 5 – Фрагмент сгенерированного на основе ОС исходного кода на языке C

### 3.3 Сокращение трудозатрат на перепроектирование за счёт онтологического моделирования

Формирование ОС на каждом этапе проектирования приводит к дополнительным трудозатратам, но при этом удаётся уменьшить трудозатраты, порождаемые семантическими разрывами. Оценить эффект от сокращения объёма исправлений проектных решений, связанных с этими разрывами, в общем виде вряд ли возможно.

Можно утверждать, что сквозное проектирование АС на основе онтологического моделирования сокращает трудозатраты на перепроектирование, вызванное изменением требований. В ОМ проекта показан путь от агрегата с изменёнными требованиями до тех агрегатов, которые специфицируют проектные решения всех этапов проектирования, вплоть до реализации. На основе экспериментов с разработкой СЛУ можно оценить различные виды трудозатрат, в том числе связанные с внесением изменений. При этом сокращение трудозатрат выражается функцией от количества изменённых требований:

$$f(x) = 1 - \frac{E_O^P + E_O^R x}{E^P + E^R x}, \quad (1)$$

где  $E^P$  – трудозатраты на разработку СЛУ до внесения изменений в требования без включения в проектный процесс онтологического моделирования,  $E_O^P$  – трудозатраты на разработку СЛУ до внесения изменений с применением онтологического моделирования;  $E^R$  и  $E_O^R$  – соответственно трудозатраты на перепроектирование вследствие возникновения необходимости внести изменения в требования, касающиеся логики функционирования СЛУ.

Для сравнения трудозатрат оценены проектные процедуры, являющиеся частью проектного процесса по разработке СЛУ (описание требования к СЛУ, построение UML-диаграммы, написание программного модуля, онтологическое специфицирование требования к проекту и др.). Оценки трудозатрат выражены в условных единицах, где за единицу принята простейшая проектная операция (описание одного требования к СЛУ), а остальные оценивались относительно неё экспертно с использованием чисел из ряда Фибоначчи [18]. Отдельно вычислены трудозатраты на реализацию проектного процесса до внесения изменений в требования, а также трудозатраты на реализацию изменений требований – оба подпроцесса рассматривались как с использованием средств онтологического моделирования, так и без него. Каждому из указанных подпроцессов соответствовал собственный набор проектных процедур. По результатам оценки построены зависимости, показанные на рисунке 6. Точками показано сокращение трудозатрат в процентах в соответствии с формулой (1).

Из рисунка 6 видно, что на начальных этапах проектного процесса требуются дополнительные трудозатраты на онтологическое моделирование, которые впоследствии компенсируются сокращением их на перепроектирование. При внесении значительного количества изменений (50 и более) сокращение трудозатрат достигает 30%.

Приведённые результаты подтверждают, что применение онтологического моделирования может сократить трудозатраты на перепроектирование при возникновении необходимости внесения изменений в требования. При этом, чем больше требований необходимо изменить, тем заметнее позитивные эффекты.

### Заключение

Наличие последовательных связей между ОС разных уровней позволяет осуществить *автоматизацию управления изменениями*: изменения, внесённые в онтологию требований, автоматически вносятся в онтологии проектных решений и реализации за счёт реализации функций интерпретации. Наличие программ автоматизации, обслуживающих генерирование артефактов проектирования на основе ОС, значительно *сокращает трудозатраты* специа-

листов на перепроектирование в ситуациях, когда после разработки части проектных решений и реализации исходного кода АС возникает потребность внести изменения в логику её функционирования.

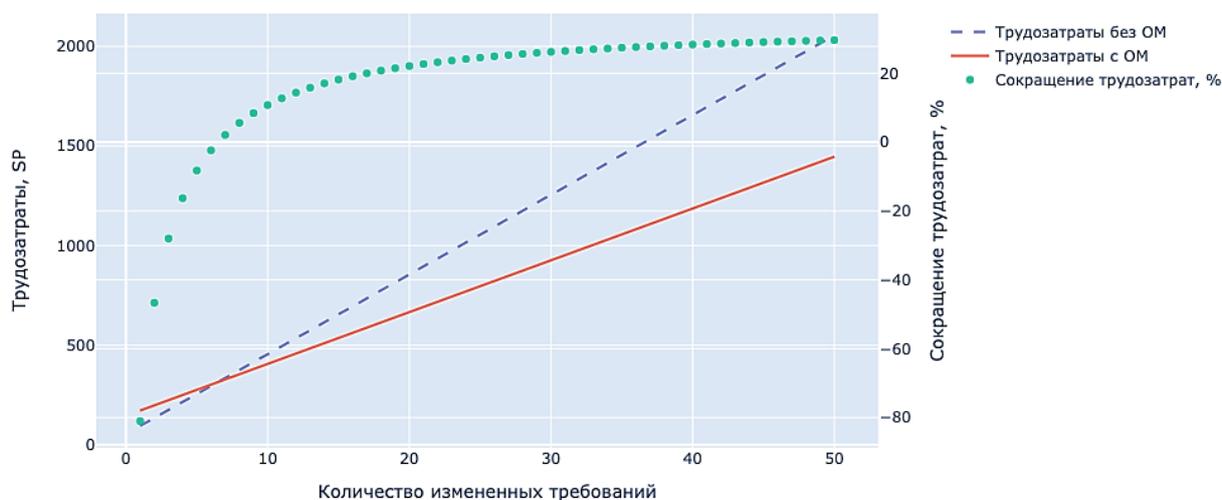


Рисунок 6 – Трудозатраты на проектирование СЛУ в условиях изменения требований

В результате достигается: *сокращение семантических разрывов*; обеспечение *концептуальной целостности, непротиворечивости и полноты* проектных решений; обеспечивается согласованность всех спецификаций и минимизируются ошибки, вызванные человеческим фактором.

## Благодарности

Авторы считают своим долгом отметить большой вклад д.т.н., профессора Петра Ивановича Соснина, ушедшего из жизни в 2020 году, инициатора работ и активного участника развития изложенных в статье идей.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №18-47-732012 и 18-47-730016).

## Список источников

- [1] ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на Автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. М.: Издательство стандартов. – 1991.
- [2] ГОСТ 34.602-89. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. М.: Издательство стандартов. – 1990.
- [3] **Hein, Andreas M.** Identification and Bridging of Semantic Gaps in the Context of Multi-Domain Engineering / Andreas M. Hein // Proceedings of 2010 Forum on Philosophy, Engineering & Technology. 2010. P.57-58.
- [4] **Minagawaa, M.** Study on BIM Utilization for Design Improvement of Infrastructure Project / M. Minagawaa, Sh. Kusayanagi // Proceedings of the 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). Procedia Engineering. 2015. P.431-437.
- [5] **Sikos, Leslie F.** The Semantic Gap / Leslie F. Sikos // Description Logics in Multimedia Reasoning. Springer, 2017. P.51-66.
- [6] **Bjarnason, E.** Requirements are slipping through the gaps — A case study on causes & effects of communication gaps in large-scale software development / E. Bjarnason, K. Wnuk, B. Regnell // Proceedings of the 2011 IEEE 19th International Requirements Engineering Conference. 2011. P.37-46.
- [7] **Bennett, R.** Designed for change: End-to-End arguments, Internet Innovation, and the Net Neutrality debate / R. Bennett // Information Technology and Innovation Foundation. P.7,11. Retrieved 11 September 2017.

- [8] **Негода В.Н.** Онтологическое моделирование в проектировании средств логического управления / В.Н. Негода, А.А. Куликова // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2021» («ИС & ИТ-2021», «IS&IT'21»). Научное издание. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2021. С.93-98.
- [9] **Шалыто, А.А.** Логическое управление: Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов / А.А. Шалыто. – СПб.: Наука. 2000. 780 с.
- [10] **Dorst, K.** The Nature of Design Thinking / K. Dorst // DTRS8 Interpreting Design Thinking: Design Thinking Research Symposium Proceedings. 2009. P.131–139.
- [11] **Razavian, M.** Reflective Approach for Software Design Decision Making / M. Razavian, A. Tang, R. Capilla, P. Lago // Proc. of the first symposium “Qualitative Reasoning about Software Architectures”. 2016. P.19-26.
- [12] **Hüger, F.** DT@Scrum: Integrating Design Thinking with Software Development Processes / F. Häger, T. Kowark, J. Krüger, Ch. Vetterli, F. Übernickel, M. Uflacker // Design Thinking. Understanding Innovation. 2014. P.263-289.
- [13] **Sosnin, P.** Ontological Support of Design Thinking in Developments of Software Intensive Systems / P. Sosnin, A. Pushkareva, V. Negoda // Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. (eds) Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'17). ITI 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, v.679. Springer, Cham. P.159-168.
- [14] **Соснин, П.И.** Управление знаниями и опытом в проектной организации / П.И. Соснин, В.А. Маклаев, А.А. Перцев. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. 213 с.
- [15] **Соснин, П.И.** Вопросно-ответное программирование человеко-компьютерной деятельности / П.И. Соснин. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. 240 с.
- [16] **Брукс, Ф.** Проектирование процесса проектирования: записки компьютерного эксперта. Пер. с англ. — М.: ООО “И.Д. Вильямс”, 2013. 464 с.
- [17] **Sosnin, P.** An Architectural Approach to the Precedent-Oriented Solution of Tasks in Designing a Software Intensive System / P. Sosnin, S. Shumilov, A. Ivasev // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2019, 11623 LNCS. P.97–107.
- [18] **Городецкий, В.И.** Искусственный интеллект – наука и информационная технология: настоящее и будущее / В.И. Городецкий // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении». 2020. С.3-14.
- [19] **Grenning, J.** Planning Poker or How to avoid analysis paralysis while release planning / J. Grenning. <https://wingman-sw.com/articles/planning-poker>.

## Сведения об авторах



**Негода Виктор Николаевич**, 1949 г. рождения. Окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института, профессор кафедры «Вычислительная техника» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, монографии и авторские свидетельства в области проектирования встроенных систем контроля и управления. Область научных интересов – автоматизация проектирования логического управления техническими системами. Author ID (RSCI): 393758; Author ID (Scopus): 57196052478. [nvn@ulstu.ru](mailto:nvn@ulstu.ru).

**Куликова Анна Александровна**, 1992 г. рождения. Окончила Ульяновский государственный технический университет в 2014 г. и аспирантуру по специальности «Системы автоматизации проектирования (промышленность)» в УлГТУ в 2020 г. Ассистент кафедры «Вычислительная техника» Ульяновского государственного технического университета. Область научных интересов – проектирование систем с программным обеспечением, использование онтологий в проектировании. Author ID (RSCI): 974649; Author ID (Scopus): 57206900994; Researcher ID (WoS): T-4662-2017. [a.push1206@gmail.com](mailto:a.push1206@gmail.com).



Поступила в редакцию 30.10.2021, после рецензирования 10.11.2021. Принята к публикации 10.12.2021.

## End-to-end design of automated systems based on ontologies

V.N. Negoda, A.A. Kulikova

*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

### Abstract

Currently, a large number of studies are being carried out on the use of ontologies in the development of automated systems. Ontological modeling improves the efficiency of the software development process. The division of labor in the development of automated systems contributes to the appearance of semantic gaps between the phases of the design process. The practice of using a wide range of reusable design artifacts is a risk factor for violation of conceptual integrity, consistency and completeness of the developed design solutions. The article proposes a new approach to ontological modeling of automated systems, which serves the design process for their development at all stages of design up to implementation; and a new structure of metadata of ontological specifications of automated systems, which allows taking into account semantically important entities and features of the system being developed. It is shown that the use of this approach significantly reduces labor costs in the design of a complex automated system in the face of changing requirements at different stages of system creation. The use of ontological models in the design process helps to increase the conceptual integrity, consistency and completeness of the developed design solutions.

**Keywords:** *design automation, automated systems, end-to-end design, question-answer modeling, project ontology.*

**Citation:** *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.*

**Acknowledgment:** The authors consider it their duty to note the great contribution of Doctor of Technical Sciences, Professor Petr Sosnin, who passed away in 2020, the initiator of the work and an active participant in the development of the ideas outlined in the article. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 18-47-732012 и 18-47-730016).

### List of figures

- Figure 1 – IDEF0 diagram of the design process for the development of automated systems
- Figure 2 – Trajectory diagram of a tile-laying robot
- Figure 3 – Project ontology fragment of the tile-laying robot logical control system at the level of design solutions
- Figure 4 – State diagram fragment generated based on ontological specifications
- Figure 5 – C code fragment generated based on ontological specifications
- Figure 6 – Labor costs on control system design in the context of changing requirements

### References

- [1] State Standard 34.601-90. Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of development [In Russian]. Moscow, Standartinform Publ., 1991.
- [2] State Standard 34.602-89. Information technology. Set of standards for automated systems. Technical directions for automated system making [In Russian]. Moscow, Standartinform Publ., 1990.
- [3] **Hein Andreas M.** Identification and Bridging of Semantic Gaps in the Context of Multi-Domain Engineering. Proceedings of 2010 Forum on Philosophy, Engineering & Technology. 2010. P.57-58.
- [4] **Minagawaa M, Kusayanagi Sh.** Study on BIM Utilization for Design Improvement of Infrastructure Project. Proceedings of the 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). Procedia Engineering. 2015. P. 431-437.
- [5] **Sikos Leslie F.** The Semantic Gap. Description Logics in Multimedia Reasoning. Springer, 2017. P.51-66.
- [6] **Bjarnason E, Wnuk K, Regnell B.** Requirements are slipping through the gaps — A case study on causes & effects of communication gaps in large-scale software development. Proceedings of the 2011 IEEE 19th International Requirements Engineering Conference. 2011. P.37-46.
- [7] **Bennett R.** Designed for change: End-to-End arguments, Internet Innovation, and the Net Neutrality debate. *Information Technology and Innovation Foundation*. P.7,11. Retrieved 11 September 2017.

- [8] **Negoda VN, Kulikova AA.** Ontological Modeling in Logical Control Systems Design [In Russian]. Proc. of the International Congress on Intelligent Systems and Information Technologies IS&IT'21. Taganrog, 2021. P. 93-98.
  - [9] **Shalygo AA.** Logical Controlling: Methods for Hardware and Software Implementation of Algorithms [In Russian]. Saint Petersburg: Science. 2000. 780 p.
  - [10] **Dorst K.** The Nature of Design Thinking. DTRS8 Interpreting Design Thinking: Design Thinking Research Symposium Proceedings. 2009. P.131–139.
  - [11] **Razavian M, Tang A, Capilla R, Lago P.** Reflective Approach for Software Design Decision Making. Proc. of the first symposium "Qualitative Reasoning about Software Architectures". 2016. P.19-26.
  - [12] **Häger F, Kowark T, Krüger J, Vetterli Ch, Übernickel F, Uflacker M.** DT@Scrum: Integrating Design Thinking with Software Development Processes. Design Thinking. Understanding Innovation. 2014. P.263-289.
  - [13] **Sosnin P, Pushkareva A, Negoda V.** Ontological Support of Design Thinking in Developments of Software Intensive Systems. Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. (eds). Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17). IITI 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, v.679. Springer, Cham. P.159-168.
  - [14] **Sosnin PI, Maklaev VA, Pertsev AA.** Knowledge and Experience Management in Project Organization [In Russian]. Ulyanovsk: UISTU, 2018. 213 p.
  - [15] **Sosnin PI.** Question-and-answer Programming of Human-Computer Activity [In Russian]. Ulyanovsk: UISTU, 2010. 240 p.
  - [16] **Brooks F.** The Design of Design: Essays from a Computer Scientist [In Russian]. Moscow, 2013. 464 p.
  - [17] **Sosnin P, Shumilov S, Ivasev A.** An Architectural Approach to the Precedent-Oriented Solution of Tasks in Designing a Software Intensive System. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2019, 11623 LNCS. P.97–107.
  - [18] **Gorodetsky VI.** Artificial Intelligence - Science and Information Technology: Present and Future [In Russian]. Materials of the conference "Information technologies in management". 2020. P.3-14.
  - [19] **Grenning J.** Planning Poker or How to avoid analysis paralysis while release planning. <https://wingman-sw.com/articles/planning-poker>.
- 

## About the authors

**Viktor Nikolaevich Negoda** (b. 1949) PhD, graduated from the Radio Engineering department of the Ulyanovsk Technical Institute, is a professor at the Computer Science Department in Ulyanovsk State Technical University. He has publications in the area of computer-aided design of embedded systems. Computer-aided design of technical systems with logical control is his area of expertise. Author ID (RSCI): 393758, Author ID (Scopus): 57196052478. [nvn@ulstu.ru](mailto:nvn@ulstu.ru).

**Anna Aleksandrovna Kulikova** (b. 1992), graduated from the Ulyanovsk State Technical University in 2014. She is an assistant at the Computer Science Department in Ulyanovsk State Technical University. Automated design of software systems, using ontologies in design is the area of expertise. Author ID (RSCI): 974649; Author ID (Scopus): 57206900994; Researcher ID (WoS): T-4662-2017. [a.push1206@gmail.com](mailto:a.push1206@gmail.com).

---

*Received October 30, 2021. Revised November 10, 2021. Accepted December 10, 2021.*

---

## Семантические модели для оценки влияния комплекса факторов на развитие заболеваний

В.В. Грибова, Д.Б. Окунь, Е.А. Шалфеева

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

### Аннотация

Представлен анализ подходов и решений к прогнозу состояний, развития заболеваний и оценке рисков. Показано, что реализация программных сервисов на различных платформах затрудняет возможность их комплексного использования и выбор между имеющимися решениями. Это обусловило актуальность создания единой семантической модели заболеваний, интегрирующей различные методы и подходы и аккумулирующей знания о рисках и прогнозе в едином информационном пространстве. Предложена новая семантическая модель для учёта влияния комплекса факторов на развитие различных событий, угрожающих здоровью и жизни. Особенностью модели является независимость от конкретного заболевания либо группы заболеваний, что позволяет использовать её в различных разделах медицины. Данная модель апробирована на платформе *IACPaaS*, реализован программный решатель, позволяющий на основе базы знаний и анализа электронной медицинской карты пациента генерировать понятное для врачей объяснение. Применение новой модели для формирования знаний показано на примере оценки рисков и прогноза сердечно-сосудистых событий.

**Ключевые слова:** семантическая модель, оценка риска заболеваний, база знаний, медицинские интеллектуальные системы, система поддержки решений.

**Цитирование:** Грибова, В.В. Семантические модели для оценки влияния комплекса факторов на развитие заболеваний / В.В. Грибова, Д.Б. Окунь, Е.А. Шалфеева // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.464-477. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-464-477.

### Введение

Среди основных задач, решаемых практикующим врачом, есть как диагностика и лечение заболеваний, так и сопутствующие им: мониторинг, оценка состояния, определение рисков заболеваний и жизнеопасных состояний, осложнений и смерти, перспектив развития, возникновения новых заболеваний, течения имеющихся заболеваний; прогноз качества жизни, раннее выявление заболеваний, оценка степени риска летальности и т.п.

Для поддержки решения таких задач применяют различные подходы и методы, начиная от простых расчётных формул (например, калькуляторы оценки риска сердечно-сосудистых заболеваний – ССЗ), до более сложных, основанных на методах математического моделирования (ММ), машинного обучения (МО) и искусственного интеллекта. Используемые методы имеют свои особенности, преимущества и недостатки. Наиболее распространёнными методами, связанными с прогнозом и оценкой рисков, состояний и т.п., являются методы, основанные на математическом моделировании и МО, зачастую они демонстрируют хорошие прогнозные результаты [1-5]. Методы на основе знаний (наборов качественных и количественных признаков, факторов, причинно-следственных и временных связей, часто с использованием нечёткой логики и основанные на моделях мягких вычислений), применяются реже, но также показывают достоверные результаты [6-8].

При решении сходных задач часто применяют разнообразные методы их решения, например, для оценки рисков ССЗ - различные шкалы (*SCORE*, *PROCAM*, *QRISK*, *FINRISK* и

др.), методы ММ и МО [1-4], реализованные на различных платформах. Это затрудняет выбор между имеющимися решениями и возможность их комплексного использования, поскольку большинство из них реализованы как отдельные сервисы, и если врач хочет использовать несколько сервисов, каждое решение требует ввода часто одной и той же информации. Как правило, результатом таких сервисов является вероятность события, состояния или заболевания, что недостаточно для принятия решений и врачу требуется объяснение либо схожая оценка вероятности при использовании других сервисов. Часть предложенных решений ориентирована на пациента и использует ограниченное количество параметров.

Указанные обстоятельства определяют актуальность создания единой семантической модели для оценки влияния комплекса факторов для прогноза и оценки рисков различных событий и заболеваний (далее – семантической модели), интегрирующей различные методы и подходы.

Целью данной работы является описание новой семантической модели и демонстрация её на примере оценки рисков и прогноза ССЗ.

## 1 Современное состояние сервисов

В разделе приведён обзор современного состояния сервисов в области оценки влияния комплекса факторов для прогноза и оценки рисков различных событий и заболеваний. Классификация программных средств данного назначения выполнена по следующим критериям.

### 1.1. Целевая аудитория: пациенты или врачи

Для пациентов в сервисах используются упрощённые наборы входной информации, позволяющей по доступным большинству пациентам признакам определить вероятность некоторого состояния или наступления некоторого события с генерацией полезных рекомендаций и предостережений [9-11].

### 1.2. Интеграция с электронной медицинской картой

Сервисы могут использовать информацию из истории болезни (ИБ), электронной медицинской картой (ЭМК) или быть реализованы как отдельно функционирующие сервисы. В первом случае сервисы (их немного) либо встроены в медицинские информационные системы, либо могут анализировать ЭМК, в том числе не полностью формализованные, имеющие компонент анализа текста (например, *Webiomed – WML.SymptomChecker, klinica.com*). Большинство сервисов реализованы как отдельные программы и от пользователя требуется онлайн заполнение формы для внесения результатов анализа, метрик (рост, вес, возраст, пол, частота сердечных сокращений - ЧСС), особенностей (курение, принимаемые препараты, наследственность и др.).

### 1.3. Количество анализируемых патологий

Большинство сервисов поддерживают анализ одной патологии (состояния или события); есть сервисы, поддерживающие анализ нескольких патологий. Например, сервис оценки кардиориска попутно может выявить хронические болезни почек (как фактора ССЗ) по результатам анализов [9-12].

#### 1.4. Количество поддерживаемых методик оценки/прогноза заболеваний

Обычно каждая методика реализована отдельным сервисом; редко имеется возможность делать оценку некоторого важного риска по двум методикам (см. например рисунок 1) [12].

#### 1.5. Метод оценки/прогноза

Можно выделить три метода для оценки комплекса факторов на развитие заболеваний и состояний, оценки персонафицированных рисков, наступления событий и т.п.

*Первый метод*, арифметический, представляется формулой расчёта наступления некоторого события или состояния. Типичными примерами являются [13, 14]: оценка риска смерти от ССЗ в ближайшие 10 лет по шкале *Score*, калькулятор *MELD* для оценки терминальных стадий заболеваний печени, калькулятор лимфомы Ходжкина, калькулятор оценки риска венозных тромбозных осложнений и др. На вход калькуляторов поступает ряд измерений или индексов признаков, факторов (например, фактор курение –

присутствует или отсутствует, иногда указание количества лет). Результатом работы такого калькулятора является вероятность наступления одного или нескольких событий, выраженная либо в числовой шкале (например, вероятность наступления смертельного исхода от ССЗ в течение ближайших 10 лет), либо в категориальной (качественной) шкале (например, риск или польза - значениями низкий, умеренный, высокий и т.п.). Такой калькулятор может иметь условия использования. Например, калькулятор *Score* не используется, если присутствует ряд заболеваний или пороговых значений признаков: установленный диагноз ССЗ; сахарный диабет и др. Возможно также указание на некоторые признаки, факторы и заболевания, например, для *Score* – это ожирение, малоподвижный образ жизни и др.

В шкалы обычно включаются хорошо изученные, легко определяемые показатели состояния здоровья пациента.

*Второй метод*, наиболее распространенный в настоящее время, использует ММ и МО. Его результатом является модель, основанная на логистической регрессии, нейросетевых алгоритмах и др. Типичными примерами являются модель прогнозирования развития ССЗ в течение 10 лет, прогнозирование смерти от ишемической болезни сердца (ИБС) и инсульта в течение 10 лет, прогнозирование осложнений у пациентов с сахарным диабетом 2 типа в течение 10 лет и др. [4, 5, 12]. Модели логистической регрессии иногда демонстрируют хорошую прогнозирующую ценность [3, 6]. Нейросетевые модели и системы определяют риски в виде вероятности [15-17]. Наиболее эффективно нейросетевые модели используются в области кардиологии [13, 17-20].

Для методов с обучением на множестве примеров и указанным заранее набором показателей пациента свойственна ограниченная применимость – требование к строго фиксирован-

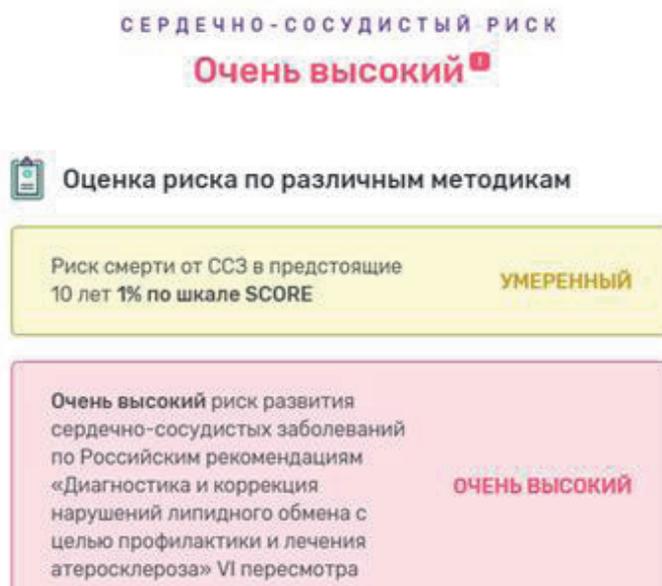


Рисунок 1 - Пример результата оценки риска ССЗ по различным методикам

ному набору параметров пациента [15]. Их число измеряется часто десятками, а отсутствие хотя бы одного в информации о пациенте может стать поводом отклонить метод.

В третьем методе используется подход на основе знаний, когда моделируется вероятность наличия какого-либо заболевания или состояния в настоящий момент времени. Типичными примерами являются многочисленные симптом-чекеры, системы диагностики заболеваний.

Иногда используется смешанный подход. Например, на первом этапе определяется состояние пациента на основе знаний, после чего выполняются вычисления по формуле.

К недостаткам сервисов, реализованных арифметическим способом или на основе методов ММ, относится отсутствие объяснений. Сервисы на основе знаний не всегда можно использовать для оценки или анализа будущих событий.

## 1.6. Генерация объяснения

Для выбора тактики лечения врачу необходимо объяснение ожидаемых исходов.

Для сервисов, реализованных на основе арифметических вычислений и методов МО, свойственно отсутствие обоснования решений – обнаруженных рисков, диагнозов и прогнозов (*Webiomed – WML.SymptomChecker, WebMD, Isabel*).

Для сервисов, использующих знания, объяснение может генерироваться. Например, у сервиса *Infermedica* [9] по каждому диагнозу из сформированного списка оно даётся в виде «Грипп. Умеренные доказательства – наличие симптомов: быстрое сердцебиение, головная боль, сухой кашель, ...). В некоторых случаях в качестве объяснения можно рассматривать описание типичных признаков, характеризующих состояние или заболевание. Объяснением могут являться вопросы на экране, на которые дан ответ «да» (см., например, *health.mail.ru*). Иногда формируется фрагментарный объясняющий ответ, например: «гнойный налет с миндалин не снимается. Можно предположить дифтерию» [21].

Системы поддержки принятия решения на основе онтологических знаний выдают детализированное объяснение [21-23]. Для его генерации используется информация о соответствии вариантов решения, получаемых из базы знаний (БЗ), информации об исходных данных задачи. Объяснение сводится к информации обо всех рассмотренных гипотезах при формировании решения, а также источниках знаний, по которым была создана БЗ. Понятность обеспечивается используемой терминологией и структурой (онтологией) объяснения. Объяснение, представленное в форме семантической сети, позволяет пользователю просмотреть любые его фрагменты с различной детализацией [22, 23].

## 1.7. Набор задач

Поддержка решения комплекса всех задач врача в полной мере нигде не реализована. На практике встречаются отдельные полезные сервисы, каждый из которых имеет свои входные данные, платформы, адреса и способы запуска. Врачу приходится инициировать каждый сервис отдельно и самостоятельно сравнивать результаты. Имеются сочетания двух или более задач для некоторой патологии: диагностика с лечением заболевания, диагностика с оценкой риска, прогноз заболевания с оценкой оценка рисков (смерти, осложнений) и др.

Есть ряд сервисов, которые врач вряд ли применит по отношению к пациенту: это вариант предполагаемого состояния в различные моменты времени (в течение 10 лет, через 30 лет...) со «сценарным прогнозированием», позволяющие задавать и менять влияющие условия его физиологических метрик, новых патологий или характеристик образа жизни [15].

## 1.8. Выводы

В настоящее время имеются различные прогнозные и оценочные модели, методы и платформы их реализации. Большинство решений представлено отдельными сервисами, реализующими одну прогнозную модель; есть примеры, объединяющие несколько моделей. Сервисы предназначены для врачей и пациентов (сервисы для пациентов используют ограниченный набор входных параметров). Сервисы (реализованные на основе знаний), как правило, генерируют объяснения/рекомендации.

Применение методов МО, ММ, инженерии знаний для решения сходных задач, делает актуальным их объединение в единый сервис, который бы позволил интегрировать методы решения задачи различными методами с генерацией объяснений полученных результатов. Интеграция таких методов с ИБ или ЭМК обеспечит возможность в фоновом режиме производить оценивание пациента при появлении новых данных о нём в ИБ или ЭМК. Учитывая, что задачи оценки рисков, прогноза состояния/заболевания пациентов актуальны для большого числа состояний и заболеваний [1-6, 14, 22, 24-26], такая модель не должна зависеть от конкретного заболевания, быть единой для различных состояний и заболеваний, что обеспечит её масштабируемость и позволит развивать функциональность системы.

## 2 Моделирование рисков развития заболеваний на основе инженерии знаний

Семантическое моделирование с помощью современных методов инженерии знаний позволяет представлять разные типы знаний о заболеваниях. Одни показывают зависимость состояний организма от сочетания наблюдаемых свойств и влияющих факторов (или вариантов развития патологий в зависимости от известных факторов), другие математически выражают зависимости показателей здоровья.

Для интеграции вариантов описания рисков заболеваний и альтернативных способов их определения предлагается следующая модель:

$\{ \langle \text{Заболевание/патологическое состояние} \rangle_i, \langle \{ \text{риск, [имя/автор методики,] исходные данные, [условия применимости], способ определения} \rangle_{ij} \}$ .

Элементы модели:

*Заболевание/патологическое состояние* – имя заболевания или патологического состояния, для которого делается риск либо вычисляется прогноз.

*Риск* =  $\langle \text{вид угрозы, вероятность угрозы} \rangle$ ,

*вид угрозы* = (риск появления | риск перехода в тяжёлую стадию | прогноз продолжительности жизни | риск неблагоприятного исхода (смерти));

*вероятность угрозы* = (Очень высокий риск | Высокий риск | Умеренный риск | Низкий риск | Отсутствие риска).

*Исходные данные* – предикторы, используя которые вычисляется риск или угроза:

*Исходные данные<sub>ij</sub>* = {Наблюдение<sub>ij</sub>}.

Каждый элемент исходных данных (наблюдение) может быть нетемпоральным и темпоральным. Для нетемпоральных исходных данных описание имеет следующий вид:

*Наблюдение* = (Фактор | Признак | Событие),

для темпоральных дополнительно описывается временная характеристика:

*Наблюдение* =  $\langle \text{Фактор | Признак | Событие} \rangle [ \text{временная характеристика} ]$ .

К факторам относятся метрики пациента, вредные привычки, имеющиеся заболевания и пр. Событием может быть лечебная процедура, операция, контакт с больным, с веществом и др. Признаки – это лабораторные или инструментальные исследования пациента, жалобы и другие показатели состояния организма пациента, наблюдаемые к моменту определения риска или прогноза.

При описании рисков заболеваний в исходных данных часто достаточно перечислить названия наблюдений, но надёжнее добавлять к ним ожидаемые диапазоны значений. Для

определения риска у конкретного пациента используют сведения о нём: набор исходных данных – названия наблюдений со значениями наблюдений.

Факторы описываются именем и диапазоном значений:

*Фактор* = <имя/название фактора, диапазон значений>.

Событие описывается своим именем, возможно, имеет уточняющие параметры (с именем и значением):

*Событие* = <название, {имя параметра, диапазон значений}>.

Значения бывают двух типов – количественные (числовые) с единицами измерения (ед.изм.) и качественные (строковые, категориальные).

*Диапазон значений* = ({значением категориального типа} | <числовой диапазон, ед.изм.>)

Признак может быть простым или составным. Простой признак определяется своим именем и значением (например, Изжога – имеется или нет), составной признак имеет имя, характеристику и значение (например, Боль в грудной клетке с Характеристиками Локализация, имеющая значение из диапазона: «за грудиной», «в подреберье» и т.п., Периодичность и т.д.).

*Простой признак* = название признака, диапазон значений.

*Составной признак* = название признака,

{название характеристики/элемента, диапазон значений}.

Временная характеристика – интервал времени или числовое значение, в течение которого фактор/событие/признак наблюдались или происходили. Например, <операция ЧКВ, длительность = 2 часа>.

Способ определения (величины) задаёт как вычисляется данный прогноз/риск по сведениям о конкретном пациенте:

*способ определения* = (декларативные знания для распознавания угрозы | вычисляемая величина).

Вычисляемая прогнозная шкала может опираться на формулу с вычислением, математическую модель, модель МО (стохастический градиентный бустинг| нейросеть или др.) или на другой способ получения вероятности риска, возможно явно показывающий вклад каждого предиктора в итоговую величину. Часто вычисленным значениям сопоставляются градации некоторой экспертной шкалы.

## 2.1 Модель вычисляемых прогнозных шкал

Если способ получения результата – модель МО или формула вычисления риска или прогноза, то в семантической модели задаются исходные данные, полученный результат, а в качестве способа его определения даётся ссылка на модель или формулу, по которой вычисляется результат. Выходные данные могут иметь различную структуру и способ описания. Часто результатом является градация по модели шкалы значений согласно предлагаемой методике.

*Вычисляемая величина* = (адрес или способ инициации вычислителя вероятности | формула вычисления | способ накопления баллов).

*Вероятность угрозы* = {градация (по шкале)k, нижняя границаk величины, верхняя границаk величины}.

Часто применение шкалы состоит в подсчёте количества баллов (нескольких признаков). При этом необходимо знать определения используемых в шкале признаков. Детальное изучение прогностической ценности каждого фактора, включённого в шкалу, может помочь в принятии оптимального клинического решения.

Для определения риска с использованием калькулятора оценки риска осложнений задаются веса (баллы) для отдельных наблюдений, участвующих в накоплении баллов:

*способ накопления баллов* = {баллы, {(соответствующее баллу) наблюдениеij}}.

Для установления вероятности угрозы *градациям по шкалам* ставятся *нижняя граница* величины и *верхняя граница* величины, которыми являются минимальный суммарный балл и максимальный суммарный балл.

С помощью математических методов, например, регрессионного анализа, производится выделение наиболее значимых для прогноза факторов и строится шкала, адаптированная для практики. Предполагается, что готов вычисляющий сервис (агент) и известны правила передачи ему параметров (наблюдений пациента).

*Адрес или способ инициации вычислителя вероятности = ссылка на вычисляющего программного агента, последовательность параметров со значениями.*

Формула для вычисления может быть задана явно. Определены структура и правила внесения формул для вычисления по набору исходных данных, наблюдаемых у пациента. Используется конструктор формулы через термы-переменные, константы и арифметические термы (сумма, произведение, частное, возведение в степень, логарифм и пр.). Модель связывает наблюдения пациента с параметрами запроса на вычисление по сконструированной формуле.

## 2.2 Модель заболеваний

Модель явно описанных знаний для распознавания имеет вид

*декларативные знания для распознавания угрозы =*  
*{условие на наблюдение  $jpr$  |  $n=1, N$  [, минимальное количество  $jr < N$ ]}>.*

(Примечание. Некоторые знания не уточняют вероятность угрозы, а указывают её наличие («угроза  $j$  имеется»). «Угроза отсутствует» обычно специально не описывается. Примером «Угроза имеется» является («Риск сердечно-сосудистой смертности» + «имеется»).

*Условие на наблюдение = название наблюдения,*

*(значение категориального\перечисляемого типа | <число, ед.изм. | Тренд >*

*| {название характеристики, (значение категориального типа | <число, ед.изм.> | Тренд)})*

*[, условие на время измерения].*

В некоторых случаях знания об угрозе охватывают временные отношения между наблюдаемыми состояниями в периодах развития разной длительности и эффекты лечебных воздействий:

*<угроза  $j$  имеется – {{Фактор  $i$ ,}} {(Период  $i$ , Интервал длительности  $i$ ),*

*{Условие на наблюдение  $jk$  |  $k=1, N$  [, минимальное количество  $j < N$ ]}.*

На основе представленной модели на платформе *IACPaaS* [27-29] разработана онтология (см. рисунок 2).

## 3 Разработка БЗ

Семантические модели, реализованные на платформе *IACPaaS*, позволяют формировать разные типы знаний в любых областях медицины и интегрировать их в процессе поддержки решения важных задач прогноза, оценки состояния и рисков неблагоприятных процессов.

В качестве примера приведено описание БЗ по оценке рисков болезней системы кровообращения (см. рисунок 3). Наиболее востребованы БЗ оценки риска развития ССЗ (см. рисунок 4). Если способом вычисления результата является формула, то в БЗ создаётся модель вычисления, либо задаётся ссылка на агент, производящий вычисления (см. рисунок 5).

### Заключение

Определение рисков заболеваний, прогноз возможных осложнений, смерти, исхода лечения являются неотъемлемыми составляющими практикующего врача. Для помощи ему в

повседневной деятельности предложен набор моделей и методов, основанных как на достаточно простых вычислениях (калькуляторах), так и на более сложных методах ММ, МО и искусственного интеллекта.

По ряду заболеваний (например, ССЗ) существует большое количество моделей, что затрудняет их выбор и использование, поскольку большинство решений представлено отдельными сервисами.

Для объединения различных подходов к решению практических задач, аккумулирования знаний в едином информационном пространстве предложена семантическая модель для оценки влияния комплекса факторов на развитие заболеваний и оценки персонафицированных рисков. Особенностью модели является независимость от конкретного заболевания либо группы заболеваний, что позволяет использовать её как для конкретного заболевания, так и для произвольной группы заболеваний. Данная модель реализована на платформе *IACPaas*. На платформе реализован решатель, интегрированный с ИБ и ЭМК, позволяющий на основе БЗ и анализа всех разделов медицинских документов (ИБ, ЭМК) генерировать объяснение.

Возможность объединения на основе онтологии моделей прогноза, оценки рисков и др. по различным заболеваниям позволяет комплексно решать важные задачи практической медицины. При этом генерируется объяснение в терминах, понятных врачу с указанием источника, по которому применённые знания формировались.

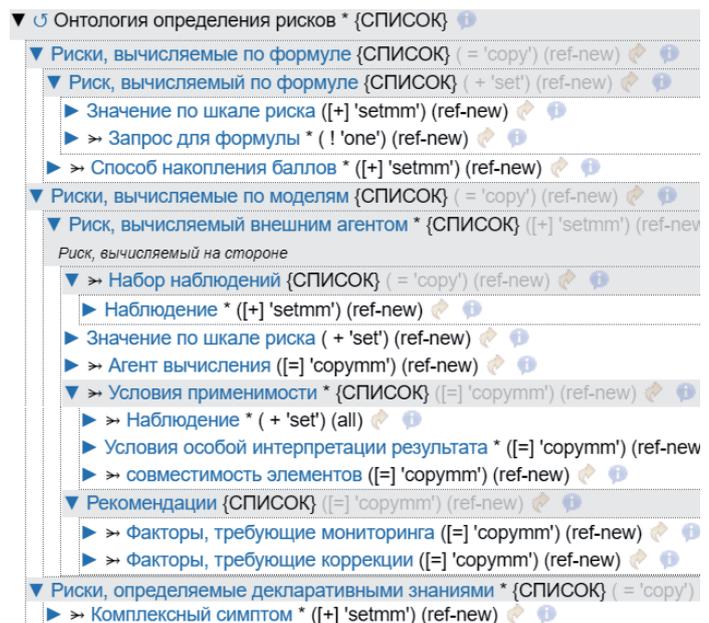


Рисунок 2 - Онтология знаний о связи рисков заболеваний с их показателями [30]

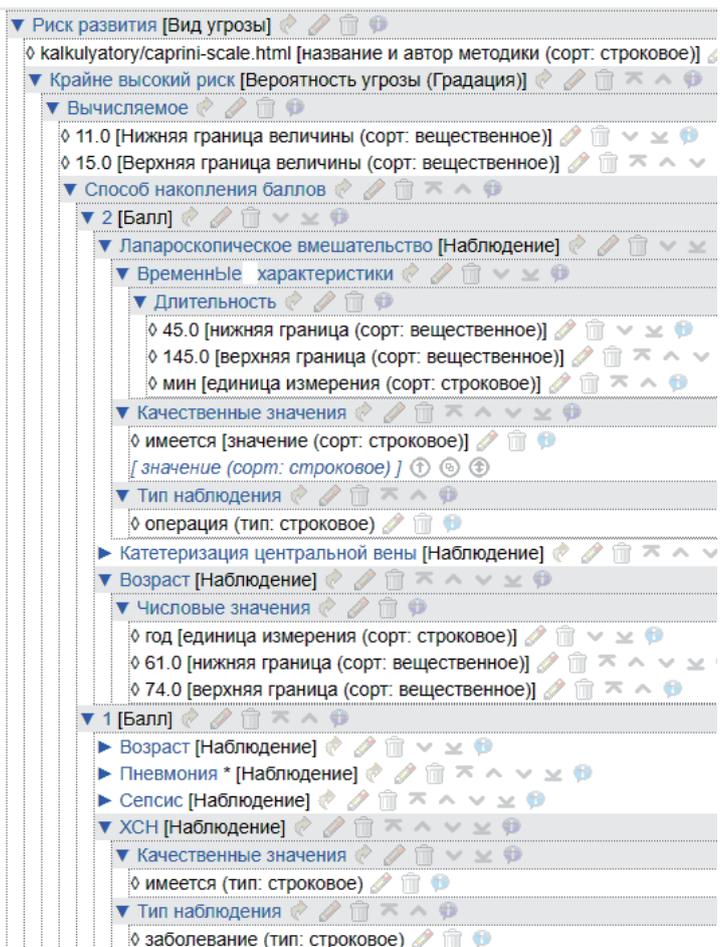


Рисунок 3 - Скриншот фрагмента БЗ на платформе *IACPaas* по оценке рисков венозного тромбоза

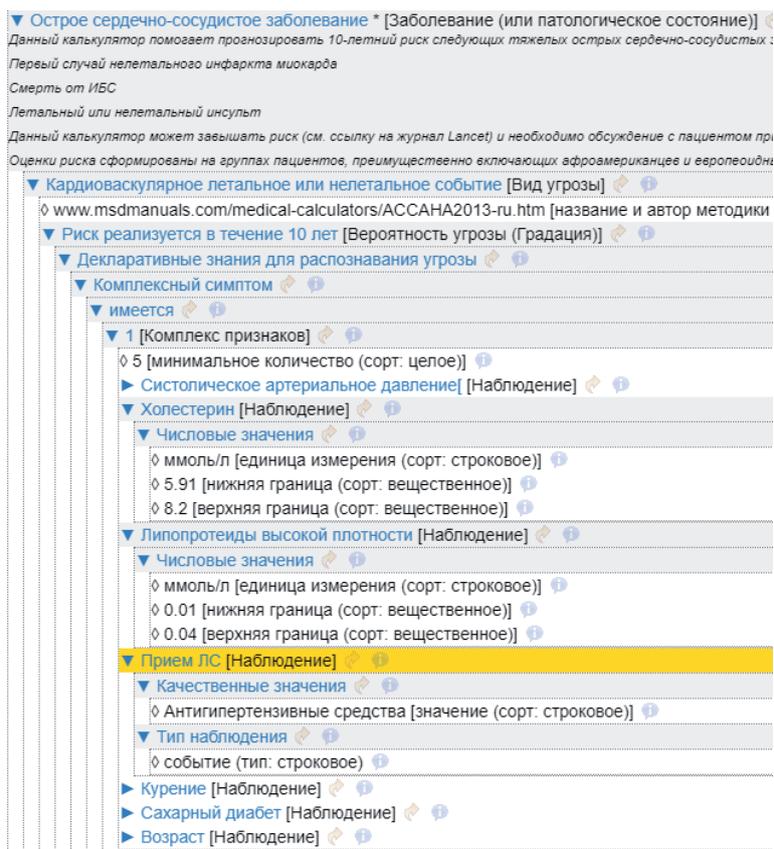


Рисунок 4 - Скриншот фрагмента БЗ на платформе IACPaaS по оценке рисков ССЗ

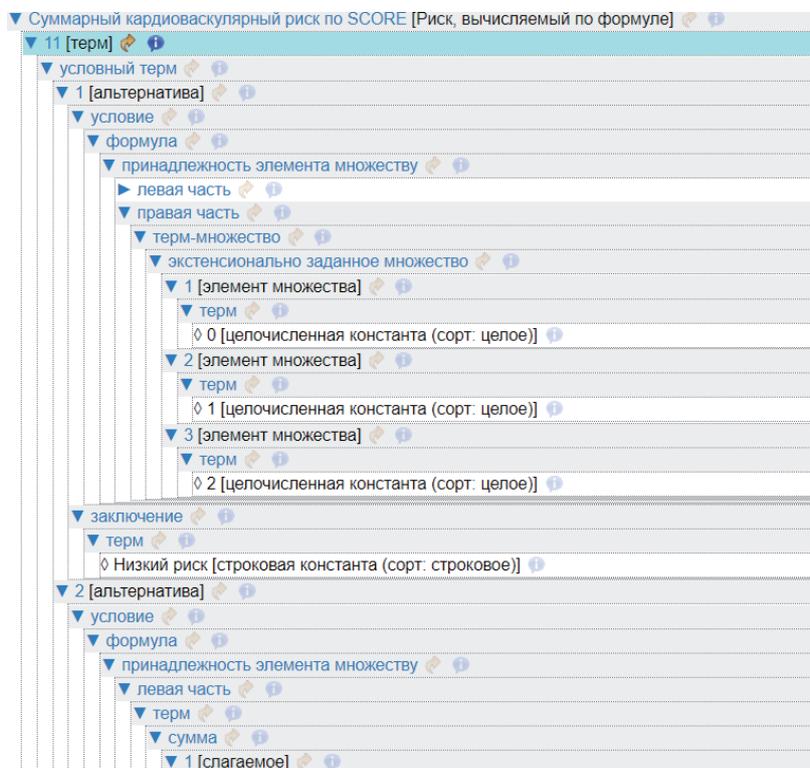


Рисунок 5 - Скриншот фрагмента БЗ на платформе IACPaaS по вычислению сердечно-сосудистого риска по формуле

## Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты 18-29-03131 и 19-29-01077.

## Список источников

- [1] **Шахгельдян, К.И.** Оценка предиктивного потенциала дооперационных факторов риска фибрилляции предсердий у больных ишемической болезнью сердца после коронарного шунтирования / К.И. Шахгельдян, В.Ю. Рублев, Б.И. Гельцер, Б.О. Щеглов, В.Г. Ширококов, М.К. Духтаева, К.В. Чернышева // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2020. Т.35. № 4. С.128-136. DOI:10.29001/2073-8552-2020-35-4-128-136.
- [2] **Бродская, Т.А.** Оценка предиктивного потенциала факторов сердечно-сосудистого риска и их ассоциаций с жесткостью артерий у лиц европейской и корейской этнических групп / Т.А. Бродская, В.А. Невзорова, К.И. Шахгельдян, Б.И. Гельцер, Д.А. Вражнов, Ю.В. Кистенев // Российский кардиологический журнал. 2021; 26(5): 4230. DOI:10.15829/1560-4071-2021-4230.
- [3] **Гельцер, Б.И.** Методы машинного обучения в прогнозировании летальных исходов в стационаре у больных ишемической болезнью сердца после коронарного шунтирования / Б.И. Гельцер, К.И. Шахгельдян, В.Ю. Рублев, В.Н. Котельников, А.Б. Кригер, В.Г. Ширококов // Кардиология. 2020, 10(60): с.38-46. DOI:10.18087/cardio.2020.10.n1170.
- [4] **Мун, С.А.** Регрессионный анализ в медико-биологических исследованиях / С.А. Мун, А.Н. Глушов, Т.А. Штернис, С.А. Ларин, С.А. Максимов // Кемерово: Кемеровская государственная медицинская академия, 2012. 119 с.
- [5] **Гельцер, Б.И.** Результаты моделирования должных величин силы дыхательных мышц на основе метода искусственных нейронных сетей / Б.И. Гельцер, В.Н. Котельников, К.И. Шахгельдян, И.Г. Курпатов // Российский физиологический журнал им. И.М.Сеченова. 2018; 104 (9): 1065–1074. DOI:10.7868/S0869813918090058.
- [6] **Акопян, В.С.** Комплексная модель оценки риска развития и прогрессирования возрастной макулярной дегенерации / В.С. Акопян, Н.С. Семенова, Е.А. Новикова, А.Г. Тоницкий, И.Н. Нечаев // Офтальмология, 2012, Т. 9, № 3. DOI:10.18008/1816-5095-2012-3-52-56.
- [7] **Iniesta, R.** Combining clinical variables to optimize prediction of antidepressant treatment outcomes / R. Iniesta, K. Malki, W. Maier, M. Rietschel, O. Mors, J. Hauser, et al. // *J Psychiatr Res.* (2016) 78: 94–102. DOI:10.1016/j.jpsychires.2016.03.016.
- [8] **Medeiros, F.A.** Combining structural and functional measurements to improve detection of glaucoma progression using Bayesian hierarchical models / F.A. Medeiros, M.T. Leite, L.M. Zangwill, R.N. Weinreb // *Investig Ophthalmol Vis Sci.* 2011; 52: 5794-5803.
- [9] Symptomat: Diagnostic technology is powered by Infermedica. – <https://symptomate.com/diagnosis/#0-66>.
- [10] WebMD: Logo for WebMD Symptom Checker WITH BODY MAP. – <https://symptoms.webmd.com/default.htm>.
- [11] Isabel: The Symptom Checker doctors use and trust. <https://symptomchecker.isabelhealthcare.com/>.
- [12] Webiomed. Демонстрационное приложение для оценки сердечно-сосудистого риска: Оценка сердечно-сосудистого риска. <https://webiomed.ai/dhra/>.
- [13] **Kwon, J.M.** Deep-learning-based risk stratification for mortality of patients with acute myocardial infarction / J.M. Kwon, K.H. Jeon, H.M. Kim, et al. *PLoS One.* 2019;14(10):e0224502. DOI:10.1371/journal.pone.0224502.
- [14] Калькулятор для оценки риска ампутации конечности и пользы от реваскуляризации: Экспертные решения для предотвращения ампутаций нижних конечностей. – <https://kink.ru/specialistam/kalkulyator/>.
- [15] **Ясницкий, Л.Н.** Нейроэкспертная система диагностики, прогнозирования и управления рисками сердечно-сосудистых заболеваний / Л.Н. Ясницкий, Ф.М. Черепанов // Прикладная математика и вопросы управления. 2018. № 3. С.107-126. DOI: 10.15593/2499-9873/2018.3.08.
- [16] **Выучейская, М.В.** и др. Нейросетевые технологии в диагностике заболеваний (обзор) / М.В. Выучейская и др. // Журн. мед.-биол. исследований. 2018; 3 (6): 284–94. DOI: 10.17238/2542-1298.2018.6.3.284.
- [17] **Manyam, R.B.** Deep Learning Approach for Predicting 30 Day Readmissions after Coronary Artery Bypass Graft Surgery / RB Manyam, Y Zhang, W Keeling, et al.. *NeurIPS (ML4H)*. 2018; 222 ArXiv:abs/1812.00596.
- [18] **Chekroud, A.M.** Cross-trial prediction of treatment outcome in depression: a machine learning approach / A.M. Chekroud, R.J. Zotti, Z. Shehzad, R. Gueorguieva, M.K. Johnson, M.H. Trivedi, et al.. *Lancet Psychiatry* (2016) 3: 243–50. DOI: 10.1016/S2215-0366(15)00471-X.

- [19] **Kim, Y.J.** Deep learning-based prediction model of occurrences of major adverse cardiac events during 1-year follow-up after hospital discharge in patients with AMI using knowledge mining / Y.J. Kim, M. Saqlian, J.Y. Lee. Personal and Ubiquitous Computing. 2019; 23(4):485-94. DOI: 10.1007/s00779-019-01248-7.
- [20] **Hill, N.R.** Predicting atrial fibrillation in primary care using machine learning / N.R. Hill, D. Ayoubkhani, P. McEwan, et al. PLoS One. 2019; 14(11): e0224582. DOI:10.1371/journal.pone.0224582.
- [21] Карта симптомов: @Здоровье. <https://health.mail.ru/symptoms/>.
- [22] **Грибова, В.В.** Облачный сервис поддержки принятия решений в кардиологии на основе формализованных знаний / В.В. Грибова, М.В. Петряева, Е.А. Шалфеева // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2020. №4. С.32-38. DOI: 10.29001/2073-8552-2020-35-4-32-38.
- [23] **Грибова, В.В.** Облачная среда для поддержки клинической медицины и образования / В.В. Грибова, Ф.М. Москаленко, Д.Б. Окунь, М.В. Петряева // Врач и информационные технологии. 2016. №1. С.60-66.
- [24] **Kolek, M.J.** Genetic and clinical risk prediction model for postoperative atrial fibrillation / M.J. Kolek, J.D. Muehlschlegel, W.S. Bush, et al. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2015; 8(1): 25-31. - DOI: 10.1161/CIRCEP.114.002300.
- [25] **Inohara, T.** Risk stratification model for in-hospital death in patients undergoing percutaneous coronary intervention: a nationwide retrospective cohort study in Japan / T. Inohara, S. Kohsaka, K. Yamaji, et al. BMJ Open. 2019;9(5):e026683. DOI: 10.1136/bmjopen-2018-026683.
- [26] **Shahian, M.D.** STS 2018 adult cardiac risk models part 1 / M.D. Shahian, P. Jeffrey, B. Vinay, et al. Ann Thorac Surg. 2018; 105: 1411-8. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2018.03.002.
- [27] **Грибова, В.** The methods and the IACPaaS Platform tools for semantic representation of knowledge and development of declarative components for intelligent systems / V. Gribova, A. Kleshev, Ph. Moskalenko, V. Timchenko, L. Fedorischev, E. Shalfeeva // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. 2019. 3. P.21-24.
- [28] **Грибова, В.В.** Облачная платформа IACPaaS для разработки оболочек интеллектуальных сервисов: состояние и перспективы развития / В.В. Грибова, А.С. Клешев, Ф.М. Москаленко, В.А. Тимченко, Л.А. Федорищев, Е.А. Шалфеева // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 3. С.527-536. DOI: 10.15827/0236-235X.031.3.527-536.
- [29] **Gribova, V.** The IACPaaS Cloud Platform: Features and Perspectives / V. Gribova, A. Kleshev, P. Moskalenko, V. Timchenko, L. Fedorischev, E. Shalfeeva. // IEEE. Xplore. 2017. P. 80-84. DOI: 10.1109/RPC.2017.8168073.
- [30] IACPcloud: Онтология определения рисков. - <https://owncloud.dvo.ru/s/3YnamqX98eiQo4p>.

## Сведения об авторах



**Грибова Валерия Викторовна**, 1965 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт (1989), д.т.н. (2007). Зав. лабораторией интеллектуальных систем Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, заместитель директора по научной работе, вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 250 работ в области искусственного интеллекта, проблемно-ориентированных систем, основанных на знаниях, специализированных программных моделей и систем. AuthorID (РИНЦ): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; ORCID: 0000-0001-9393-351X; Researcher ID (WoS): Q-4250- 2016. [gribova@iacp.dvo.ru](mailto:gribova@iacp.dvo.ru).

**Окунь Дмитрий Борисович**, 1973 г. рождения. Окончил Владивостокский государственный медицинский университет (1996), к.м.н. (2000). Научный сотрудник лаборатории Интеллектуальных систем Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. AuthorID (РИНЦ): 642886; Author ID (Scopus): 57204598165; ORCID: 0000-0002-6300-846X. Researcher ID (WoS): AAV-1824-2020. [okdm@dvo.ru](mailto:okdm@dvo.ru).



**Шалфеева Елена Артефьевна**, 1967 г. рождения. Окончила Дальневосточный государственный университет (1989), к.т.н. (2000). Старший научный сотрудник лаборатории Интеллектуальных систем Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, доцент. В списке научных трудов более 80 работ. AuthorID (РИНЦ): 11682; Author ID (Scopus): 6508163590 ORCID: 0000-0001-5536-2875. Researcher ID (WoS): L-9623-2015. [shalfe@iacp.dvo.ru](mailto:shalfe@iacp.dvo.ru).

Поступила в редакцию 23.11.2021, после рецензирования 2.12.2021. Принята к публикации 13.12.2021.

## Semantic models for assessing the influence of a combination of factors on the development of diseases

V.V. Gribova, D.B. Okun, E.A. Shalfeeva

### Abstract

The analysis of approaches and solutions to the problem of risk assessment and prognosis of conditions and development of diseases is presented. It is shown that the implementation of software services on various platforms complicates the possibility of their comprehensive use and the choice between the available solutions. This has risen the urgency of creating a unified semantic model of diseases that integrates various methods and approaches to solving this problem and accumulates knowledge about risks and prognosis in a unified information space. A new semantic model is proposed to take into account influence of a combination of factors on development of various events that threaten health and life. The feature of the model is its independence from a specific disease or a group of diseases, which allows it to be used in various branches of medicine. This model has been tested on the IACPaaS platform. A software solver has been implemented that allows generating a clear explanation based on the knowledge base and analysis of the patient's electronic medical record. The application of the new model for the formation of knowledge is shown on the example of risk assessment and prognosis of cardiovascular events.

**Key words:** semantic model, disease risk assessment, knowledge base, medical intelligent systems, decision support system.

**Citation:** Gribova VV., Okun DB., Shalfeeva EA. Semantic models for assessing the influence of a combination of factors on the development of diseases [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(4): 464-477. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-464-477.

**Acknowledgment:** This work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research, projects 18-29-03131 and 19-29-01077.

### List of figures

Figure 1 - An example of the risk assessing result of cardiovascular diseases using various methods

Figure 2 - Ontology of knowledge about the relationship of disease risks with their indicators [30]

Figure 3 - Screenshot of a knowledge base fragment on the IACPaaS platform for assessing the risks of venous thrombosis

Figure 4 - Screenshot of a knowledge base fragment on the IACPaaS platform for risk assessment of cardiovascular diseases

Figure 5 - Screenshot of a knowledge base fragment on the IACPaaS platform for calculating cardiovascular risk using the formula

### References

- [1] **Shakhgeldyan KI, Rublev VYu, Geltser BI, Shcheglov BO, Shirobokov VG, Dukhtaeva MK, Chernysheva KV.** Predictive potential assessment of preoperative risk factors for atrial fibrillation in patients with coronary artery disease after coronary artery bypass grafting [In Russian]. *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2020; 35(4):128-136. DOI: 10.29001/2073-8552-2020-35-4-128-136.
- [2] **Brodskaya TA, Nevzorova VA, Shakhgeldyan KI, Geltser BI, Vrazhnov DA, Kistenev YuV.** Predictive potential assessment of cardiovascular risk factors and their associations with arterial stiffness in people of European and Korean ethnic groups [In Russian]. *Russian Journal of Cardiology*. 2021; 26(5):4230. DOI: 10.15829/1560-4071-2021-4230.
- [3] **Geltser BI, Shahgeldyan KJ, Rublev VYu, Kotelnikov VN, Krieger AB, Shirobokov VG.** Machine Learning Methods for Prediction of Hospital Mortality in Patients with Coronary Heart Disease after Coronary Artery Bypass Grafting [In Russian]. *Kardiologiya*. 2020;60(10):38-46. DOI: 10.18087/cardio.2020.10.n1170.
- [4] **Mun SA, Glushov AN, Shternis TA, Larin SA, Maksimov SA.** Regression analysis in biomedical research [In Russian]. Kemerovo: KemGMA. 2012. 119 p.

- [5] **Geltcer BI, Kotelnikov VN, Shahgeldyan KI, Kurpatov IG.** Results of modeling the proper values of the strength of the respiratory muscles based on the method of artificial neural networks [In Russian]. *Russian physiological journal. I.M.Sechenov.* 2018; 104 (9): 1065–1074. DOI: 10.7868/S0869813918090058.
- [6] **Akopyan VS, Semenova NS, Novikova EA, Tonivitskiy AG, Nechayev IN.** The complex model of risk and progression of AMD estimation [In Russian]. *Ophthalmology in Russia.* 2012; 9(3):52-56. DOI: 10.18008/1816-5095-2012-3-52-56.
- [7] **Iniesta R, Malki K, Maier W, Rietschel M, Mors O, Hauser J, et al.** Combining clinical variables to optimize prediction of antidepressant treatment outcomes. *J. Psychiatr Res.* 2016; 78: 94–102. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2016.03.016.
- [8] **Medeiros FA, Leite MT, Zangwill LM, Weinreb RN.** Combining structural and functional measurements to improve detection of glaucoma progression using Bayesian hierarchical models. *Investig Ophthalmol Vis Sci.* 2011; 52: 5794-5803.
- [9] Symptomati: Diagnostic technology is powered by Infermedica. <https://symptomate.com/diagnosis/#0-66>.
- [10] WebMD: Logo for WebMD Symptom Checker WITH BODY MAP. <https://symptoms.webmd.com/default.htm>.
- [11] Isabel: The Symptom Checker doctors use and trust. <https://symptomchecker.isabelhealthcare.com/>.
- [12] Webiomed. Demonstration App for Cardiovascular Risk Assessment: Cardiovascular risk assessment. <https://webiomed.ai/dhra/>.
- [13] **Kwon JM, Jeon KH, Kim HM, et al.** Deep-learning-based risk stratification for mortality of patients with acute myocardial infarction. *PLoS One.* 2019; 14(10): e0224502. DOI: 10.1371/journal.pone.0224502.
- [14] Calculator for assessing the risk of limb amputation and the benefits of revascularization: Expert solutions for the prevention of lower limb amputation [In Russian]. <https://kink.ru/specialistam/kalkulyator/>.
- [15] **Yasnitskiy LN, Cherepanov FM.** Neuroexpert system for diagnostics, prediction and risk management of cardiovascular diseases [In Russian]. *Applied Mathematics and Management Issues.* 2018. № 3. S. 107-126. (In Russ.). DOI: 10.15593/2499-9873/2018.3.08.
- [16] **Vyucheyskaya MV, Kraynova IN, Gribanov AV.** Neural Network Technologies in Medical Diagnosis (Review) [In Russian]. *Journal of Medical and Biological Research,* 2018; 6(3): 284-294. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2018.6.3.284.
- [17] **Manyam RB, Zhang Y, Keeling W, et al.** Deep Learning Approach for Predicting 30 Day Readmissions after Coronary Artery Bypass Graft Surgery. *NeurIPS (ML4H).* 2018; 222 ArXiv:abs/1812.00596.
- [18] **Chekroud AM, Zotti RJ, Shehzad Z, Gueorguieva R, Johnson MK, Trivedi MH, et al.** Cross-trial prediction of treatment outcome in depression: a machine learning approach. *Lancet Psychiatry* (2016) 3:243–50. DOI: 10.1016/S2215-0366(15)00471-X.
- [19] **Kim YJ, Saqlian M, Lee JY.** Deep learning-based prediction model of occurrences of major adverse cardiac events during 1-year follow-up after hospital discharge in patients with AMI using knowledge mining. *Personal and Ubiquitous Computing.* 2019; 23(4): 485-94. DOI: 10.1007/s00779-019-01248-7.
- [20] **Hill NR, Ayoubkhani D, McEwan P, et al.** Predicting atrial fibrillation in primary care using machine learning. *PLoS One.* 2019;14(11):e0224582. DOI: 10.1371/journal.pone.0224582.
- [21] Symptom Map: @Zdorov'e. <https://health.mail.ru/symptoms/>.
- [22] **Gribova VV, Petryaeva MV, Shalfeeva EA.** Cloud decision support service in cardiology based on formalized knowledge [In Russian]. *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine.* 2020; 35(4): 32-38. DOI: 10.29001/2073-8552-2020-35-4-32-38.
- [23] **Gribova VV, Moskalenko FM, Okun DB, Petryaeva MV.** Cloud environment to support clinical medicine and education [In Russian]. *Physician and Information Technology.* 2016; 1: 60-66.
- [24] **Kolek MJ, Muehlschlegel JD, Bush WS, et al.** Genetic and clinical risk prediction model for postoperative atrial fibrillation. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2015; 8(1): 25-31. DOI: 10.1161/CIRCEP.114.002300.
- [25] **Inohara T, Kohsaka S, Yamaji K, et al.** Risk stratification model for in-hospital death in patients undergoing percutaneous coronary intervention: a nationwide retrospective cohort study in Japan. *BMJ Open.* 2019; 9(5): e026683. DOI: 10.1136/bmjopen-2018-026683.
- [26] **Shahian MD, Jeffrey P, Vinay B, et al.** STS 2018 ADULT CARDIAC RISK MODELS PART 1. *Ann Thorac Surg.* 2018; 105: 1411-8. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2018.03.002.
- [27] **Gribova V, Kleshev A, Moskalenko Ph, Timchenko V, Fedorischev L, Shalfeeva E.** The methods and the IAC-PaaS Platform tools for semantic representation of knowledge and development of declarative components for intelligent systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems.* 2019; 3: 21-24.
- [28] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA, Fedorishchev LA, Shalfeeva EA.** IACPaaS cloud platform for the development of intelligent services shells: state and development prospects [In Russian]. *Software products and systems.* 2018; 31(3): 527-536. DOI: 10.15827/0236-235X.031.3.527-536.
- [29] **Gribova V, Kleshev A, Moskalenko P, Timchenko V, Fedorischev L, Shalfeeva E.** The IACPaaS Cloud Platform: Features and Perspectives. *IEEE. Xplore.* 2017. P. 80-84. DOI: 10.1109/RPC.2017.8168073.

[30] IACPcloud: Ontology of risk assessment. <https://owncloud.dvo.ru/s/3YnamqX98eiQo4p>.

---

### About the authors

**Valeriya Victorovna Gribova** (b.1965) graduated from the Leningrad Polytechnic University in 1989, Professor's degree (2007). She is a Head of the Intelligent systems lab in the Institute for Automation & Control Processes of the FEB RAS, Research Deputy Director, an expert of Analytic Center in Government of Russian Federation, a Vice-President of Russian Association of Artificial Intelligence. She is a co-author of more than 250 publications in the fields of AI, informatics, program models, technologies and systems. AuthorID (RSCI): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; ORCID: 0000-0001-9393-351X; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016. [gribova@iacp.dvo.ru](mailto:gribova@iacp.dvo.ru).

**Dmitry Borisovich Okun** (b.1973) graduated from the Vladivostok State Medical University in 1996, PhD in Medical sciences (2000). Research associate of the Intelligent systems lab at the Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. AuthorID (RSCI): 642886; Author ID (Scopus): 57204598165; ORCID: 0000-0002-6300-846X. Researcher ID (WoS): AAV-1824-2020. [okdm@dvo.ru](mailto:okdm@dvo.ru)

**Elena Arefjevna Shalfeeva** (b.1967) graduated from the Far Eastern State University (Vladivostok) in 1989, PhD (2000). She is a Senior Researcher at the Intelligent systems lab in the Institute for Automation & Control Processes of the FEB RAS, an assistant professor. She is a co-author of more than 80 publications in the fields of Program models and systems and AI. AuthorID (RSCI): 11682; Author ID (Scopus): 6508163590 ORCID: 0000-0001-5536-2875. Researcher ID (WoS): L-9623-2015. [shalff@iacp.dvo.ru](mailto:shalff@iacp.dvo.ru).

---

*Received November 23, 2021. Revised December 02, 2021. Accepted December 13, 2021.*

---

## Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов

И.С. Ткаченко

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

### Аннотация

Одним из ключевых направлений современной мировой космонавтики является разработка кластерных космических систем различного назначения, состоящих из большого количества функционирующих космических аппаратов. Это стало возможным благодаря уменьшению массы космических аппаратов за счёт создания и использования новых материалов, развития электроники и микроэлектромеханических систем, применения метода группового запуска, развития мультиагентных технологий и систем межспутниковой связи. Существуют проекты систем, состоящих из большого количества космических объектов, таких как «OneWeb», «Planet», «Starlink», «Satellogic» и др. Основными классами устройств, используемых для создания таких многоспутниковых систем, являются малые спутники, в том числе микро (до 100 кг) и нано (до 10-15 кг) классов, которые имеют значительные преимущества перед тяжелыми космическими аппаратами, особенно с точки зрения сроков и стоимости их создания. Развёртывание многоспутниковых группировок, включающих сотни и тысячи спутников, требует принципиально новых подходов к созданию космических аппаратов и системы в целом на всех этапах жизненного цикла. В статье рассматриваются ключевые технологии, используемые для создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малых спутников на разных стадиях жизненного цикла – от ранних стадий проектирования до стадии эксплуатации и утилизации (сведения с орбиты). Приведён опыт совместного проекта Самарского университета и Ракетно-космического центра «Прогресс» по созданию группировки малых космических аппаратов серии «АИСТ».

**Ключевые слова:** многоспутниковая группировка, малый космический аппарат, проект, проектные параметры, оптимизация, жизненный цикл, технология.

**Цитирование:** Ткаченко, И.С. Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов / И.С. Ткаченко // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.478-499. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.

### Введение

В настоящее время наблюдается тенденция перехода от управления каждым отдельным спутником к управлению многоспутниковыми группировками. Эта тенденция подтверждается данными агентства «Euroconsult» (рисунок 1), согласно которым количество малых спутников на орбите в ближайшие несколько лет увеличится в разы [1].

Возможности малых космических аппаратов (МКА) за последние 20 лет в значительной степени достигли функциональности больших спутников и позволили сделать их частью многоспутниковых группировок. Несмотря на небольшие габариты и массу, характеристики полезной нагрузки делают их конкурентоспособными, а возможный отказ одного МКА практически не повлияет на эффективность всей космической системы (КС).

С 2010-х годов направление МКА приобрело значительную коммерческую составляющую. Одна за другой компании инфокоммуникационного рынка объявляли о создании спутниковых группировок. В проекте «OneWeb» компании *OneWeb LLC* планируется до 700 телекоммуникационных спутников; в проекте «Starlink» компании *SpaceX* предполагается создание и развёртывание на орбите до 12 000 МКА для создания высокопроизводительного спутникового Интернет-канала связи, а в проекте компании «PlanetLabs» - более 450 МКА, большинство из которых наноспутники для мониторинга земной поверхности.

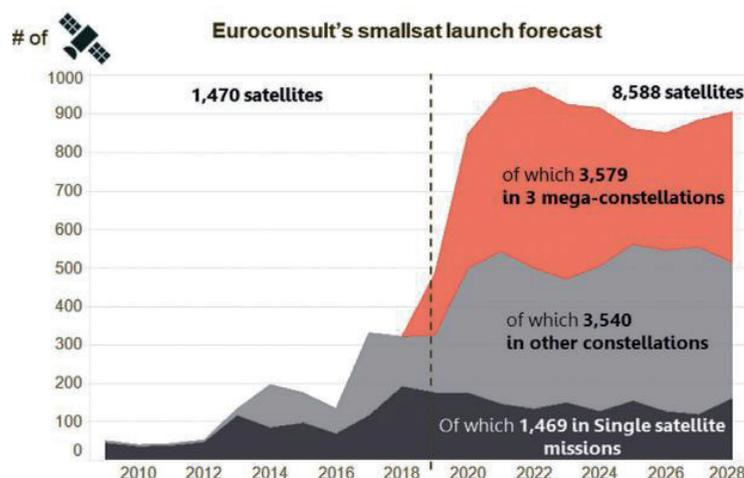


Рисунок 1 – Прогноз агентства «Euroconsult» запуска малых спутников

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева совместно с Ракетно-космическим центром «Прогресс» создаёт собственную группировку МКА, которая называется «АИСТ» [2-6]. В настоящее время на орбите три аппарата: два МКА первой серии «АИСТ» (запущены в 2013 году), предназначенные для проведения научных экспериментов в космосе по изучению частиц микрометеоритов и магнитного поля Земли, третий – аппарат «АИСТ-2Д» (запущен в 2016 году) – предназначен для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [7]. Группировка продолжает развиваться [8-10].

## 1 Жизненный цикл многоспутниковой группировки

Многоспутниковая группировка является классическим примером сложной технической системы, жизненный цикл (ЖЦ) которой определяется следующими основными этапами [11, 12]:

- 1) *формирование концепции* - формулирование требований к системе и разработка тактико-технических характеристик системы в целом и космического аппарата (КА) в её составе.
- 2) *проектирование* - выбор функциональной структуры системы, баллистической схемы функционирования, выбор проектных параметров КС и КА.
- 3) *конструирование* - оптимизация параметров системы и аппарата, выбор и разработка технологии производства аппарата, создание рабочей документации.
- 4) *производство* - изготовление КА, входящих в состав многоспутниковой КС.
- 5) *испытания* - определение качества и надёжности изготовленных КА, а также подтверждение их заданных характеристик, в том числе на орбите.
- 6) *эксплуатация* - функционирование системы на орбите, а также устранение неполадок и ремонт (в случае многоспутниковой КС под ремонтом целесообразно понимать восполнение её путём замены вышедших из строя спутников новыми).
- 7) *утилизация* - прекращение эксплуатации (увод КА с орбиты в плотные слои атмосферы).

## 2 Этапы формирования концепции, проектирования и конструирования

Ключевой технологией, применяемой на этапах 1-3 ЖЦ многоспутниковых КС и КА для них, является технология нисходящего параллельного проектирования [13]. Основная особенность нисходящего проектирования заключается в том, что концептуальная информация о продукте размещается на более высоком уровне, а затем распространяется на более низкие уровни структуры проекта\*. С помощью этой схемы большая часть концептуальной информации становится доступной любому проектировщику, входящему в проектную группу, и может быть использована или включена в проектирование входящих деталей и узлов. Ключевым преимуществом метода нисходящего проектирования является то, что, фиксируя всю концептуальную информацию в одном источнике, создаются условия для параллельной работы команд различного функционального назначения (разработчики каркасов КА, устройств и агрегатов, монтажа устройств и агрегатов, кабельных сетей и трубопроводов, ступельного оборудования и т.д.).

Нисходящее проектирование ведётся от общего к частному и состоит в пошаговой детализации выполняемого проекта, при этом на каждом шаге рассматриваются альтернативные варианты решения и выбирается наилучшее как основа для проекта низшего уровня.

После определения начального облика изделия производится его деление на блоки и агрегаты. Далее производится их конструкторская проработка (проработка стыков агрегатов, выбор основного материала корпусов и др.), компоновка бортовой аппаратуры, в том числе

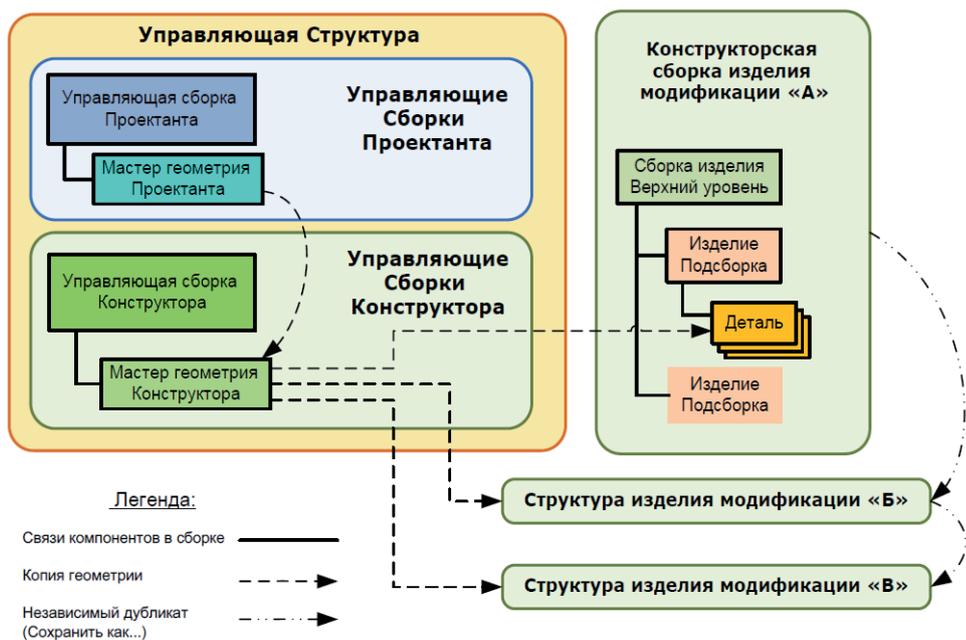


Рисунок 2 – Схема нисходящего проектирования

целевой и научной. В дальнейшем производится поддетальная разбивка агрегатов и разработка отдельных составляющих в зависимости от оснащённости производства, от возможности изготовления заготовок для деталей и других факторов.

Схема нисходящего проектирования показана на рисунке 2 [13].

На этапе формирования концепции будущей системы, а также ранних этапах проектирования используется программное обеспечение, предназначенное для моделирования миссий, а также выбора основных проектно-баллистических параметров многоспутниковой космической группировки.

\* О нисходящем проектировании. «Разрешая сооружение, мы подходим к нему концентрически: сначала komponуем его в целом, а затем после разрешения всего сооружения переходим к разрешению и исследованию отдельных его деталей, исправляя, дополняя и последовательно совершенствуя при этом уже разрешённое целое задание до тех пор, пока не добъёмся оптимального решения. Этот же метод относится и к деталям. Сначала мы разрешаем деталь в целом, как говорят «задаёмся ею», а потом её проверяем и усовершенствуем. Этот метод наиболее удобен и, можно сказать, даже неизбежен». [Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н. Основы металлических конструкций. М.–Л.: Главная редакция строительной литературы. – 1935. – 954 с.]. Прим. ред.

Ядром передовых технологий проектирования современных образцов космической техники является электронная модель изделия (см., например, рисунок 3).

Использование технологии параллельного нисходящего проектирования в сочетании с сквозным использованием электронной модели изделия на всех этапах ЖЦ возможно только при формировании единого цифрового пространства на предприятии-разработчике [14-16].

Современные КА создаются несколько месяцев и даже лет и, как правило, являются уникальными проектами, воспроизводимыми единичными или малыми сериями. Модульный принцип построения КА обеспечивает создание ряда КА различного назначения на основе типовых конструктивных решений. Структура, формат, правила хранения и создания электронных моделей должны обеспечивать формирование электронных макетов всей номенклатуры КА, построенных на основе модульного принципа [17].

Использование платформенных принципов является одним из основных направлений в проектировании, обеспечивающим эффективное решение задач создания МКА в сжатые сроки. Переход к проектированию МКА на базе единой платформы позволяет создать ряд спутников, отличающихся по составу целевой аппаратуры (ЦА), но имеющих общую платформу, включающую полный набор бортовых обеспечивающих систем (рисунок 4).

Унифицированная платформа (УП) является базовой частью создаваемого на её основе МКА и представляет собой несущую конструкцию, оснащённую служебными системами и устройствами для нормального функционирования целевой аппаратуры различного назначения, но с близкими эксплуатационными требованиями. Служебными системами являются системы, общие для МКА различного назначения: бортовой комплекс управления, система ориентации и стабилизации, система электропитания, система обеспечения теплового режима, двигательная установка, ряд механических систем и элементов, таких как средства отделения от ракеты-носителя, антен-

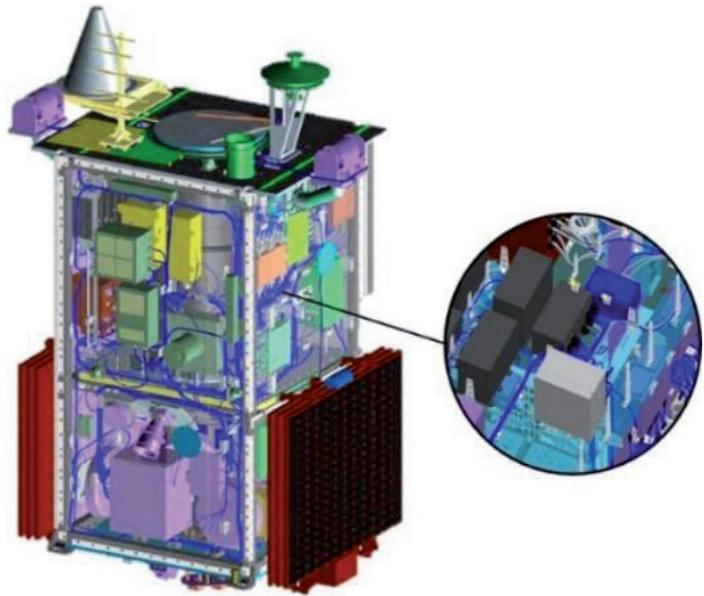


Рисунок 3 – Электронная модель МКА «АИСТ-2Д»

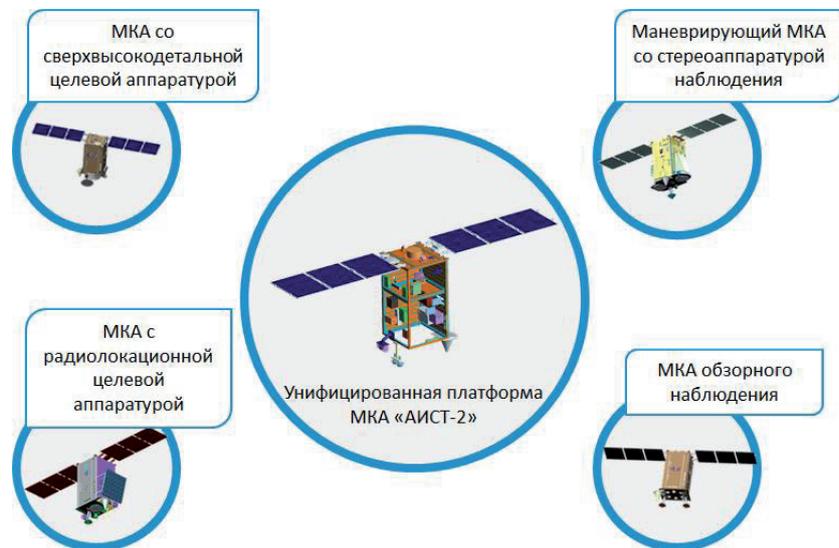


Рисунок 4 – МКА, спроектированные на базе платформы «АИСТ-2» с различными типами целевой аппаратуры

функциональных систем и элементов, таких как средства отделения от ракеты-носителя, антен-

ные устройства, механизмы фиксации и раскрытия подвижных устройств и т.д. Солнечная батарея и её конструкция, аккумуляторная батарея (АБ), высокоскоростная радиоприемная линия, исполнительные органы системы управления движением и др. элементы выбираются в зависимости от характеристик и требований ЦА. Единая платформа должна состоять из базового и целевого состава бортовых систем (БС). Целевой состав формируется на этапе адаптации УП к конкретной ЦА. Конструкция платформы, являясь средством восприятия и передачи силовых нагрузок на всех этапах эксплуатации КА, выполняет функции интеграции бортового оборудования в компоновку спутника и участвует в процессах перераспределения и передачи тепла.

ЦА интегрирована с единой платформой через механические, электрические, информационные и другие интерфейсы.

Выбор оптимальных проектных параметров УП, адаптируемой под ЦА, осуществляется следующим образом.

- 1) задаются требования и характеристики ЦА: масс-габаритные характеристики, потребляемая мощность, продолжительность работы на витке и т.д.
- 2) выбирается схема установки панелей солнечных батарей.
- 3) выбирается схема ориентации.
- 4) в соответствии с требованиями и характеристиками ЦА, выбранной схемой ориентации и предполагаемой даты запуска уточняется состав УП.
- 5) задаётся диапазон изменения вектора основных проектных параметров УП и шага изменения  $\Delta P$  дискретных значений с учётом ограничений: характеристик устройства отделения, зоны установки на средство выведения, зоны и массы полезного груза.
- 6) проводится итерационный синтез масс-геометрических и других параметров УП и формирование вектора проектных параметров путём решения проектных задач и моделирования целевого функционирования с учётом внешних факторов космического пространства.
- 7) для каждой схемы ориентации и схемы построения солнечной батареи с использованием модифицированного комплексного метода Бокса [18] находится вектор оптимальных параметров по одному из критериев эффективности с учётом требований и ограничений ЦА по условиям функционирования и ограничений внешней среды.
- 8) если найдено хотя бы одно решение, то вектор параметров записывается в массив допустимых проектных решений и задача решается для другой схемы ориентации и другой схемы солнечных батарей. Если решения нет, проводится поиск проектного решения путём оптимизации проектных параметров модулей БС (система энергопитания, система обеспечения теплового режима, конструкция, бортовой комплекс управления) за счёт изменения ограничений. Если за счёт смены ограничений появляется решение, у которого:
  - мощность, выделяемая на энергопотребление ЦА на конец срока активного существования КА, удовлетворяет требованиям, а сам аппарат имеет минимальную массу;
  - обеспечивается суммарная производительность ЦА в течение всего срока существования,то оно записывается в массив.
- 9) проводится отбор оптимальных основных проектных параметров УП из вариантов с различными схемами ориентации и схемами солнечных батарей по выбранному критерию эффективности.
- 10) проводится дальнейшая декомпозиция задачи системного проектирования УП.

11) устанавливается связь между проектными параметрами и показателями эффективности УП, а также осуществляется переход к задаче следующего иерархического уровня синтеза и оценки эффективности системы.

В качестве критерия для выбора вариантов может рассматриваться максимизация срока активного существования или максимизация комплексного критерия, учитывающего максимальную технологичность и рациональность изготовления КА, минимальную массу, стоимость и т.д.

Блок-схема алгоритма выбора оптимальных проектных параметров УП МКА [17] представлена на рисунке 5.

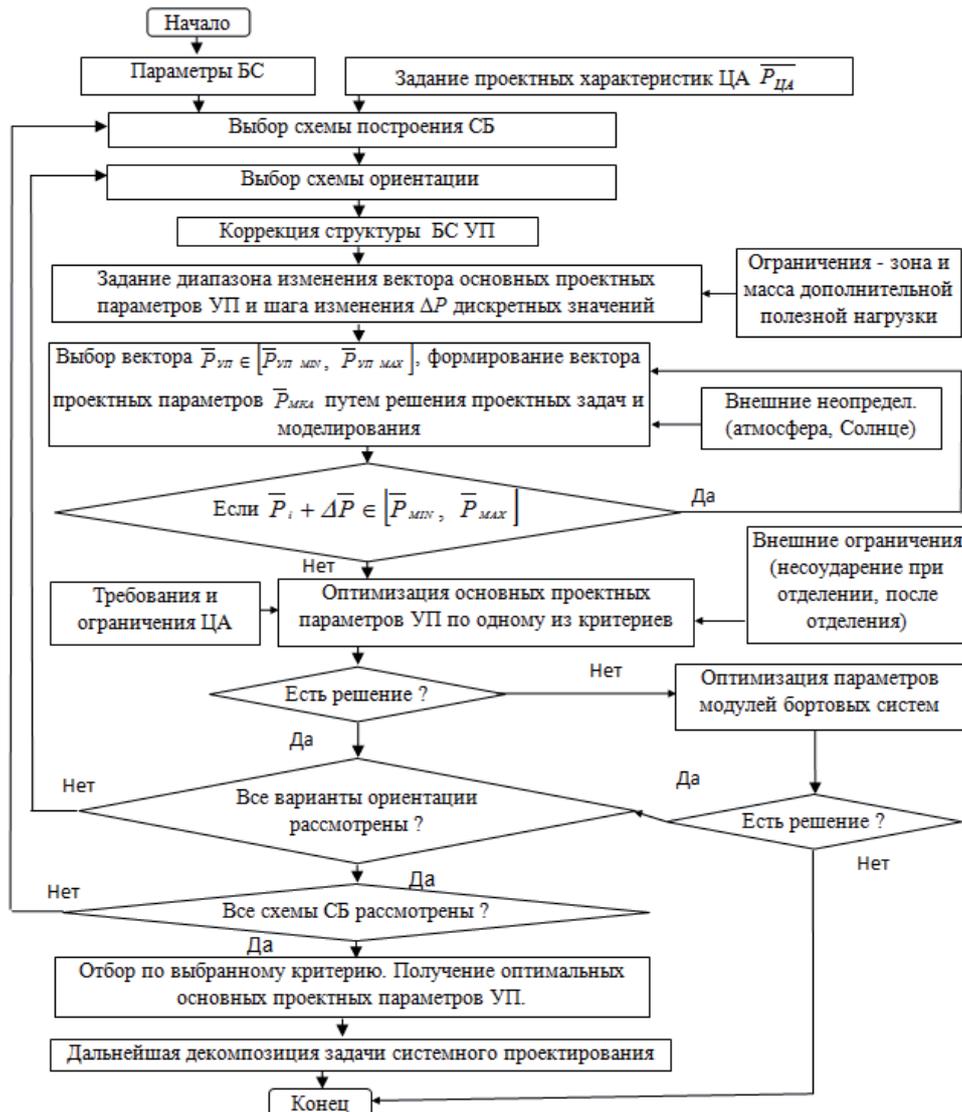


Рисунок 5 – Алгоритм выбора оптимальных проектных параметров УП КА

### 3 Этапы производства и испытаний

Отличительной особенностью испытаний КА, которые должны функционировать в составе многоспутниковых группировок, является функциональная интеграция нескольких видов испытаний в рамках единой экспериментальной установки. Например, электрические и тепловакуумные испытания проводятся одновременно на одной установке. То же самое

устройство используется для вибродинамических испытаний и т.д. Это связано с необходимостью сокращения времени и затрат на наземную экспериментальную отработку спутников. При реализации такого подхода создаётся технологический образец, полностью идентичный лётному, на котором проводятся все наземные испытания. Этот принцип реализован при создании малого спутника "АИСТ" [5] (рисунок 6).

Технологией, которая применяется при создании многоспутниковой группировки, является проведение части испытаний в цифровом (виртуальном) виде. Виртуальные испытания могут выполняться с использованием специализированных программных систем, таких как *Siemens NX*, *MSC Nastran*, *Ansys* и др. Некоторые виды испытаний проводятся в полностью цифровом формате с использованием электронных моделей изделий, например, такие как макетно-конструкторские испытания (рисунок 7), некоторые виды прочностных, электрических и тепловых испытаний. Полностью заменить натурные испытания виртуальными невозможно. Самой важной задачей в этом случае является верификация результатов виртуальных испытаний на основе данных физических экспериментов (рисунок 8) [19].



Рисунок 6 – Лётный и технологический образцы МКА «АИСТ» при проведении радиотехнических испытаний

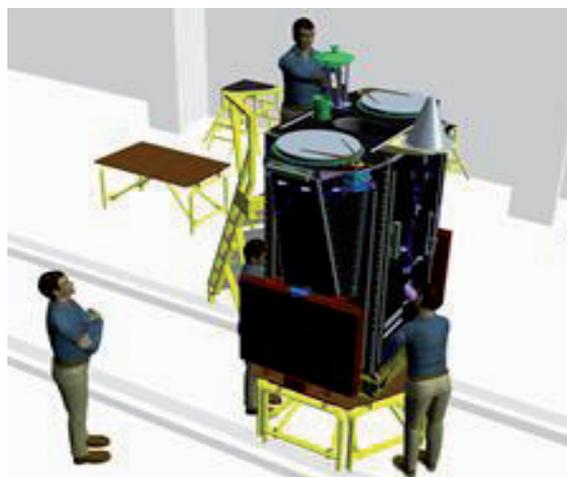


Рисунок 7 – Виртуальные макетно-конструкторские испытания МКА с использованием программного обеспечения *Creo/Windchill*

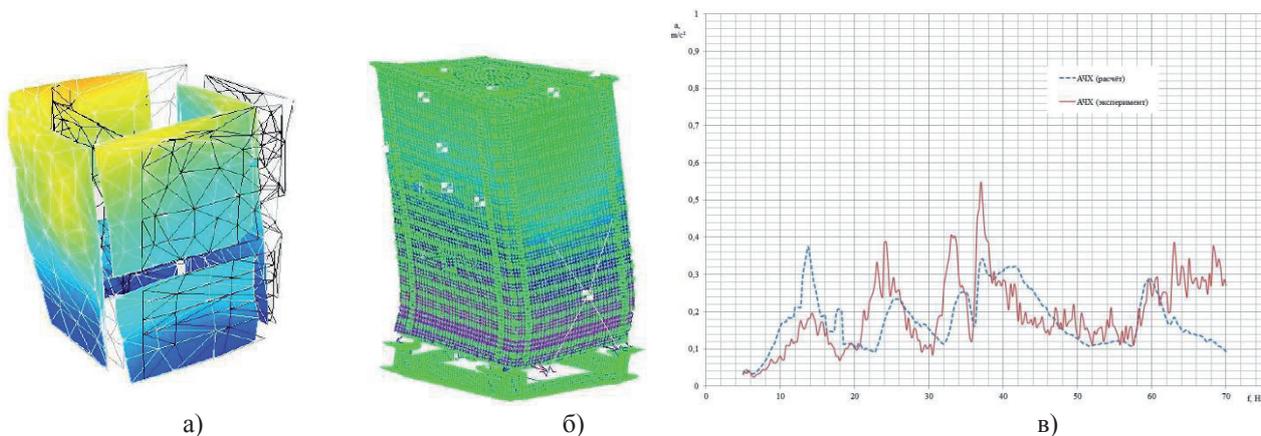


Рисунок 8 – Сравнение результатов виртуальных и натурных испытаний: а) – экспериментальная первая форма колебаний МКА при частоте 14,85 Гц, полученная на вибродинамическом стенде; б) – расчетная форма колебаний аппарата, полученная в программном обеспечении *MSC Patran/Nastran*; в) - сравнение расчетной и экспериментально полученной амплитудно-частотной характеристики

При разработке многоспутниковых группировок используется подход, в соответствии с которым создаётся прототип будущего серийного устройства. Все экспериментальные испытания проводятся в космосе в ходе лётных испытаний.

Использование телеметрической информации, полученной от прототипа, функционирующего в космосе, является инструментом для проверки результатов виртуальных испытаний [20].

При производстве КА для многоспутниковых систем применяются следующие основные технологические принципы:

- модульная конструкция спутника;
- использование электронной модели изделий на этапах производства и испытаний;
- автоматическое тестирование БС на этапе сборки;
- автоматизированная сборка с использованием роботизированных устройств;
- использование опыта авиационной и автомобильной промышленности.

Ключевыми технологиями, способными значительно модернизировать существующий производственный процесс изготовления КА и его агрегатов, являются аддитивные технологии. На рисунке 9 показан первый в мире объектив с дифракционной оптикой в составе *CubeSX-HSE*, корпус для которого изготовлен по технологии селективного лазерного спекания в Самарском университете.

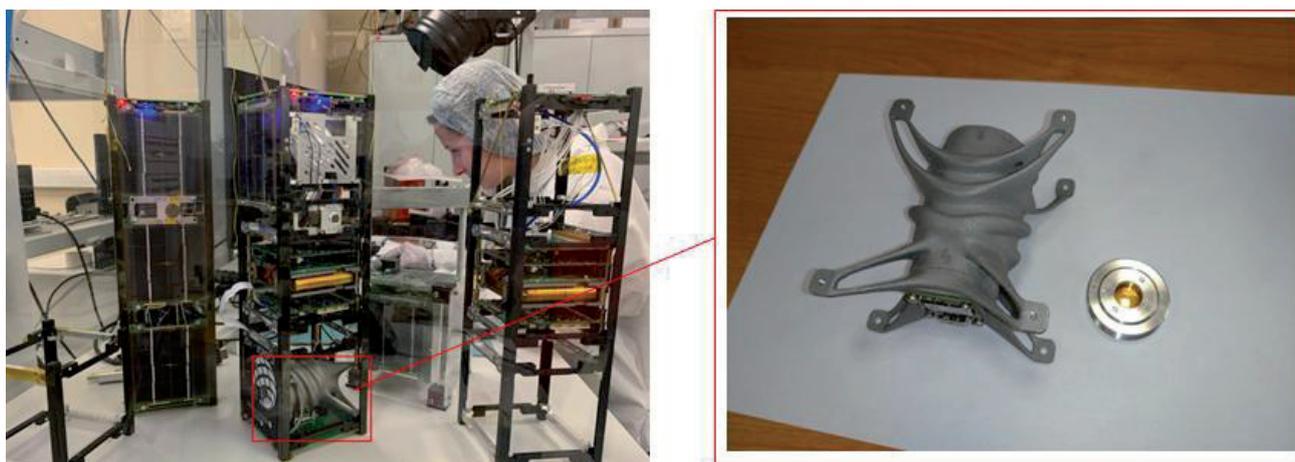


Рисунок 9 – Объектив телескопа для наноспутника *CubeSX-HSE*, изготовленный с помощью аддитивных технологий

Для объектива разработан инновационный корпус бионической формы, чтобы минимизировать массу при сохранении прочностных характеристик. Корпус объектива выполнен из порошка сплава алюминия AlSi10Mg. Габариты детали — 70×80×100 мм. Корпус был изготовлен за 8 часов. Благодаря применению аддитивных технологий удалось снизить массу детали на 40% по сравнению с подобной деталью, изготовленной традиционными способами<sup>†</sup>.

Созданный объектив интегрирован в стандартный кубсат, что практически нивелировало полученные преимущества в объёме объектива за счёт бионического дизайна. Подобная конструкция накладывает дополнительные требования к трассировке бортовой кабельной сети. Идеальной ситуацией является создание всего КА, включая корпус, бионической формы. Геометрические ограничения, накладываемые со стороны панелей солнечных батарей и головного обтекателя ракеты-носителя, делают эту задачу трудновыполнимой. Вместе с тем,

<sup>†</sup> Самарские учёные готовят к испытаниям прототип сверхлёгкой оптики для наноспутников. 09.06.2020. <https://ssau.ru/news/18064-samarskie-uchenye-gotovyat-k-ispytaniyam-prototip-sverkhlegkoy-optiki-dlya-nanosputnikov>.

выигрыш в массе, стоимости и времени изготовления определённых конструктивных деталей КА, функционирующих в составе многоспутниковых систем, делает аддитивные технологии перспективным инструментом в серийном производстве спутников.

#### 4 Этапы подготовки к запуску и запуск

КА многоспутниковых КС могут выводиться на орбиту двумя способами: в качестве основной полезной нагрузки с использованием специальных устройств и в качестве попутной полезной нагрузки.

Одной из особенностей многоспутниковой группировки является необходимость поддержания орбитальной структуры и положения каждого КА относительно друг друга. КА может быть доставлен на рабочую орбиту с помощью разгонного блока (рисунок 10) ракеты-носителя или с помощью собственной двигательной установки КА.

Результаты проведенных исследований показывают необходимость наличия на борту существенных запасов рабочего тела для выведения спутника в точку стояния. Целесообразно использовать эти запасы рабочего тела лишь на поддержание параметров рабочей орбиты, изменение которых происходит в связи с воздействием внешних возмущающих факторов, основным из которых для низких орбит является атмосфера.

Известна оригинальная схема управления относительным положением спутников в составе группировки «Planet». Спутники размещаются на орбите с заданными угловыми смещениями и нулевой относительной скоростью. Оптимальная по времени фазировка достигается путём предварительного определения соответствующего относительного размещения, т.е. порядка расположения спутников. Оптимизация для поиска профиля команды фазирования необходима для каждого спутника. Органом управления является изменение баллистического коэффициента аппарата путём его ориентации по вектору скорости (рисунок 11) [21].

Известна оригинальная схема управления относительным положением спутников в составе группировки «Planet». Спутники размещаются на орбите с заданными угловыми смещениями и нулевой относительной скоростью. Оптимальная по времени фазировка достигается путём предварительного определения соответствующего относительного размещения, т.е. порядка расположения спутников. Оптимизация для поиска профиля команды фазирования необходима для каждого спутника. Органом управления является изменение баллистического коэффициента аппарата путём его ориентации по вектору скорости (рисунок 11) [21].

#### 5 Этап эксплуатации

Этап эксплуатации многоспутниковой КС характеризуется большим количеством процессов, происходящих в ней одновременно. Все они влияют на количественные значения

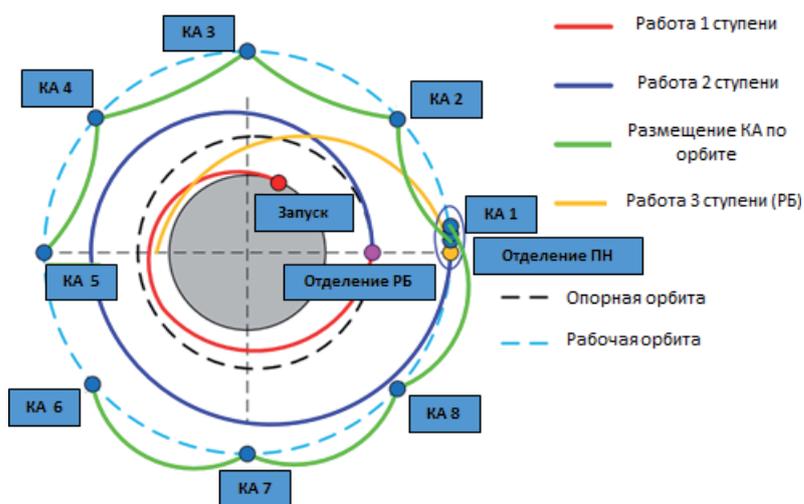


Рисунок 10 – Схема доставки на орбиту группировки МКА

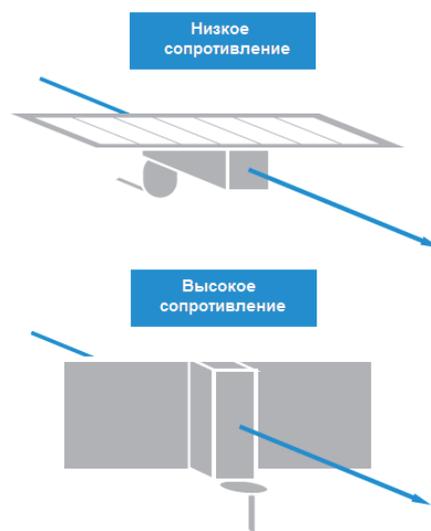


Рисунок 11 – Изменение площади миделя КА «Flock» для построения орбитальной группировки «Planet»

показателей эффективности системы в целом. Для обеспечения заданного уровня надёжности и вероятности безотказной работы системы необходимо разработать и постоянно внедрять программу обновления системы, основанную на принципах резервирования БС или отдельных КА. Это определяется возможностями реинжиниринга и перепрограммирования бортового программного обеспечения.

Обеспечение надёжности функционирования КА в составе группировки достигается за счёт интеграции функций бортового оборудования. С использованием интеллектуальных алгоритмов управления бортовым программным обеспечением функции перераспределяются между устройствами и модулями бортового оборудования в случае отказов. При этом обеспечивается реализация целевого функционирования КА, повышается его надёжность и живучесть в целом.

Направлением, повышающим эффективность использования многоспутниковых КС, является разработка полностью цифровых полезных нагрузок. Благодаря наличию полностью цифровой полезной нагрузки и возможности программирования и реконфигурации из наземного центра управления возможно изменение принципов и логики решения целевой задачи.

Важную роль на данном этапе ЖЦ многоспутниковых систем играет максимальная автоматизация планирования работы группировки, её контроля и мониторинга состояния КА. Благодаря высокой степени автоматизации этих процессов удаётся оптимизировать ресурсы (финансовые затраты, трудовые ресурсы, информационные, временные и т.д.), необходимые для функционирования многоспутниковой группировки.

Анализ состояния БС МКА «АИСТ» и «АИСТ-2Д» после первичной обработки телеметрической информации (ТМИ) происходит посредством сравнения значений параметров бортовой аппаратуры, полученных из ТМИ, со значениями, соответствующими режимам работы бортовой аппаратуры и отражёнными в эксплуатационной документации, без использования каких-либо средств автоматизации процесса. Количество телеметрических параметров различных БС МКА «АИСТ» и «АИСТ-2Д» составляет 515 и 1465 соответственно [22, 23].

В связи с возрастающей структурной сложностью современных КА и систем развиваются методы их диагностики и оценки состояния. Используются подходы на основе искусственных нейронных сетей, различные типы и модификации структурных методов оценки надёжности, методы построения дерева неисправностей и дерева событий, а также математические модели, позволяющие производить оценку деградации характеристик систем.

Подобные методы могут не только лечь в основу автоматизации процесса управления спутника, но и также являться источником информации для разработки алгоритмов управления космическими аппаратами в условиях деградации бортовых систем.

Эти алгоритмы базируются на моделях децентрализованного распределенного управления КА, в основу которых положены: тестирование и контроль бортовой вычислительной системы/встроенные микроконтроллеры; распределение управления бортовой комплекс управления/наземный комплекс управления; наземный комплекс синхронного сопровождения штатной эксплуатации КА.

Алгоритмы используют встроенные элементы и методы повышения надёжности и живучести, а именно: дублирование, резервирование и автоматическую систему предупреждения нештатных ситуаций. Типовой алгоритм управления МКА «АИСТ» в нештатной ситуации (отказ антенного устройства) представлен на рисунке 12.

Для обеспечения энергобаланса на борту КА необходимо, чтобы затраченная на работу ЦА суммарная мощность не превышала располагаемую мощность на борту КА с учётом располагаемой ёмкости АБ.

Такое условие можно выразить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n (P_{ЦАi} \cdot \Delta t_{ЦАi}) \leq (P_{СЭП} - P_{СР.СУТ}^{ОА}) \cdot \Delta t_{прогр} + \Delta Q_{АБ} \cdot U_{БС}, \quad (1)$$

где  $P_{ЦАi}$  – потребляемая мощность ЦА на  $i$ -ом интервале времени в программе работы ЦА, [Вт];  $\Delta t_{ЦАi}$  – длительность  $i$ -го интервала времени, [час];  $\Delta t_{прогр}$  – общая длительность программы работы ЦА, [час];  $\Delta Q_{АБ}$  – располагаемая ёмкость АБ, [А·час];  $P_{СР.СУТ}^{ОА}$  – среднесуточная мощность потребления обеспечивающей аппаратуры;  $U_{БС}$  – напряжение бортовой ти;  $P_{СЭП}$  – среднесуточная мощность системы энергопитания (СЭП).

Для анализа возможности реализации программы работы ЦА предложена методика:

- 1) определяется значение мощности  $P_{СЭП}$  и  $P_{СР.СУТ}^{ОА}$ . В случае, если  $P_{СЭП} \leq P_{СР.СУТ}^{ОА}$ , работу ЦА не планировать, действующую рабочую программу ЦА стереть из памяти бортового комплекса управления, ЦА отключить;
- 2) определяется ёмкость АБ;
- 3) программа работы ЦА в планируемые сутки должна быть составлена исходя из условия (1).

Программа работы закладывается только в случае выполнения условия (1). В случае если условие (1) не выполняется, необходимо уменьшать значения параметров  $\Delta t_{ЦАi}$ .

На основе разработанной методики планирования энергобаланса создан алгоритм оценки энергобаланса для МКА «АИСТ» (рисунок 13).

В результате применения предлагаемых методики и алгоритма для обоих МКА «АИСТ» после 6 лет функционирования (при проектном сроке не более 3 лет) было достигнуто увеличение времени непрерывной работы ЦА с 1,5 до 4,2 часа во время бестеневых периодов и с 50 минут до 2,2 часа во время витков со средней продолжительностью тени для МКА «АИСТ» RS-43as.

Ввиду того, что разработанные алгоритмы используют для своей работы ТМИ, важной проблемой является неполнота данных или их искажение в процессе приёма вследствие влияния различного рода возмущающих факторов, таких как погодные условия, неисправность оборудования приёмной станции и др. Возникающие в массивах ТМИ пропущенные значения (рисунок 14) и статистические выбросы (рисунок 15) являются сдерживающим фактором в процессе перехода к полностью автоматической обработке данных.

В работе [24] рассматривается применение методов восстановления пропущенных значений и предлагается алгоритм импутирования пропущенных значений в массивах ТМИ. Результаты приведены в таблице 1.

В качестве меры оценки качества применяемых методов используется средняя абсолютная процентная ошибка MAPE, вычисляемая как:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|z(t) - \hat{z}(t)|}{z(t)} 100\%$$

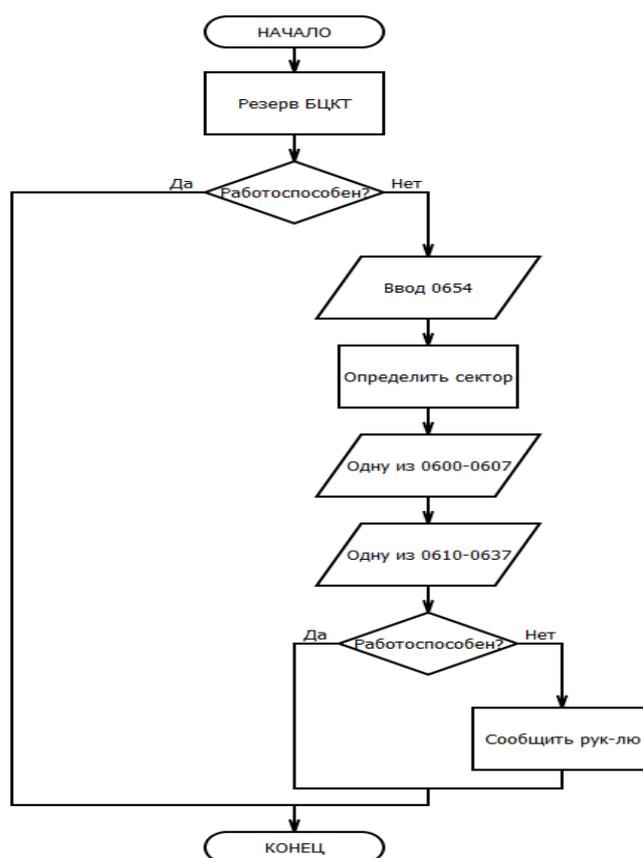


Рисунок 12 – Алгоритм выхода из аварийной ситуации в случае отказа антенного устройства МКА «АИСТ»

где  $Z(t)$  – действительное значение временного ряда;  $\hat{Z}(t)$  – спрогнозированное значение временного ряда;  $N$  – интервал прогноза. При  $MAPE < 10\%$  прогноз отличный,  $10\% < MAPE < 20\%$  – хороший,  $20\% < MAPE < 50\%$  – удовлетворительный,  $MAPE > 50\%$  – неудовлетворительный.

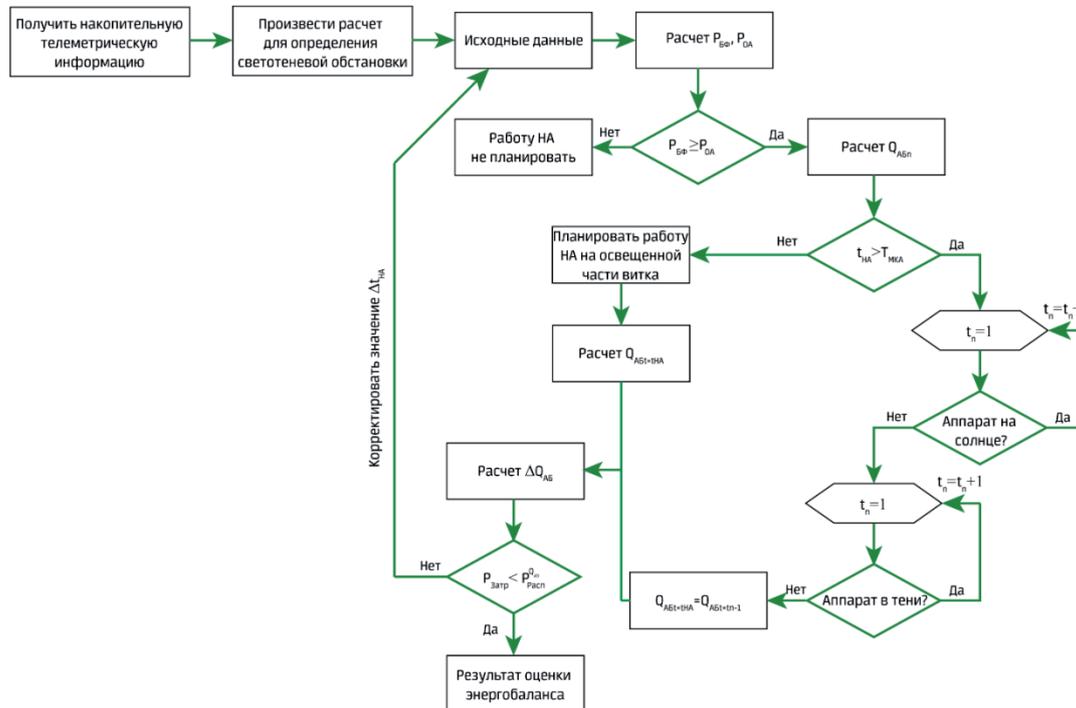


Рисунок 13 – Алгоритм оценки энергобаланса и возможности включения ЦА для МКА «АИСТ» в условиях деградации АБ

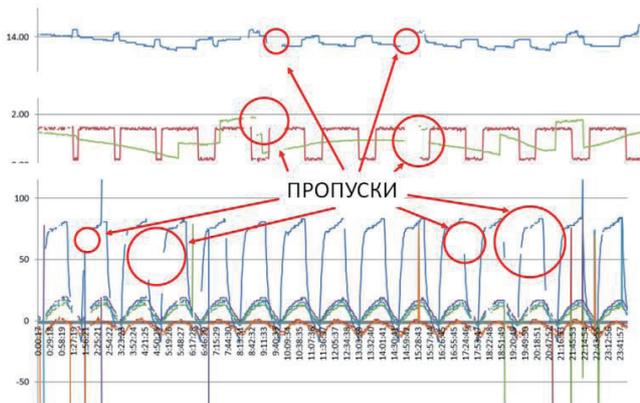


Рисунок 14 – Пример данных ТМИ с пропущенными значениями

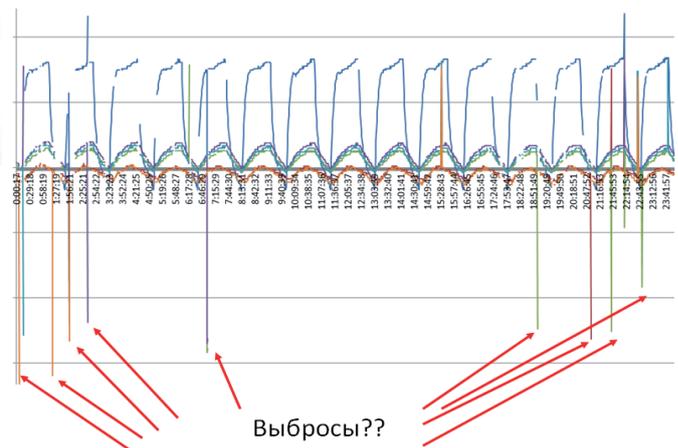


Рисунок 15 – Пример данных ТМИ со статистическими выбросами значений

Обзор методов обнаружений выбросов и аномалий в данных представлен в работе [25]. Для обнаружения выбросов рассматривались наиболее распространённые методы стандартизованной оценки, модифицированной стандартизованной оценки и межквартильного размаха. Наилучшие и во многом схожие результаты показали модифицированный метод стандартизованной оценки и межквартильного размаха. На рисунке 16 показан тестовый файл теле-

метрии системы электропитания, где точками выделены данные, которые были определены модифицированным методом стандартизованной оценки и межквартильного размаха как выбросы.

Таблица 1 – Сравнение методов восстановления пропущенных значений в данных ТМИ

Примененные методы восстановления пропусков	МАРЕ для данных с оди- ночными пропусками, %	МАРЕ для данных с множе- ственными пропусками, %
Метод замены общим средним	2.9520	2.5467
Метод заполнения средним по ближайшим	0.4778	1.7777
Метод заполнения взвешенной скользящей сред- ней (экспоненциальный)	0.5374	1.2421
Метод заполнения взвешенной скользящей сред- ней (линейный)	0.6331	1.3010
Метод заполнения взвешенной скользящей сред- ней (простой)	0.7269	1.3336
Метод интерполяцией сплайном	0.5083	3.6430
Метод оценки максимального правдоподобия	0.4778	0.9735
Интегрированная модель авторегрессии	0.4126	19.456

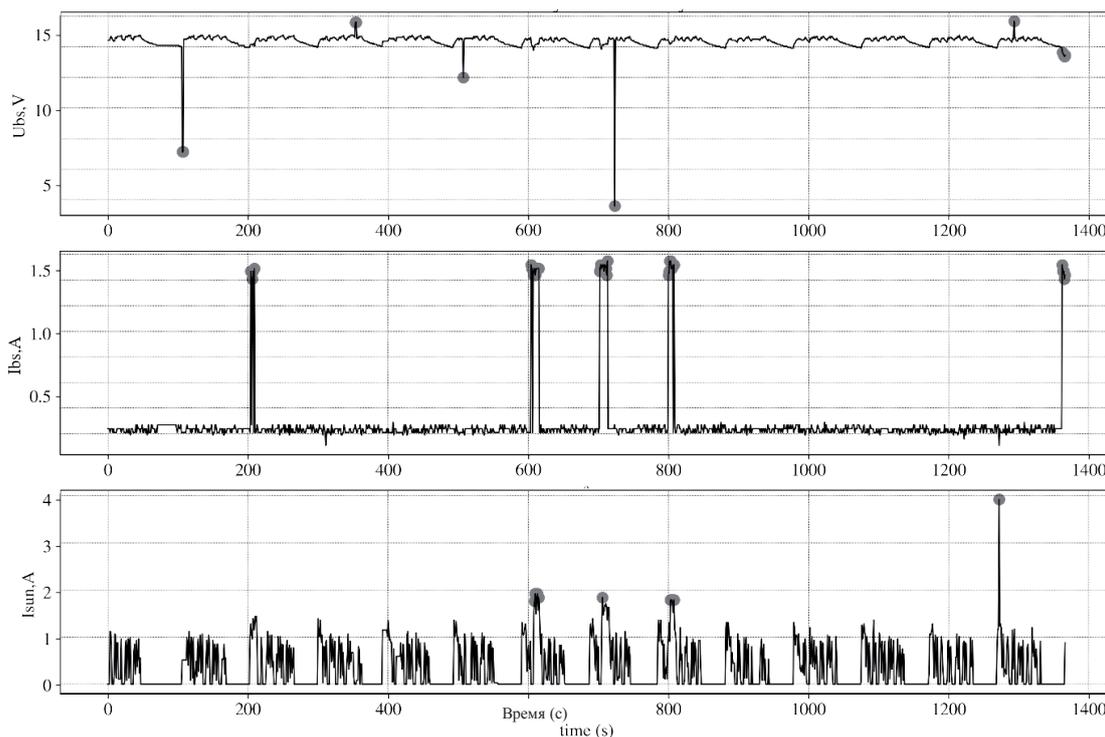


Рисунок 16 – Данные телеметрических измерений системы электропитания с детектированными выбросами

На рисунке 16 видно, что модифицированный метод стандартизованной оценки и межквартильный размах определили как выбросы те данные, которые являются аномалией, вызванной погрешностями при приёме ТМИ. Указанные методы определили как выброс и те данные, которые выбросами не являются, а именно, данные о возросшем токе бортовой сети (Ibs,A) в связи с проведением сеанса связи с КА.

Рассмотренные статистические методы позволяют выявлять резкие изменения параметров работы бортовой аппаратуры. Для детального анализа ТМИ необходимо использование нейросетевых и кластерных методов с целью эффективного выявления аномалий. Применение этих методов сопряжено со сбором значительного объема данных, на которых будет обучаться нейросеть, и необходимостью разработки сложных алгоритмов обработки данных.

Важнейшей технологией, обеспечивающих эффективное функционирование многоспутниковых орбитальных группировок, является межспутниковая коммуникация [26]. Она позволяет применять распределённый подход к решению целевых задач, а также формировать оптимальные по времени маршруты доставки целевой информации потребителю в случае ограничений по скорости доставки и географической локализации наземных пунктов обработки информации.

## 6 Этап утилизации

Требование оснащения всех КА системами увода с орбиты становится одной из норм международного космического права и входит в стандарты работы организаций - производителей ракетно-космической техники всех стран мира.

Использование системы увода КА с орбиты становится необходимым условием для создания многоспутниковой группировки, поскольку потеря контроля над вышедшим из строя КА может представлять угрозу для функционирования группировки в целом из-за возможного столкновения с другими КА. Для обеспечения бесперебойной работы всей системы необходимо как можно скорее вывести из строя вышедший из строя КА и заменить его функционирующим. Эта задача может быть решена с помощью двигательной установки КА или специально разработанной для этой цели спутниковой системы увода с орбиты [27].

Анализ предлагаемых методов борьбы с проблемой образования космического мусора [28-35], приведён в таблице 2. Оценка эффективности системы увода МКА с орбиты требует формирования системы критериев и показателей эффективности, которые представляют собой совокупность важнейших параметров, характеризующих объект с различных сторон и учитывающих его функциональные особенности.

На основе анализа возможных способов увода КА с орбиты определены следующие показатели эффективности системы увода малых космических аппаратов, приведённые к безразмерным относительным величинам с помощью нормирования:

- 1) Относительное время увода,  $\hat{T}$ ;
- 2) Относительная масса системы увода,  $\hat{M}$ ;
- 3) Удельное энергопотребление системы увода,  $\hat{W}$ ;
- 4) Технологичность системы увода,  $S$  – условный показатель, отражающий конструктивную сложность изготовления элементов и системы увода в целом.
- 5) Относительная стоимость системы увода,  $\hat{C}$ ;
- 6) «Надёжность» системы увода,  $R$  – обобщённый показатель, отражающий возможность включения системы увода МКА с орбиты, вероятность её безотказной работы и выполнения целевой функции.

Можно ограничиться рассмотрением указанных показателей в задаче анализа эффективности системы увода, так как они в достаточной мере отражают основные характеристики космических аппаратов и их систем.

Критерий эффективности системы увода МКА с орбиты можно представить в виде:

$$\bar{E} = E(\hat{T}, \hat{M}, \hat{W}, S, \hat{C}, R)^T \rightarrow \max.$$

Зависимость между показателями эффективности в явном виде установить крайне сложно из-за их различной физической сущности. Это определило выбор метода анализа эффективности системы – метод относительной интегральной оценки [36]. Задачу выбора средства увода МКА и оценки его эффективности можно сформулировать как задачу максимизации критерия эффективности  $\bar{E}$ . Алгоритм оценки эффективности системы увода для МКА на основе метода относительной интегральной оценки показан на рисунке 17.

Таблица 2 – Преимущества и недостатки способов увода с орбиты

Тип системы увода		Преимущества	Недостатки
Пассивные (бестопливные)	Тросовая система	1) малая масса; 2) низкая стоимость.	1) сложность изготовления; 2) сложность программы экспериментальной отработки; 3) длительное время увода; 4) большое энергопотребление.
	Аэродинамическая система	1) низкая стоимость; 2) использование естественных внешних сил; 3) Малая масса.	1) использование только на орбитах до 800 км; 2) сложность развёртывания конструкции; 3) уязвимость к микрометеоритам; 4) длительное время увода.
	Солнечный парус	1) использование естественных внешних сил; 2) малая масса; 3) низкая стоимость.	1) уязвимость к микрометеоритам; 2) использование на орбитах ниже 2000 км невозможно.
Активные (топливные)	Жидкостный ракетный двигатель малой тяги	1) широкий диапазон тяги; 2) высокая степень лётной отработки.	1) токсичное топливо; 2) низкий удельный импульс.
	Твердотопливный ракетный двигатель малой тяги	1) малое количество элементов и подсистем; 2) высокая надёжность; 3) длительные сроки хранения топлива.	1) однократное включение; 2) фиксированный общий импульс.
	Электрореактивная двигательная установка	1) высокий удельный импульс; 2) экологичное топливо.	1) низкая тяга; 2) высокая стоимость; 3) длительное время увода; 4) высокое энергопотребление.

По результатам апробации алгоритма сформированы рекомендации по оснащению МКА системами увода в зависимости от массовых и энергетических характеристик КА. Рекомендуемые средства увода по классам КА представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Рекомендуемые средства увода по классам КА

Класс аппарата	Масса, кг	Тип системы ориентации	Мощность системы энергопитания, Вт	Рекомендуемое средство увода
Нано-класс	1-10	Пассивная	5-10	Тросовая/Аэродинамическая
Микро-класс	10-100	Пассивная	10-15	Аэродинамическая
Малые	100-250	Активная	50-100	Твердотопливный реактивный двигатель малой тяги
Малые	250-500	Активная	100-200	Жидкостный реактивный двигатель малой тяги
Малые	500-1000	Активная	250-450	Твердотопливный/ Жидкостный реактивный двигатель малой тяги

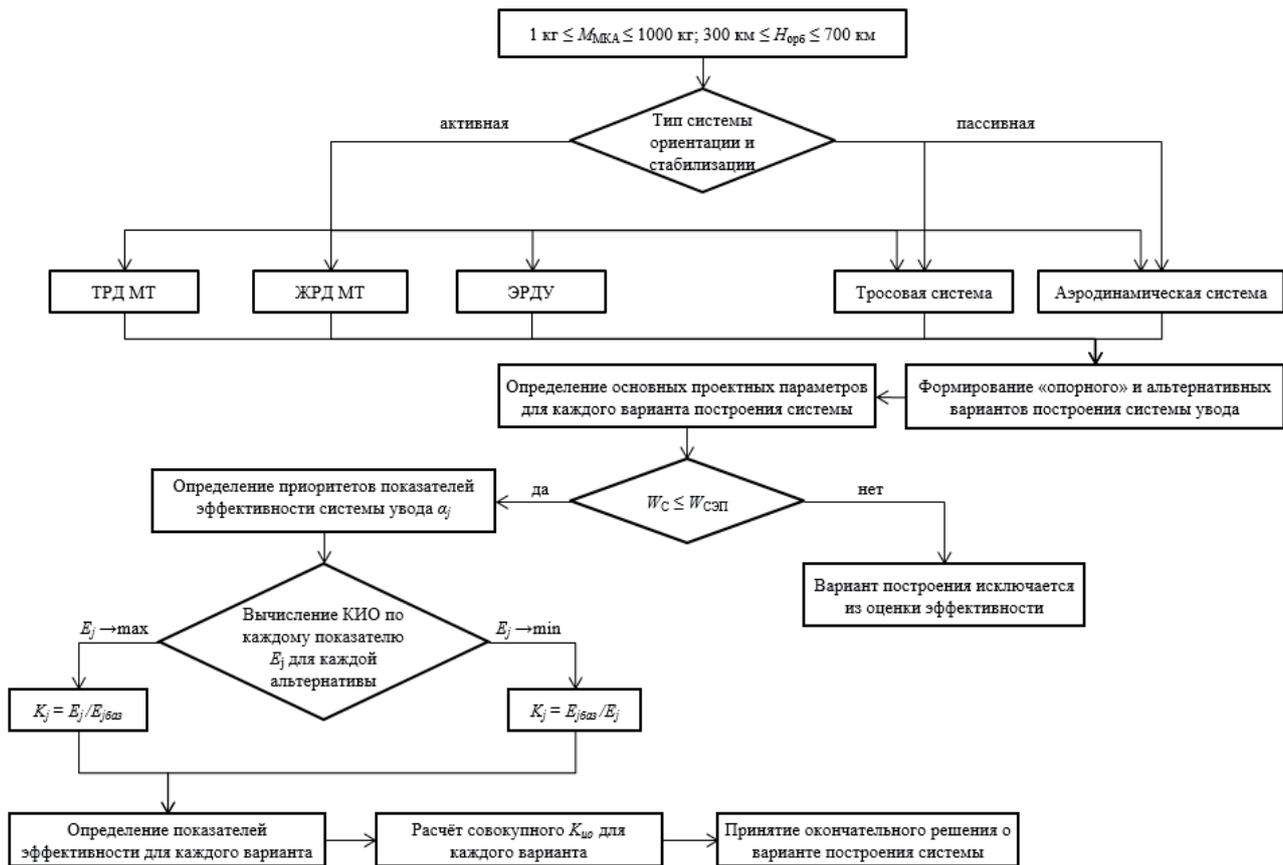


Рисунок 17 – Структурная схема алгоритма оценки эффективности системы увода МКА

С использованием алгоритма оценки эффективности системы увода МКА разработаны проекты оснащения МКА «АИСТ» и МКА «АИСТ-2Д» средствами увода с орбиты, представленные на рисунках 18 и 19 соответственно.

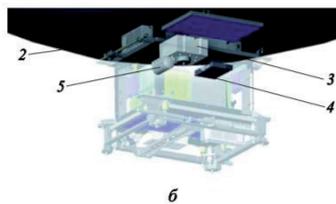
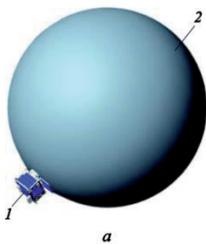


Рисунок 18 – МКА «АИСТ» с аэродинамической системой увода с орбиты: а — общий вид; б — внутренняя компоновка МКА с установленными подсистемами системы увода; 1 — КА; 2 — надуваемый баллон; 3 — контейнер хранения; 4 — контроллер управления; 5 — газогенератор

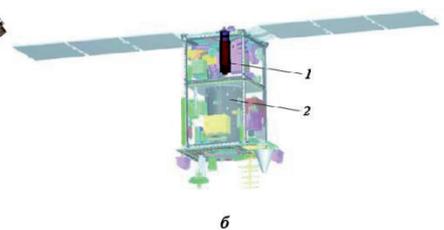


Рисунок 19 – МКА «АИСТ-2Д», оснащённый системой увода на базе твердотопливного ракетного двигателя малой тяги: а — общий вид; б — внутренняя компоновка МКА с установленной системой увода; 1 — твердотопливный реактивный двигатель малой тяги «755 Ns Motor»; 2 — МКА «АИСТ-2Д»

## Заключение

Реализация проектов многоспутниковых орбитальных группировок может привести к появлению принципиально новых продуктов и услуг, таких как непрерывный мониторинг из космоса. Альтернативным решением такой задачи, как непрерывный мониторинг, могут являться КА нового типа, функционирующие на высоких орбитах и использующие оптические системы на новых физических принципах. Примером может являться проект американского

агентства *DARPA – MOIRE* – КА с дифракционной оптической системой, функционирующий на геостационарной орбите [37-39].

Появление многоспутниковых орбитальных группировок – закономерное развитие КС. Реализация проектов такого масштаба ставит перед космической отраслью принципиально новые задачи. Это приведёт к прогрессу в проектировании электронной компонентной базы, БС, подходов к разработке и испытаниям космической техники нового поколения. В случае нахождения баланса между целями многоспутниковой группировки, затратами на её производство и эксплуатацию и приемлемой конечной стоимостью для потребителя, многоспутниковые КС будут успешными с экономической точки зрения.

## Благодарности

Статья подготовлена в рамках проекта по Госзаданию FSSS-2020-0017 «Разработка теоретических основ, методического и программного обеспечения для решения задач оперативного мониторинга Земли на основе интеллектуальной обработки и тематической классификации гиперспектральных данных с использованием линейки малых космических аппаратов на базе платформы «АИСТ».

## Список источников

- [1] *Keith A., Larrea Brito N.*, Satellite-based Earth observation market prospects to 2027: 11th Ed-n. Euroconsult. 2018.
- [2] *Ткаченко, С.И.* Проектный облик и основные характеристики малого космического аппарата СГАУ – ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, Н.Д. Семкин, В.И. Куренков, В.И. Абрашкин, А.Г. Прохоров, И.С. Ткаченко // Вестник СГАУ. №2, 2010. – С. 154-165.
- [3] *Kirilin, A.* Small Satellites "AIST" Constellation - Design, Construction and Program of Scientific and Technological Experiments / A. Kirilin, E. Shakhmatov, V. Soifer etc. // Procedia Engineering, 2015. Vol. 104. P.43-49.
- [4] *Kirilin, A.N.* Design, testing and operation of «AIST» small satellites / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov, V.I. Abrashkin etc. // Proceedings of 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2015. P.819-823.
- [5] *Кирилин, А.Н.* Лётно-конструкторские испытания и опытная эксплуатация малых космических аппаратов «АИСТ»/А.Н. Кирилин, С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, Н.Д. Семкин, А.П. Папков, В.И. Абрашкин, И.С. Ткаченко, Ю.Е. Железнов, Е.Ю. Галаева// Вестник СГАУ. – Т.14, № 4. – 2015. – С. 58 – 71.
- [6] *Кирилин, А.Н.* Малые космические аппараты серии «АИСТ» (проектирование, испытания, эксплуатация и развитие) / А.Н. Кирилин, С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, И.С. Ткаченко, Н.Д. Семкин, С.Л. Сафронов, В.И. Абрашкин. - Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2017. – 348 с.
- [7] *Кирилин, А.Н.* Опытно-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов, С.И. Ткаченко, А.И. Бакланов, В.В. Салмин, Н.Д. Семкин, И.С. Ткаченко, О.В. Горячкин. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
- [8] *Кирилин, А.Н.* Основные проектные характеристики малых космических аппаратов научного и прикладного назначений на базе унифицированной платформы «АИСТ-2»/А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.И. Бакланов, Н.Р. Стратилатов, В.И. Абрашкин, Е.В. Космодемьянский, С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов // Космическая техника и технологии, 2020. – № 4(31).– С.18-32.
- [9] *Кирилин, А.Н.* Формирование на базе платформы "АИСТ-2" проектного облика малого космического аппарата обзорного наблюдения, функционирующего в составе орбитальной группировки / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, В.В. Салмин, Е.В. Космодемьянский, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов, М.А. Иванушкин, С.С. Волгин // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XV научно-технической конференции (г. Алушта, 16-21 сентября 2018 г.) - Калуга: Манускрипт. – 2018. – С.32-35.
- [10] *Кирилин, А.Н.* Формирование региональной космической системы оперативного мониторинга Земли в интересах решения задач картографии, развития сельского хозяйства и экологической безопасности на базе малых космических аппаратов серии "АИСТ" с широкозахватной целевой аппаратурой среднего разрешения/ А.Н. Кирилин, Г.П. Аншаков, А.И. Бакланов, В.В. Салмин, И.С. Ткаченко, М.А. Иванушкин, С.С. Волгин // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XV научно-технической конференции (г. Алушта, 16-21 сентября 2018 г.) - Калуга: Манускрипт. – 2018. – С.36 - 39.

- [11] Стандарт ИСО 9004-1-94. Управление качеством и элементы системы качества. М., 1994.
- [12] **Побирский, Е.Ю.** Управление жизненным циклом изделия в производстве ракетно-космической техники / Е.Ю. Побирский, А.С. Галаев, И.С. Филимонов // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - Изд-во: СибГАУ, Том 2, 2012. - С. 633-634.
- [13] **Комарова, Л.А.** Применение технологии нисходящего проектирования, основанной на решениях Windchill PDMLink и САПР Pro/Engineer, для разработки изделий ракетно-космической техники / Л.А. Комарова, А.Н. Филатов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – №1(2) (39). – С.297-303.
- [14] ГОСТ 2.102-2013. Виды и комплектность конструкторских документов. Дата введения 2014-06-01.
- [15] **Колчин, А.Ф.** Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин, М.В. Овсянников, А.Ф. Стрекалов, С.В. Сумароков. – М.: Анахарис, 2002. – 304 с.
- [16] **Никашина, И.В.** Автоматизированное управление конструкторскими данными в едином информационном пространстве предприятия / И.В. Никашина, А.Н. Филатов, В.А. Комаров // Сборников трудов Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015)» Изд-во: СГАУ. 2015. С.21-29.
- [17] **Сафронов, С.Л.** Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ: монография / С.Л. Сафронов, И.С. Ткаченко, М.А. Иванушкин, С.С. Волгин. - Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 276 с.
- [18] **Box, M.J.** A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods / M. J. Box // The Computer Journal, Volume 8, Issue 1, April 1965. – Pp. 42–52.
- [19] **Иголкин, А.А.** Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата «АИСТ-2Д» / А.А. Иголкин, А.И. Сафин, А.Г. Филипов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. –Т. 17. № 2. – С.100-108.
- [20] **Tkachenko, S.I.** Verifying Parameters of Ground Data Processing for the Thermal Control System of Small Spacecraft AIST Based on Telemetry Data Obtained by Samara University's GCS / S.I. Tkachenko, V.V. Salmin, I.S. Tkachenko, I.V. Kaurov, M.D. Korovin // Procedia Engineering, 2017. – Vol. 185. – Pp.205-211.
- [21] **Foster, C.** Differential drag control scheme for large constellation of Planet satellites and on-orbit results / C. Foster, J. Mason, V. Vittaldev, L. Leung etc. // arXiv preprint arXiv:1806.01218, 2018. – 18 p.
- [22] **Иванушкин, М.А.** Разработка способов обеспечения энергетического баланса при работе целевой аппаратуры малых космических аппаратов серии «АИСТ» в условиях энергетических ограничений / М.А. Иванушкин, В.В. Салмин, С.С. Волгин, С.И. Ткаченко, И.С. Ткаченко // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. № 4. – С.57-66.
- [23] **Volgin, S.S.** Algorithms of Processing and Analysis of Telemetric formation of Small Satellite of the "AIST" Series for the Purpose of Prompt Detection of Failures of on-Board Equipment / V.V. Salmin, I.S. Tkachenko, S.S. Volgin, M.A. Ivanushkin, D. Chen, V. Vassilev // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019. – 2019. – P.108-111.
- [24] **Salmin, V.V.** Processing of telemetry data arrays for “AIST” small satellites using the methods of imputing missing data / V.V. Salmin, M.A. Ivanushkin, S.S. Volgin, I.S. Tkachenko // AIP Conference Proceedings 2046, 2019.
- [25] **Chandola, V.** Anomaly Detection / V. Chandola, A. Banerjee // ACM: Computing Surveys, 2009, 41 p.
- [26] **Radhakrishnan, R.** Survey of Inter-Satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View / R. Radhakrishnan, W. Edmonson, F. Afghah etc. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016. – Vol. 18. no. 4. – Pp.2442-2473.
- [27] **Krestina, A.V.** Determining design characteristics of the de-orbiting system for the small satellite / A.V. Krestina, I.S. Tkachenko // AIP Conference Proceedings 2318, 020010 (2021).
- [28] **Пикалов, Р.С.** Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора / Р.С. Пикалов, В.В. Юдинцев // Труды МАИ. 2018. № 100. <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>.
- [29] **Aslanov, V.S.** Dynamics of tethered satellite systems / V.S. Aslanov, A.S. Ledkov // Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. 331 p.
- [30] **Улыбышев, С.Ю.** Математическое моделирование и сравнительный анализ схем применения аппарата буксировщика для решения задачи увода объектов космического мусора на орбиту захоронения. Часть 1 / С.Ю. Улыбышев // Труды МАИ. 2019. № 106. <http://trudymai.ru/published.php?ID=107855>.
- [31] **Forward, R.L.** Terminator TetherTM: A Spacecraft Deorbit Device / R.L. Forward, R.P. Hoyt // Journal of spacecraft and rockets, 2000. Vol. 37. no.2. P.187-196.
- [32] **Janovsky, R.** End-of-life de-orbiting strategies for satellites / R. Janovsky, M. Kassebom, H. Lübberstedt, O. Romberg, H. Burkhardt, M. Sippel, G. Krülle, B. Fritsche // Deutscher Luft- und Raumfahrt congress, 2002.
- [33] **Палий, А.С.** Об эффективности устройства аэродинамического торможения для увода космических аппаратов / А. С. Палий // Техническая механика. 2012. № 4. С.82-90.
- [34] **Трофимов, С.П.** Увод малых космических аппаратов с низких околоземных орбит: дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.02.01. М., 2015. 125 с.

- [35] **Рыжков, В.В.** Двигательные установки и ракетные двигатели малой тяги на различных физических принципах для систем управления малых и сверхмалых космических аппаратов / В.В. Рыжков, А.В. Сулинов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т.17. №4. С.115-128.
- [36] **Ткаченко, И.С.** Интегральная оценка эффективности космической системы орбитальной инспекции на базе малых космических аппаратов / И.С. Ткаченко, И.В. Кауров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. №1 (39). С.91-100.
- [37] **Early, J.** Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens / J. Early, R. Hyde, R. Baron // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2004. Vol. 5166. P.148-156.
- [38] **Atcheson, P.** MOIRE - Initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes / P. Atcheson, C. Stewart, J. Domber, K. Whiteaker, J. Cole, P. Spuhler, A. Seltzer, L. Smith // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2012. Vol. 8442, Article number 844221.
- [39] **Atcheson, P.** MOIRE - Ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope / P. Atcheson, J. Domber, K. Whiteaker, J. A. Britten, S. N. Dixit, B. Farmer // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2014. Vol.9143, Article number 91431W.

## Сведения об авторе



**Ткаченко Иван сергеевич**, 1985 г. рождения. Окончил Самарский аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (2008), к.т.н. (2012), доцент кафедры космического машиностроения, исполнительный директор Института авиационной и ракетно-космической техники. В списке научных трудов более 70 публикаций в исследования и создания малых космических аппаратов. Научные интересы: малые космические аппараты, электрореактивные двигатели, системный анализ, орбитальная инспекция. Author ID (РИНЦ): 602393. Author ID (Scopus): 12645515700. [tkachenko.is@ssau.ru](mailto:tkachenko.is@ssau.ru).

Поступила в редакцию 2.12.2021, после рецензирования 17.12.2021. Принята к публикации 21.12.2021.

## Analysis of key technologies for creating multisatellite orbital constellations of small spacecraft

**I.S. Tkachenko**

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

### Abstract

One of the key areas of modern world cosmonautics is the development of cluster space systems for various purposes, consisting of a large number of functioning spacecraft. This became possible due to a decrease in the mass of spacecraft due to the creation and use of new materials, the development of electronics and microelectromechanical systems, the use of the group launch method, the development of multi-agent technologies and inter-satellite communication systems. There are projects of systems consisting of a large number of space objects, such as OneWeb, Planet, Starlink, Satellogic, etc. The main classes of devices used to create such multi-satellite systems are small satellites, including the number of micro (up to 100 kg) and nano (up to 10-15 kg) classes, which have significant advantages over heavy spacecraft, especially in terms of the timing and cost of their creation. The deployment of multi-satellite constellations, including hundreds and thousands of satellites, requires fundamentally new approaches to the creation of spacecraft and the system as a whole at all stages of the life cycle. The article discusses the key technologies used to create multi-satellite orbital constellations based on small satellites at different stages of the life cycle - from the early stages of design to the stage of operation and disposal (information from orbit). The experience of a joint project of Samara University and the Progress Rocket and Space Center on the creation of a constellation of small spacecraft of the AIST series is presented.

**Key words:** *multisatellite constellation, small spacecraft, project, design parameters, optimization, life cycle, technology.*

**Citation:** *Tkachenko IS. Analysis of key technologies for creating multisatellite orbital constellations of small spacecraft [In Russian]. Ontology of designing. 2021; 11(4): 478-499. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.*

**Acknowledgements:** This work is supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation in the framework of the State Assignments to higher education institutions and research organizations in the field of scientific activity (the project FSSS-2020-0017).

## List of figures and tables

- Figure 1 - Forecast of the agency "Euroconsult" for the launch of small satellites  
 Figure 2 - Top-down design diagram  
 Figure 3 - Electronic model of the small satellite "AIST-2D"  
 Figure 4 - Small satellites designed on the basis of the AIST-2 platform with various types of target equipment  
 Figure 5 - Algorithm for choosing the optimal design parameters for a unified platform for satellites  
 Figure 6 - Flight and technological samples of the small satellite "AIST" during radio tests  
 Figure 7 - Virtual prototype tests of a small satellite using *Creo/Windchill* software  
 Figure 8 - Comparison of the results of virtual and field tests  
 Figure 9 - Telescope lens for the *CubeSX-HSE* nanosatellite made using additive technologies  
 Figure 10 - Scheme of on-orbit delivery of a constellation of small satellite  
 Figure 11 - Changing the cross-sectional area of satellite "Flock" to build the orbital group "Plane"  
 Figure 12 - Algorithm for overcoming an emergency in the event of a failure of the antenna device of the small satellite "AIST"  
 Figure 13 - Algorithm for assessing the energy balance and the possibility of turning on the target equipment for the small satellite "AIST" in the conditions of degradation of the battery  
 Figure 14 - Example of telemetry data with missing values  
 Figure 15 - Example of telemetry data with statistical outliers  
 Figure 16 - Power system telemetry data with detected emissions  
 Figure 17 - Block diagram of the algorithm for evaluating the efficiency of the deorbiting system of small satellite  
 Figure 18 - Small satellite "AIST" with aerodynamic deorbiting system  
 Figure 19 - Small satellite "AIST-2D", equipped with the deorbiting system based on a low-thrust solid-propellant engine  
 Table 1 - Comparison of methods for recovering missing values in telemetry data  
 Table 2 - Advantages and disadvantages of deorbiting methods  
 Table 3 - Recommended means of withdrawal by classes of small satellite

## References

- [1] *Keith A, Larrea Brito N.* Satellite-based Earth observation market prospects to 2027: 11th Edition. Euroconsult. 2018.
- [2] *Tkachenko SI, Salmin VV, Semkin ND, Kurenkov VI, Abrashkin VI, Prokhorov AG, Tkachenko IS, Petrukhina KV.* The design and basic characteristics of a small spacecraft of SSAU – «TsSKb-Progress» [In Russian]. *Vestnik SGAU* 2010; 2: 154-165.
- [3] *Kirilin A, Shakhmatov E, Soifer V, Akhmetov R, Tkachenko S, Prokofev A, Salmin V, Stratilatov N, Semkin N, Abrashkin V, Tkachenko I, Safronov S, Zheleznov Y.* Small Satellites "AIST" Constellation - Design, Construction and Program of Scientific and Technological Experiments. *Procedia Engineering* 2015; 104: 43-49.
- [4] *Kirilin A, Akhmetov R, Abrashkin V, Shakhmatov E, Soifer V, Tkachenko S, Prokofiev A, Stratilatov N, Salmin V, Semkin N, Tkachenko I.* Design, testing and operation of «AIST» small satellites. *Proceedings of 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies* 2015: 819-823.
- [5] *Kirilin AN, Tkachenko SI Salmin, VV, Semkin ND, Papkov AP, Abrashkin VI, Tkachenko IS, Zheleznov YuE, Galaeva EYu.* Flight development tests and attempted operation of «AIST» small satellites [In Russian]. *Vestnik SGAU* 2015; 14, 4: 58-71.

- [6] **Kirilin AN, Tkachenko SI, Salmin VV, Tkachenko IS, Semkin ND, Safronov SL, Abrashkin VI.** Small spacecraft of the "AIST" series (design, testing, operation and development) [In Russian]. Samara: Samara Scientific Center of RAS; 2017. 348 p.
- [7] **Kirilin A, Akhmetov RN, Shakhmatov EV, Tkachenko SI, Baklanov AI, Salmin VV, Semkin ND, Tkachenko IS, Goryachkin OV.** Experimental and technological small spacecraft "AIST-2D" [In Russian]. Samara: Samara Scientific Center of RAS; 2017. 324 p.
- [8] **Kirilin AN, Akhmetov RN, Tkachenko SI, Stratilatov NR, Salmin VV, Voronov KE, Abrashkin VI, Tkachenko IS, Piyakov AV, Safronov SL.** Key design parameters and operational results for a constellation of small spacecraft for scientific and educational purposes of the AIST series [In Russian]. Space technique and technologies 2020; 4(31): 18-32.
- [9] **Kirilin AN, Akhmetov RN, Salmin VV, Kosmodemyanskiy EV, Tkachenko IS, Safronov SL, Volgin SS, Ivanushkin MA.** Formation on the basis of the AIST-2 platform of the design appearance of a small surveillance observation spacecraft operating as part of an orbital constellation [In Russian]. Systems for observation, monitoring and remote sensing of the Earth: Materials of the XV scientific and technical conference (Alushta, September 16-21, 2018). Kaluga: Manuscript; 2018: 32-35.
- [10] **Kirilin AN, Anshakov GP, Baklanov AI, Salmin VV, Tkachenko IS, Volgin SS, Ivanushkin MA.** Formation of a regional space system for operational monitoring of the Earth in the interests of solving problems of cartography, the development of agriculture and environmental safety on the basis of small spacecraft of the "AIST" series with wide-range target equipment of medium resolution [In Russian]. Systems for observation, monitoring and remote sensing of the Earth: Materials of the XV scientific and technical conference (Alushta, September 16-21, 2018). Kaluga: Manuscript; 2018: 36-39.
- [11] ISO 9004-1-94 standard. Quality management and elements of the quality system [In Russian]. Moscow; 1994.
- [12] **Pobirsky EYu, Galaev AS, Filimonov IS.** Product lifecycle management in the space-based rocket industry [In Russian]. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference "Reshetnev Readings". Publishing house: SibGAU, 2012; 2: 633-634.
- [13] **Komarova LA, Filatov AN.** Application of descending designing technology based on decisions Windchill PDMlink and SAPR Pro/ENGINEER, for working out products of space-rocket technics m. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 2011; 13, 1(2): 297-303.
- [14] GOST 2.102-2013. Types and completeness of design documents [In Russian]. Moscow: Standardinform; 2014.
- [15] **Kolchin AF, Ovsyannikov MV, Strekalov AF, Sumarokov SV.** Product lifecycle management [In Russian]. Moscow: Anacharsis; 2002. 304 p.
- [16] **Nikashina IV, Filatov AN, Komarov VA.** Automated management of design data in a single information space of the enterprise [In Russian]. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Perspective Information Technologies (PIT 2015)". Samara: SSAU; 2015: 21-29.
- [17] **Safronov SL, Tkachenko IS, Ivanushkin MA, Volgin SS.** Modern approaches to the creation of small satellites for remote sensing of the Earth on the basis of unified platforms [In Russian]: monograph. Samara: Samara University publ.; 2019. 276 p.
- [18] **Box MJ.** A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods. The Computer Journal 1965; 8, 1: 42-52.
- [19] **Igolkin AA, Safin AI, Filipov AG.** Modal analysis of the dynamic mockup of "AIST-2D" small spacecraft [In Russian]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering 2018; 17, 2: 100-108.
- [20] **Tkachenko SI, Salmin VV, Tkachenko IS, Kaurov IV, Korovin MD.** Verifying Parameters of Ground Data Processing for the Thermal Control System of Small Spacecraft AIST Based on Telemetry Data Obtained by Samara University's GCS. Procedia Engineering 2017; 185: 205-211.
- [21] **Foster C, Mason J, Vittaldev V, Leung L, Beukelaers V, Stepan L, Zimmerman R.** Differential drag control scheme for large constellation of Planet satellites and on-orbit results. Preprint (arXiv:1806.01218); 2018. 18 p.
- [22] **Ivanushkin MA, Salmin VV, Tkachenko SI, Tkachenko IS, Volgin SS.** Development of methods for ensuring energy balance for the operation of mission equipment of "AIST"-series small satellites under conditions of power limitations [In Russian]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering 2018; 17, 4: 57-66.
- [23] **Volgin SS, Salmin VV, Tkachenko IS, Volgin SS, Ivanushkin MA, Chen D, Vassilev V.** Algorithms of Processing and Analysis of Telemetric formation of Small Satellite of the "AIST" Series for the Purpose of Prompt Detection of Failures of on-Board Equipment. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019: 108-111.
- [24] **Salmin VV, Ivanushkin MA, Volgin SS, Tkachenko IS.** Processing of telemetry data arrays for "AIST" small satellites using the methods of imputing missing data. AIP Conference Proceedings 2019; 2046.
- [25] **Chandola V, Banerjee A.** Anomaly Detection. ACM: Computing Surveys; 2009. 41 p.

- [26] **Radhakrishnan R, Edmonson W, Afghah F, Rodriguez-Osorio RM, Pinto F, SC Burleigh.** Survey of Inter-Satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View. IEEE Communications Surveys and Tutorials 2016; 18, 4: 2442-2473.
- [27] **Krestina AV, Tkachenko IS.** Determining design characteristics of the de-orbiting system for the small satellite. AIP Conference Proceedings 2021; 2318 (020010).
- [28] **Pikalov RS, Yudin VV.** Review and selection of bulky space debris removal means [In Russian]. Trudy MAI 2018; 100.
- [29] **Aslanov VS, Ledkov AS.** Dynamics of tethered satellite systems. Cambridge: Woodhead Publishing; 2012. 331 p.
- [30] **Ulybyshev SY.** Mathematical modeling and comparative analysis towing vehicle schemes application to solve the problem of space debris objects removal to the disposal orbit. Part 1 [In Russian]. Trudy MAI 2019; 106.
- [31] **Forward RL, Hoyt RP.** Terminator TetherTM: A Spacecraft Deorbit Device. Journal of spacecraft and rockets 2000; 37, 2: 187-196.
- [32] **Janovsky R, Kassebom M, Lübberstedt H, Romberg O, Burkhardt H, Sippel M, Krülle G, Fritsche B.** End-of-life de-orbiting strategies for satellites. Deutscher Luft- und Raumfahrt congress; 2002.
- [33] **Paliy AS.** On the effectiveness of the aerodynamic braking device for the deorbiting of spacecraft [In Russian]. Technical mechanics 2012; 4: 82-90.
- [34] **Trofimov SP.** Deorbiting of low-earth orbit small satellites [In Russian]: diss. cand. phys.-mat. sciences: 01.02.01. Moscow; 2015. 125 p.
- [35] **Ryzhkov VV, Sulinov AV.** Propulsion systems and low-thrust rocket engines based on various physical principles for control systems of small and micro-spacecraft [In Russian]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering 2018; 17, 4: 115-128.
- [36] **Tkachenko IS, Kaurov IV.** Integrated assessment of the efficiency of an orbital inspection space system based on small satellites [In Russian]. Vestnik SGAU 2013; 1 (39): 91-100.
- [37] **Early J, Hyde R, Baron R.** Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2004; 5166: 148-156.
- [38] **Atcheson P, Stewart C, Domber J, Whiteaker K, Cole J, Spuhler P, Seltzer A, Smith L.** MOIRE - Initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2012; 8442.
- [39] **Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, Britten JA, Dixit SN, Farmer B.** MOIRE - Ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2014; 9143.

### About the author

**Ivan Sergeevich Tkachenko** (b.1985) graduated from the Samara Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (2008), Candidate degree in engineering (2012). Ph.D. Associate Professor of the Department of Space Engineering, Executive Director of the Institute of Aviation and Rocket and Space Technology. The list of scientific works includes more than 70 publications in research and creation (design, production, operation) of small spacecraft. Research interests: small spacecraft, electric propulsion, systems analysis, orbital inspection. Author ID (RSCI): 602393. Author ID (Scopus): 12645515700. [tkachenko.is@ssau.ru](mailto:tkachenko.is@ssau.ru).

*Received December 2, 2021. Revised December 17, 2021. Accepted December 21, 2021.*

## ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.822:004.89

DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520

### Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования

Ю.А. Загоруйко, Е.А. Сидорова, Г.Б. Загоруйко, И.Р. Ахмадеева, А.С. Серый

*Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, Новосибирск, Россия*

#### Аннотация

В настоящее время онтологии признаны наиболее эффективным средством формализации и систематизации знаний и данных в научных предметных областях (НПрО). Однако разработка онтологий является сложным и трудоёмким процессом. Практика показала, что при разработке онтологий НПрО, особенно эффективно применение паттернов онтологического проектирования. Это связано с тем, что в онтологиях НПрО, как правило, содержится большое количество типовых фрагментов, которые хорошо описываются паттернами онтологического проектирования. Благодаря тому, что использование паттернов онтологического проектирования значительно облегчает разработку онтологий НПрО, к ней можно привлечь экспертов в моделируемой НПрО, не владеющих навыками онтологического моделирования. Для получения онтологий НПрО, необходимо обработать огромное количество публикаций, релевантных моделируемой НПрО. Облегчить и ускорить процесс пополнения онтологий информацией из таких источников можно за счёт использования лексико-синтаксических паттернов онтологического проектирования. В статье представлен подход к автоматизированному построению онтологий НПрО на основе системы разнородных паттернов ОП. Система включает паттерны ОП, предназначенные для разработчиков онтологий, и автоматически построенные на их основе лексико-синтаксические паттерны, с помощью которых может выполняться автоматическое пополнение онтологий информацией, извлекаемой из текстов на естественном языке.

**Ключевые слова:** научная предметная область, паттерн. онтологическое проектирование, паттерны содержания, автоматическая генерация паттернов, пополнение онтологий.

**Цитирование:** Загоруйко, Ю.А. Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования / Ю.А. Загоруйко, Е.А. Сидорова, Г.Б. Загоруйко, И.Р. Ахмадеева, А.С. Серый // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.500-520. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.

#### Введение

В настоящее время онтологии признаны наиболее эффективным средством формализации и систематизации знаний и данных в научных предметных областях (НПрО), под которыми принято понимать предметные области (ПрО), охватывающие некоторую научную дисциплину или область научных знаний во всех её аспектах, включая характерные для неё объекты и предметы исследования, применяемые методы, выполняемую научную деятельность и полученные результаты.

Разработка онтологий ПрО является сложным и трудоёмким процессом. Для его упрощения и облегчения предложены и применяются различные методы и подходы [1, 2]. Можно отметить три основных подхода:

1. Разработка онтологий «с нуля» [3-5].
2. Создание онтологий из «готовых блоков» [6-8].

### 3. Автоматическое построение онтологии [9].

Первый подход является самым трудоёмким и требует привлечения опытных специалистов в области онтологического инжиниринга.

Второй подход менее трудоёмкий, так как предполагает использование заранее созданных базовых онтологий и/или их фрагментов, которые можно специализировать под конкретную ПрО. Он позволяет вовлечь в процесс построения онтологий специалистов в ПрО, для которых создаются онтологии.

Третий подход наименее трудоёмкий, но не позволяет построить онтологии высокого качества.

В данной статье описан подход, реализующий автоматическое пополнение онтологии, построенной в рамках второго подхода. Его особенностью является то, что на первом этапе инженерами знаний и экспертами в НПрО выполняется разработка и начальное наполнение онтологии с использованием базовых онтологий и их фрагментов (паттернов онтологического проектирования, ОП), а на втором этапе - автоматическое пополнение онтологии НПрО онтологическими сущностями, извлечёнными из тематического корпуса текстов.

Первый этап предложенного подхода опирается на использование паттернов ОП (*Ontology Design Patterns* или *ODPs*) [7, 10, 11], представляющих собой документально зафиксированные описания проверенных на практике решений типовых проблем онтологического моделирования.

Опыт авторов показывает, что применение паттернов ОП особенно эффективно при разработке онтологий НПрО [12, 13]. Это связано с тем, что в онтологии НПрО, как правило, содержится большое количество типовых фрагментов, которые хорошо описываются паттернами ОП. Благодаря этому к разработке онтологий НПрО можно привлечь экспертов в моделируемой НПрО, не владеющих навыками онтологического моделирования, что позволяет ускорить разработку онтологий НПрО.

Для того, чтобы получить онтологию НПрО требуется обработать огромное количество публикаций, релевантных моделируемой области, и извлечь из них онтологические сущности, дополняющие онтологию, построенную на первом этапе. Для пополнения онтологии на основе извлечения информации из текстов на естественном языке разрабатываются различные методы и подходы [14-17]. Особенностью рассматриваемого в статье подхода является автоматическое пополнение онтологий НПрО на основе анализа тематического корпуса текстов с использованием лексико-синтаксических паттернов (ЛСП), построенных на основе паттернов ОП, используемых на первом этапе, словаря общенаучной лексики и текущей версии онтологии.

## 1 Онтология паттернов ОП

Онтология паттернов ОП (см. рисунок 1) включает систематизацию паттернов ОП, описание их свойств и отношений между ними, методов и областей их применения, публикаций, информационных ресурсов и др.

Систематизация паттернов ОП может выполняться по следующим основаниям: по типам решаемых проблем онтологического моделирования, по назначению (по типам решаемых прикладных задач), по областям использования, т.е. ПрО.

В качестве базовой принята систематизация паттернов по типам решаемых проблем онтологического моделирования. При разработке такой систематизации использована классификация, предложенная в исследовательском проекте *NeOn* [18]. Паттерны ОП разделяются на шесть основных типов: Структурные паттерны (*Structural ODPs*), Паттерны соответствия (*Correspondence ODPs*), Паттерны содержания (*Content ODPs*), Паттерны логического выво-

да (*Reasoning ODPs*), Паттерны представления (*Presentation ODPs*) и ЛСП (*Lexico-Syntactic ODPs*). Структурные паттерны подразделяются на Архитектурные паттерны (*Architectural ODPs*) и Структурные логические паттерны (*Structural Logical ODPs*).

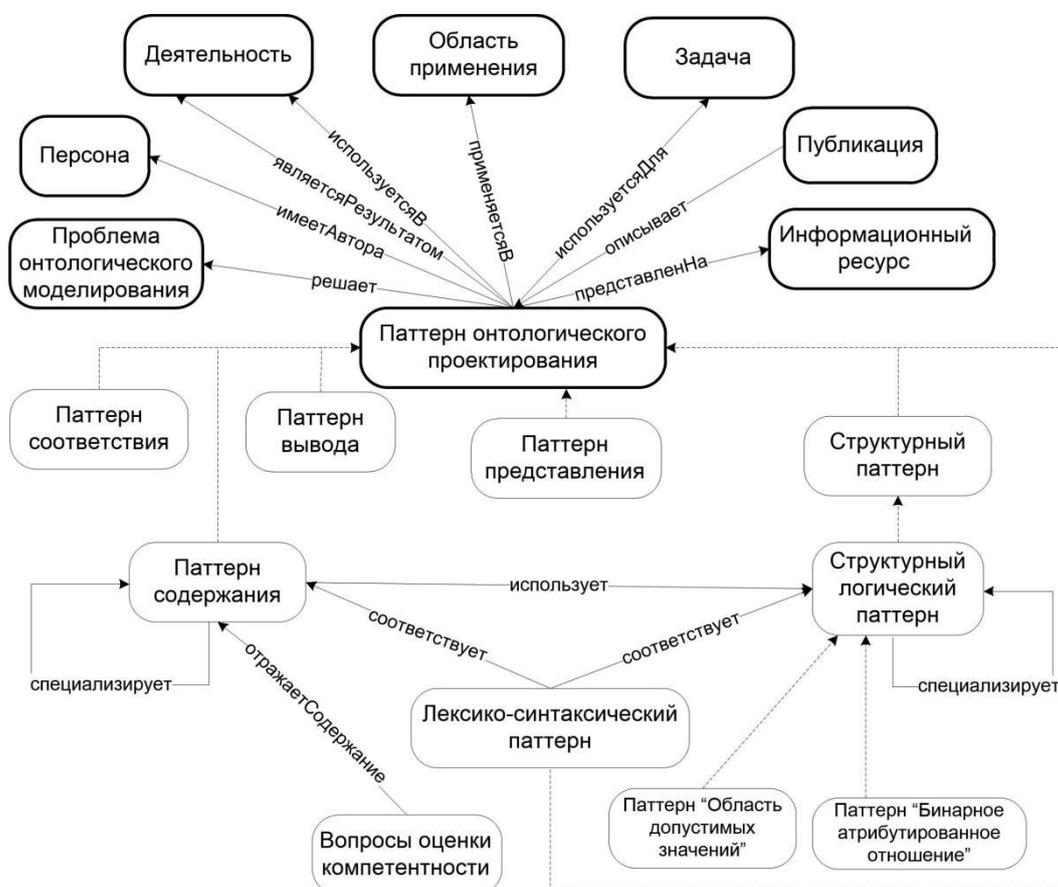


Рисунок 1 – Онтология паттернов онтологического проектирования

Ядро онтологии ОП составляют класс *Паттерн ОП*, задающий основные свойства паттернов ОП, и его подклассы, используемые для представления типов паттернов ОП. Такими классами являются *Структурный логический паттерн*, *Паттерн содержания*, *Паттерн представления* и др.

Описание свойств паттернов ОП выполняется на основе формата, предложенного на портале ассоциации *ODPA* [19]. В описание паттерна включаются сведения об авторе и области применения, текстовое описание, графическое представление, ссылки на другие паттерны, набор сценариев и примеров использования. Паттерн содержания дополняется набором вопросов оценки компетентности (*Competency questions*) [20].

Формат описания паттернов дополнен элементами, служащими для описания контекста разработки и использования паттернов ОП. Для этих целей в онтологию паттернов ОП включены следующие классы: *Область применения* (ПрО), *Деятельность*, *Задача*, *Публикация*, *Персона*, *Организация*, *Информационный ресурс* и др. Для связывания паттернов с экземплярами этих классов в онтологию паттернов ОП включены отношения, позволяющие связать паттерны ОП с ПрО, персонами, организациями и проектами, в которых они используются, а также с публикациями и информационными ресурсами, где они описываются.

Между паттернами содержания, а также между структурными логическими паттернами, определено отношение «*специализирует*», которое связывает «исходные» паттерны с построенными на их основе паттернами, настроенными на моделируемую НПрО.

Наиболее полно в онтологии описаны паттерны, реализованные в предлагаемой системе автоматизированного построения онтологий НПрО [12]: структурные логические паттерны, паттерны содержания, паттерны представления и лексико-синтаксические паттерны.

Необходимость в использовании структурных логических паттернов возникла из-за недостатка в языке *OWL* [21] выразительных средств для представления сложных сущностей и конструкций, актуальных при построении онтологий НПрО, в частности, многоместных и атрибутированных отношений (бинарных отношений с атрибутами), а также областей допустимых значений, определяемых разработчиком онтологии.

Паттерн «Область допустимых значений» предназначен для задания возможных значений какого-либо свойства класса, когда всё множество таких значений (как правило, строковых) известно заранее и поэтому может быть зафиксировано на этапе разработки.

Паттерны содержания предназначены для поддержки единообразного и непротиворечивого представления используемых в НПрО понятий и их свойств. Такие паттерны были разработаны для понятий, характерных для большинства НПрО: *Объект исследования*, *Предмет исследования*, *Метод*, *Задача*, *Раздел науки*, *Научный результат*, *Деятельность*, *Проект*, *Персона*, *Организация*, *Публикация*, *Информационный ресурс* и др. Для каждого из этих паттернов определён набор вопросов проверки компетентности. С помощью этих вопросов выявлены обязательный и факультативный составы онтологических элементов паттерна и описаны требования к ним, которые представлены в виде аксиом и ограничений.

Для каждого паттерна, представляющего понятие НПрО, составлен набор ключевых атрибутов, однозначно определяющих конкретный экземпляр понятия.

В качестве примера рассмотрен паттерн для представления понятия «Метод» (рисунок 2). Элементы описания этого паттерна представлены обязательными классами онтологии *Задача*, *Раздел науки*, *Персона* и *Организация*, необязательными (факультативными) классами *Деятельность*, *Научный результат* и др., а также отношениями «используется в», «реализуется в», «решает», «имеет автора» и др. У паттерна, представляющего понятие «Метод», есть один ключевой атрибут «Название».

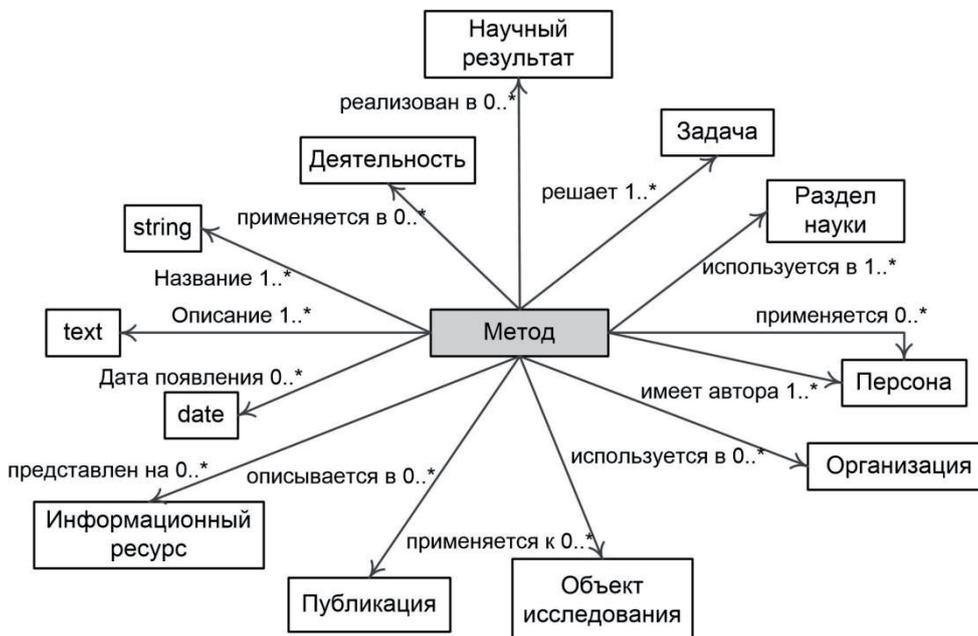


Рисунок 2 – Паттерн для представления понятия «Метод»

Примеры вопросов оценки компетентности, представляющих содержание паттерна «Метод»:

- Как называется метод?
- Кто является автором метода?
- Когда был предложен метод?
- К каким объектам исследования применяется метод?
- Какие задачи решаются с помощью метода?
- В какой деятельности используется метод?
- В каких научных результатах реализован метод?
- Кто применяет метод?
- В каких организациях используется метод?

## 2 Архитектура системы автоматизированного построения онтологий НПрО

Система автоматизированного построения онтологий (САПО) НПрО на основе разнородных паттернов ОП состоит из следующих компонентов (рисунок 3): онтологии паттернов ОП, репозитория паттернов ОП, репозитория базовых онтологий, словаря общенаучной лексики, редактора онтологий, редактора данных, информационно-аналитического интернет-ресурса и подсистемы автоматического пополнения онтологии на основе ЛСП.

Репозиторий паттернов ОП строится на основе онтологии паттернов ОП и включает реализации паттернов ОП. При этом паттерны содержания, паттерны представления и структурные логические паттерны реализованы средствами языка *OWL*, в то время как ЛСП представляются на специализированном языке описания шаблонов [22].

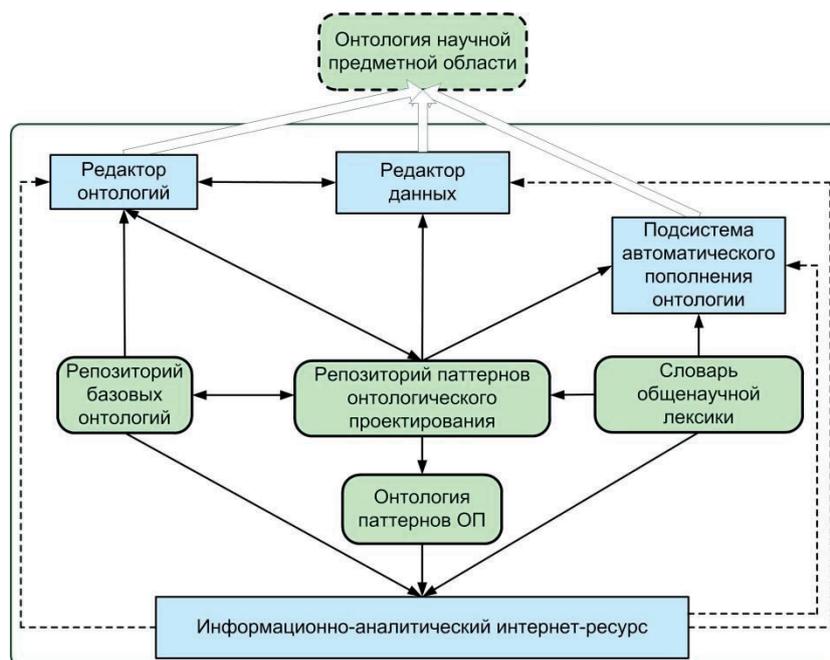


Рисунок 3 – Архитектура системы автоматизированного построения онтологий

САПО поддерживает метод построения онтологии НПрО на основе базовых онтологий, содержащих наиболее общие понятия, характерные для большинства НПрО. В связи с этим в систему включён репозиторий базовых онтологий, содержащий следующие онтологии: онтологию научного знания, онтологию научной деятельности, базовую онтологию задач и методов, базовую онтологию информационных ресурсов [8]. Все базовые онтологии имеют спецификации на языке *OWL*. Для наиболее важных понятий базовых онтологий разработаны паттерны содержания и включены в репозиторий ОП.

В качестве редактора онтологий в системе используется популярный редактор *Protégé*. Для удобного использования паттернов ОП в систему включён редактор данных, позволяющий пополнять онтологию НПрО путём конкретизации паттернов содержания, включённых в репозиторий паттернов ОП.

Словарь общенаучной лексики содержит семантически-размеченные термины, используемые в научных текстах для описания сущностей различных НПрО. Он используется для извлечения предметной лексики из текстов и автоматической генерации словаря ПрО, а также для последующего автоматического анализа текстов с помощью ЛСП.

Подсистема автоматического пополнения онтологии предназначена для занесения в онтологию НПрО информации, извлекаемой из текстов на естественном языке. Для этого используются ЛСП, построенные на основе паттернов содержания и словаря общенаучной лексики.

Информационно-аналитический Интернет-ресурс (ИАИР) предназначен для систематизации информации о паттернах ОП и обеспечения содержательного доступа к ней (см. рисунок 4). Работа ресурса организована на основе онтологии паттернов ОП, которая является его концептуальной основой.

**ПАТТЕРНЫ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Свойства объекта

<b>Название</b>	Научная деятельность
<b>Назначение</b>	Паттерн предназначен для описания научной деятельности, проводимой в рамках научных исследований. Элементы описания паттерна представлены такими обязательными классами онтологии, как Объект исследования, Раздел науки, Организация, Персона, и соответствующими отношениями «исследует», «имеет направление», «организуется», «участник».
<b>OWL представление</b>	/pattern/uploads/0c/ad/18f7ad1eb61fc815ce2e1da8fc72.ttl
<b>Графическое представление</b>	/pattern/uploads/94/db/1c18312ba37dccb09730422d2d2.jpg
<b>Вопросы оценки компетентности</b>	Каково название научной деятельности? В рамках каких разделов науки ведется научная деятельность? Какие научные результаты получены при выполнении деятельности? Какие объекты исследуются в рамках научной деятельности? Кто участвует в деятельности? Какие организации привлечены к деятельности? Каково сокращенное название научной деятельности? Когда началась деятельность? Когда завершилась деятельность? В каких публикациях описана научная деятельность? На каких ресурсах представлена деятельность?

Связи объекта

**используется В Деятельности**

Деятельность

[Проект «Разработка интеллектуальных СППР в слабоформализованных предметных областях на основе сервис-ориентированного подхода и технологий Semantic Web»](#)

[Проект «Интеллектуальная поддержка решения задач на пета- и эксафлопсных суперЭВМ»](#)

**относится к предметной области**

Область использования

Научная предметная область

**является результатом**

Деятельность

[Проект «Методы и средства автоматизированного построения онтологий научных предметных областей на основе системы разнородных паттернов онтологического проектирования»](#)

© ИСИ 2019–2021 Ресурс разработан при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-07-00762)

Рисунок 4 – Информационно-аналитический Интернет-ресурс

В левой части рисунка 4 показана иерархия классов онтологии ОП, а в правой части представлено описание паттерна содержания *Научная деятельность*, которое включает название паттерна, описание его назначения, ссылку на *OWL*-представление, ссылку на графическое представление, набор вопросов оценки компетентности, а также связи с проектами, в рамках которых он разрабатывался и используется.

Кроме того, ИАИР «Паттерны онтологического проектирования» является пользовательским интерфейсом САПО, обеспечивающим пользователям доступ ко всем репозиториям и редакторам, поддерживающим разработку онтологии НПрО, а также к подсистеме автоматического пополнения онтологии на основе ЛСП.

### 3 Методика построения онтологии НПрО инженерами знаний

Онтология любой НПрО содержит не только описания присущих ей системы понятий, задач и методов обработки и анализа информации, но и описания релевантных ей информационных ресурсов. В связи с этим онтологию НПрО удобно представлять в виде системы взаимосвязанных онтологий: онтологии области знаний, онтологии задач и методов, онтологии научных Интернет-ресурсов.

Онтология области знаний задаёт систему понятий и отношений, предназначенных для детального описания моделируемой НПрО и выполняемой в её рамках научной и исследовательской деятельности. Онтология задач и методов описывает задачи, решаемые в данной НПрО, и методы их решения. Онтология научных Интернет-ресурсов служит для описания, представленных в сети Интернет информационных ресурсов, релевантных данной НПрО.

Построение онтологии конкретной НПрО с использованием базовых онтологий и системы паттернов ОП включает два этапа.

- 1) построение компонентов онтологии НПрО на основе базовых онтологий путём их доработки и развития. На этом этапе выполняется специализация представленных в базовых онтологиях структурных логических паттернов и паттернов содержания на конкретную НПрО.
- 2) пополнение онтологии НПрО путём конкретизации структурных логических паттернов и паттернов содержания, представленных в базовых онтологиях или полученных из них путём их специализации на конкретную НПрО.

Специализация паттерна может состоять в переименовании, в уточнении имён и значений его свойств (атрибутов и отношений). Специализация паттернов на примере структурного логического паттерна *“Бинарное атрибутивное отношение”* приведена на рисунке 5.

Центральное место в этом паттерне занимает служебный класс *Отношение с атрибутами*, с которым связываются базовые классы, моделирующие аргументы бинарного отношения, посредством связей *“является Аргументом”* и *“имеет Аргумент”*. При этом в паттерне (в метках связей) указывается, что таких аргументов должно быть по одному. Атрибуты бинарного атрибутивного отношения моделируются свойствами класса *Отношение с атрибутами* *“имеет Атрибут”* и *“имеет Атрибут из Домена”*. В общем случае такое отношение может не иметь атрибутов, что отражено в метках связей, представляющих эти свойства.

Конкретизация (означивание) паттерна состоит в подстановке в него конкретных значений свойств.

На рисунке 6 представлен пример конкретизации паттерна содержания *“Метод”*. (Этот паттерн был использован для представления информации о методе недоопределённых вычислений, предложенном А.С. Нариньяни в 1986 г. и реализованном в *UniCalc* [23]).

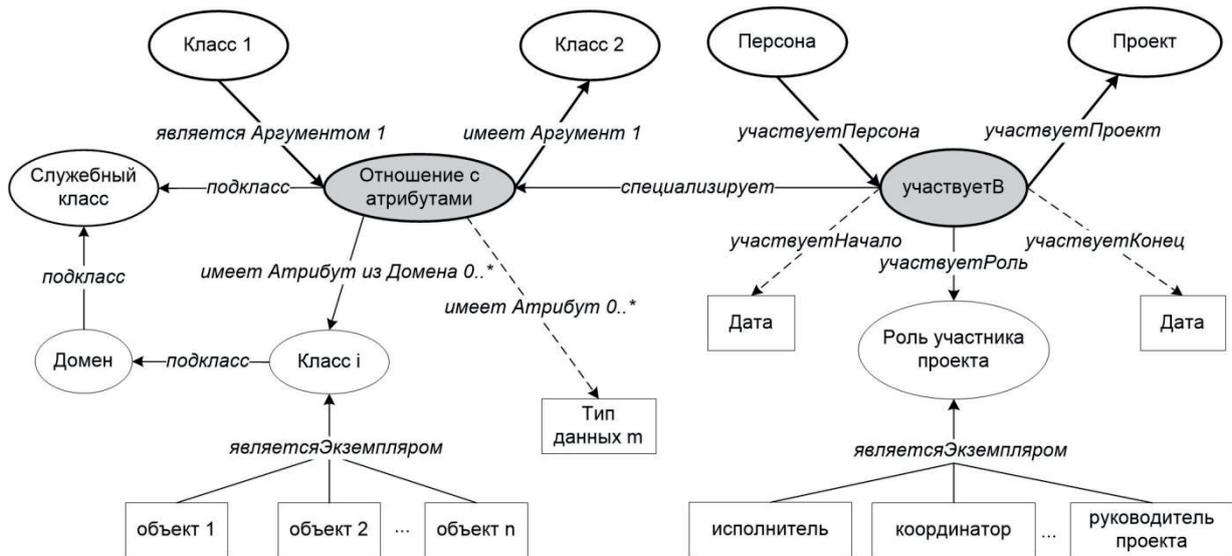


Рисунок 5 – Паттерн бинарного атрибутивного отношения и пример его специализации

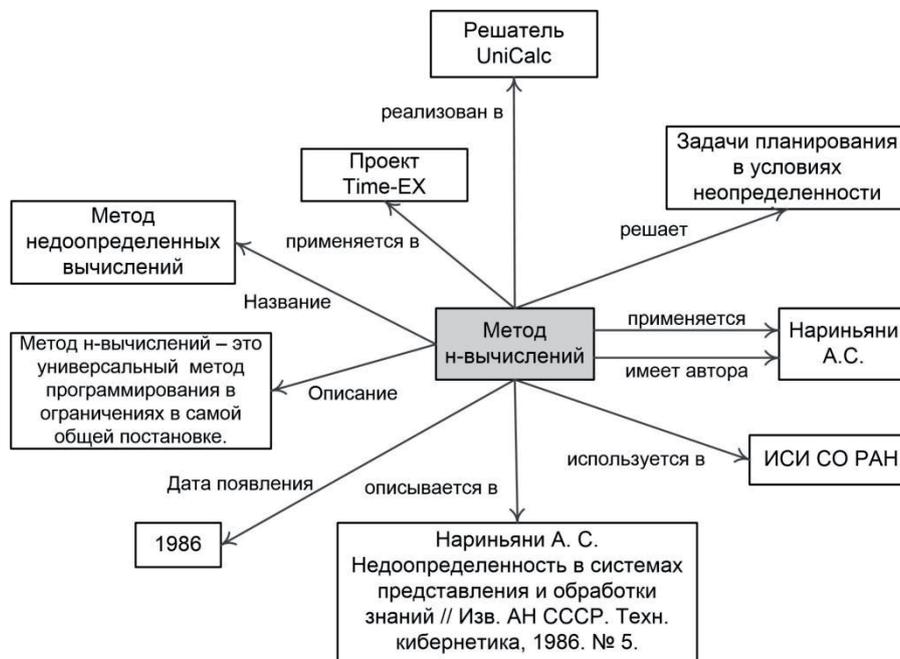


Рисунок 6 – Конкретизация паттерна содержания “Метод”

Использование паттернов содержания при пополнении онтологии НПРо поддерживается специальным редактором данных (см. рисунок 7), который позволяет специалистам в ПрО пополнять онтологию фактическими данными – объектами классов и их свойствами. При пополнении онтологии пользователь из представленной ему иерархии классов онтологии выбирает нужный класс, редактор по имени класса находит соответствующий паттерн и на его основе строит форму, содержащую поля для заполнения свойств объекта этого класса пользователем. Редактор может интерпретировать отношения с атрибутами, описанные паттерном на рисунке 5. Благодаря этому пользователь может работать с задаваемыми с помощью таких отношений свойствами объекта как с «обычными» объектными свойствами (*Object Property*). Отличие состоит в необходимости задания соответствующих значений атрибутов такого отношения.



Рисунок 7 – Редактор данных

#### 4 Представление ЛСП

Для реализации автоматического пополнения онтологии для каждого паттерна содержания строится набор ЛСП, описывающих различные способы представления соответствующей ему информации в научных текстах, на основе которых осуществляется извлечение информации.

ЛСП организуются в многоуровневую систему, включающую терминологические паттерны (Т-ЛСП) и информационные паттерны (И-ЛСП). Т-ЛСП предназначены для описания элементарных языковых конструкций и извлечения новых терминов. С помощью И-ЛСП задаётся схема извлечения из текста фактов и генерации соответствующих им элементов онтологии. Под фактами здесь понимаются тройки вида  $\langle Object, Property, Value \rangle$ , где *Object* – это сущность НПрО, найденная в тексте, *Property* – имя свойства данной сущности, а *Value* – значение этого свойства. При сопоставлении с онтологией *Object* соотносится с индивидом (экземпляром) какого-либо класса онтологии, *Property* – с названием свойства этого класса (это может быть отношение “type”, связывающее индивид с классом, имя атрибута (*Datatype Property*) или отношения (*Object Property*)), *Value* – с соответствующим онтологическим значением.

Каждый ЛСП реализует модель вида  $\langle Arguments, Constraints, Results \rangle$ , где *Arguments* – множество семантических аргументов факта, которым сопоставляются либо термины НПрО, либо объекты (при условии, что объекты уже извлечены с помощью других И-ЛСП), *Constraints* – семантические, синтаксические и/или позиционные условия на аргументы, а *Results* описывает результат применения ЛСП, которым может быть либо новый термин (для Т-ЛСП), либо генерируемый фрагмент онтологии (для И-ЛСП).

#### 4.1 Предметный словарь

Для автоматического пополнения онтологии с помощью ЛСП требуется обеспечить извлечение из текста специфических терминов данной НПрО. Для этого используется словарь предметной лексики (предметный словарь) и терминологические паттерны, позволяющие извлекать новые термины (в частности, наименования объектов НПО или специфичных предикатных слов).

Предметный словарь создаётся как расширение словаря общенаучной лексики и включает слова и словосочетания (термины), организованные в соответствии с семантикой ПрО (см. рисунок 8). В словарной статье хранится вся информация, необходимая для извлечения термина из текста и поддержки последующих этапов анализа текста. Каждый термин предметного словаря, найденный в тексте, снабжается морфологической и семантической информацией, которая в дальнейшем используется при применении ЛСП.

Словарь описывается системой вида  $D = \langle W, P, M, G, S \rangle$ , где  $W$  – множество лексем, каждой из которых сопоставлена информация обо всей совокупности её форм;  $P$  – множество многословных терминов, описываемых парой  $\langle N\text{-грамма, тип структуры} \rangle$ , где  $N$ -грамма задаёт последовательность лексем, а тип структуры определяет вершину и правила согласования элементов  $N$ -граммы;  $M$  – морфологическая модель языка, включающая описание морфологических классов и признаков;  $G$  – множество правил согласования для извлечения многословных терминов;  $S$  – проблемно-ориентированная система лексико-семантических признаков.

Семантический компонент предметного словаря включает две независимые иерархии лексико-семантических классов: универсальную иерархию, унаследованную из словаря общенаучной лексики, и предметно-ориентированную иерархию, создаваемую на основе онтологии НПрО. Для автоматической генерации словаря создана методика автоматического формирования системы лексико-семантических характеристик на основе имён элементов онтологии. На рисунке 8 представлена иерархия лексико-семантических признаков, созданная на основе фрагмента онтологии, относящегося к классу *Метод*. Все подклассы класса *Метод* сгенерированы автоматически из названий онтологических элементов в соответствии с шаблоном  $\langle \text{имя\_класса.имя\_признака} \rangle$ .

Все термины словаря размечены признаками из предметно-ориентированной и/или универсальной иерархии. Термины конкретной НПрО в словаре общенаучной лексики получают синкретичный признак с одновременно выраженным значением универсального и предметного лексико-семантического класса. Так, для глагола ‘использовать’ выделено четыре синкретичных признака (рисунок 8), каждый из которых включает универсальный класс *Применение* в сочетании с онтологически обусловленными признаками: *Метод.применяется\_в*, *Метод.применяется\_к*, *Метод.используется\_в* и *Метод.реализует*.

Лексико-семантические признаки словаря используются при описании ЛСП (в аргументах и/или результате) как способ обращения к терминам НПрО с определённой семантикой, о которой в общем случае заранее ничего неизвестно.

#### 4.2 Терминологические паттерны

Терминологические паттерны используются для извлечения из текстов новых терминов НПрО, не заданных в словаре. Т-ЛСП представляют собой ЛСП, формируемые на основе опорных терминов, маркеров, семантических и синтаксических ограничений.

Для автоматической генерации Т-ЛСП разработан язык и предложена методика создания типовых паттернов (или мета-паттернов), в состав которых включаются переменные.

Создание ЛСП для конкретной онтологии осуществляется путём означивания переменных именами онтологических классов, атрибутов и отношений.

Для извлечения терминов предложены два типа паттернов.

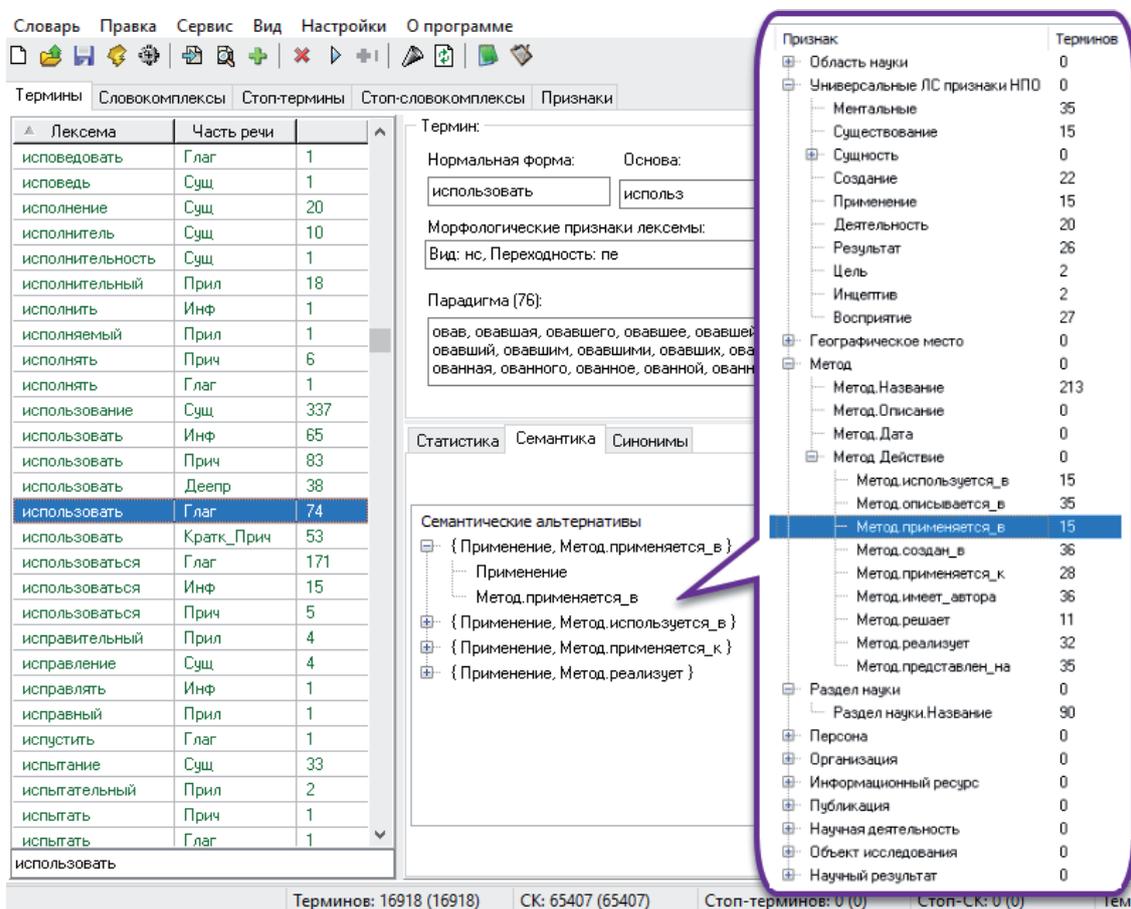


Рисунок 8 – Предметный словарь

Паттерны первого типа позволяют извлекать имена индивидов на основе центрального слова или термина с привлечением синтаксических правил сборки именных групп:

$$[<Adj>^*, X, [<Adj>^*, <N, GEN>]^* ] \Rightarrow X.Название. \tag{1}$$

Данный Т-ЛСП включает три аргумента: 1) группу прилагательных  $<Adj>^*$ , 2) термин лексико-семантического класса (признака)  $X$  и 3) именную группу в родительном падеже, собранную по вложенному подшаблону вида  $[<Adj>^*, <N, GEN >]^*$ . Ограничениями здесь являются указание семантического класса для 2-го аргумента и указание падежа для вложенного Т-ЛСП, используемого в качестве 3-го аргумента. Результат Т-ЛСП определяет лексико-семантический признак  $X.Название$  для всех терминов, извлекаемых с помощью данного Т-ЛСП.

Данный типовой паттерн позволяет генерировать конкретные Т-ЛСП путём подстановки в качестве  $X$  имён классов онтологии. Например, для извлечения названия метода может быть автоматически сгенерирован следующий паттерн:

$$[<Adj>^*, Метод, [<Adj>^*, <N, GEN>]^* ] \Rightarrow Метод.Название.$$

Этот паттерн позволяет извлечь такие термины: ‘метод опорных векторов’, ‘метод анкетного опроса’, ‘метод медиан рангов’, ‘метод нейронных сетей’, ‘метод самооценки’ и т.п.

Вторая группа паттернов позволяет извлекать новые термины на основе контекста, в котором присутствуют известные термины НПрО. Данный контекст сопоставляется с онтологическим отношением следующим образом:

$$\begin{aligned} [X, X.Rel, \$t\langle NP \rangle] &\Rightarrow Y.Название \\ [X, \$t\langle VP \rangle, Y] &\Rightarrow X.Rel. \end{aligned} \quad (2)$$

Данные типовые паттерны позволяют генерировать Т-ЛСП, в которых классы X и Y связаны в онтологии отношением Rel, и приписывать извлечённым терминам семантику соответствующего онтологического отношения. С помощью второго паттерна можно анализировать вопросы оценки компетентности, представленные в паттернах содержания.

При означивании переменных ( $X = \text{Метод}$ ,  $Y = \text{Задача}$ ,  $Rel = \text{решает}$ ) могут получиться следующие Т-ЛСП:

$$\begin{aligned} [\text{Метод}, \text{Метод.решает}, \$t\langle NP \rangle] &\Rightarrow \text{Задача.Название} \\ [\text{Метод}, \$x\langle VP \rangle, \text{Задача}] &\Rightarrow \text{Метод.Решает.} \end{aligned}$$

С помощью этих паттернов можно извлечь такие термины как: ‘задача классификации’, ‘нахождение оптимальной проекции’, а также предикатные термины: ‘ищут решения’, ‘позволяет решать’, ‘позволяют построить’, ‘позволил выделить’ и др.

### 4.3 Информационные паттерны

Информационные паттерны предназначены для извлечения фактов и создания новых объектов для пополнения онтологии. Предложены три вида типовых И-ЛСП.

И-ЛСП первого вида (инициализирующие И-ЛСП) обеспечивают создание объектов на основе терминов, имеющих лексико-семантический признак, совпадающий либо с именем класса, либо с именем ключевого атрибута этого класса.

$$[X.Название] \Rightarrow \text{create } X(\text{Название: arg1}). \quad (3)$$

Данные типовые паттерны позволяют генерировать конкретные И-ЛСП путём подстановки в качестве X имён классов онтологии, по которым впоследствии будут извлекаться объекты.

Примеры таких паттернов:

$$\begin{aligned} [\text{Метод.Название}] &\Rightarrow \text{create Метод(Название: arg1)} \\ [\text{Задача.Название}] &\Rightarrow \text{create Задача(Название: arg1)}. \end{aligned}$$

Второй вид И-ЛСП предназначен для извлечения отношений между объектами (*Object Property*) на основе предикатных слов. Данный тип паттерна описывается тремя аргументами: двумя объектами соответствующих классов X и Y и связывающим их термином с лексико-семантическим признаком X.Rel.

$$[X(), X.Rel, Y()] \Rightarrow \text{set } X(\text{Rel: arg3}). \quad (4)$$

Данный паттерн позволяет генерировать И-ЛСП, в которых классы X и Y связаны в онтологии отношением Rel. Паттерн задаёт общую структуру И-ЛСП, которую требуется уточнить набором синтаксических ограничений, определяемых предикатным термином. Данные ограничения могут быть получены на основе корпуса текстов, используя уже установленные на уровне онтологии связи, или на основе статистических критериев.

Пример такого паттерна:

$$[\text{Метод}(), \text{Метод.решает}, \text{Задача}()] \Rightarrow \text{set arg1(решает: arg3)}.$$

Следующий вид И-ЛСП обеспечивает заполнение атрибутов объектов (*Datatype Property*) либо на основе предикатных терминов, сигнализирующих о наличии рядом с упоминанием объекта его атрибута, либо при контактном способе выражения значения атрибута:

$$\begin{aligned} [X(), X.A.type, X.A] &\Rightarrow \text{set } X(A: \text{arg3}) \\ [X(), X.A] &\Rightarrow \text{set } X(A: \text{arg2}). \end{aligned} \tag{5}$$

Данные паттерны позволяют генерировать И-ЛСП, которые обеспечивают заполнение атрибута объекта X значением термина с семантикой X.A. Предикатные термины являются либо именами атрибутов, либо глагольными группами, вычисленными на основе вопросов оценки компетентности с семантикой Prop.A. Данные паттерны так же, как и в предыдущем случае, могут уточняться синтаксическими ограничениями.

Примеры таких паттернов:

$$\begin{aligned} [\text{Метод}(), \text{Метод.Описание.type}, \text{Метод.Описание}] &\Rightarrow \text{set Метод (Описание: arg3)} \\ [\text{Персона}(), \text{Персона.Ученая\_степень}] &\Rightarrow \text{set Персона(Ученая\_степень: arg2)}. \end{aligned}$$

## 5 Автоматическая генерация ЛСП

ЛСП автоматически строятся на основе паттернов онтологического проектирования, словарей общенаучной и предметной лексики и текущей версии онтологии НПрО. На рисунке 9 представлена схема взаимосвязей компонентов системы, участвующих в генерации ЛСП.

Процесс генерации ЛСП начинается с создания и наполнения предметного словаря. Из онтологии и описания паттерна содержания извлекаются термины (лексемы и терминоподобные N-граммы) и формируются лексико-семантические классы. Все термины размечаются соответствующими семантическими признаками.

На основе анализа структуры паттерна содержания осуществляется означивание переменных в метапаттернах и формируются Т-ЛСП и И-ЛСП.

С помощью созданных Т-ЛСП анализируются вначале вопросы оценки компетентности, а затем тексты научного корпуса. Вопросы оценки компетентности, выраженные на естественном языке, позволяют не только извлечь предикатные термины, но и задать начальные синтаксические ограничения на извлекаемые факты, которые могут быть впоследствии уточнены на основе корпуса текстов.

При генерации И-ЛСП необходима информация о ключевых атрибутах классов онтологии (особенно для инициализирующих паттернов). В приведённых выше примерах использо-

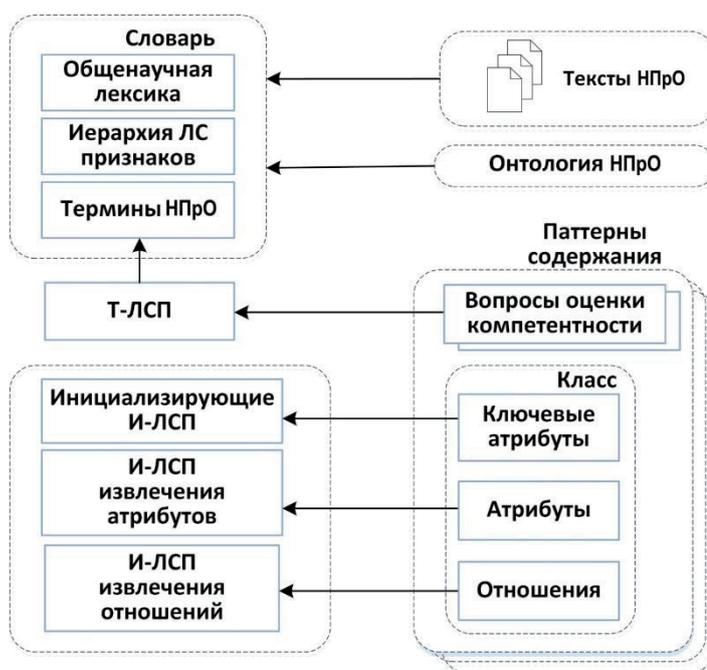


Рисунок 9 – Схема взаимосвязей компонентов системы, участвующих в генерации ЛСП

ван атрибут *Название*, однако у классов онтологии могут быть и другие ключевые атрибуты (например, у класса *Персона*), для которых потребуется создание других типовых паттернов. Для И-ЛСП также требуется уточнение синтаксических и позиционных ограничений на основе примеров вхождений И-ЛСП в корпус текстов.

Таким образом, из онтологических компонентов знаний можно выделить знания о языке ПрО, необходимые для извлечения информации из текста и пополнения онтологии, и возможные способы языкового описания онтологических сущностей в текстах. Формализация этих знаний в виде системы ЛСП позволит применить существующие технологии автоматической обработки текстов для автоматического пополнения онтологии НПрО.

## 6 Пополнение онтологии НПрО на основе ЛСП

### 6.1 Архитектура подсистемы пополнения онтологии

При разработке подсистемы применены следующие инструменты и технологии: система извлечения из текстов предметной лексики и построения словарей *KLAN* [22], система анализа текста на основе шаблонов *PatTerm* [24] и система фактографического анализа текста *FATON* [25]. Система *KLAN* позволяет проводить морфологический и поверхностный синтаксический анализ текстов, создавать на основе результатов этого анализа предметно-ориентированные словари и извлекать словарные термины из текстов. На базе системы *KLAN* создаются словари общенаучной и предметной лексики. Система *PatTerm* используется для поиска в тексте терминов на основе Т-ЛСП, а также для генерации Т-ЛСП по строковым константам. Система *FATON* позволяет собирать факты по заданным И-ЛСП и множеству терминов, найденных в тексте системами *KLAN* и *PatTerm*.

Таким образом, подсистема автоматического пополнения онтологии объединяет различные технологии, обеспечивая их взаимодействие. Она включает модуль взаимодействия с онтологиями и две подсистемы: подсистему генерации ЛСП и подсистему извлечения информации из корпуса текстов на основе ЛСП (см. рисунок 10).

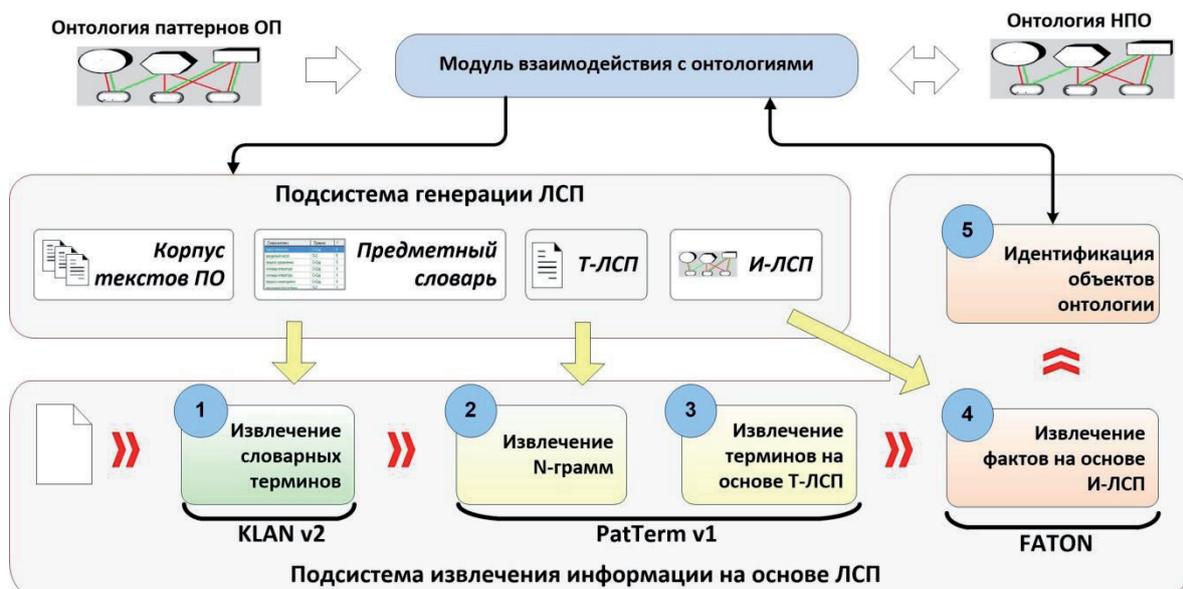


Рисунок 10 – Архитектура подсистемы пополнения онтологии

Подсистема генерации ЛСП обеспечивает построение всех видов ЛСП – терминологических и информационных, а также построение предметного словаря, необходимого для их работы.

Подсистема пополнения онтологии НПрО на основе ЛСП организована в виде конвейера из нескольких последовательных обработчиков и реализует алгоритм пополнения онтологии в несколько этапов.

На этапе 1 из текста с помощью системы *KLAN* извлекаются словарные термины, которые снабжаются грамматическими и семантическими характеристиками. На этапах 2 и 3 система *PatTerm* извлекает построенные подсистемой генерации ЛСП N-граммы и новые термины, на основе Т-ЛСП. Найденные термины используются на этапе извлечения фактов на основе И-ЛСП (этап 4). Мультиагентный алгоритм, реализованный в системе *FATON*, подбирает аргументы для заданных И-ЛСП, проверяет ограничения и собирает объекты для пополнения онтологии. На последнем шаге (этап 5) найденные в тексте объекты идентифицируются, т.е. сопоставляются с индивидами онтологии, при необходимости объединяются и либо обновляют данные для уже имеющихся в онтологии индивидов, либо генерируют новые индивиды.

Взаимодействие подсистем с онтологией паттернов и онтологией НПрО обеспечивает специально разработанный модуль, использующий средства поддержки онтологически ориентированного программирования из библиотеки *owlready2* [26]. Для обработки онтологий НПрО, спроектированных с использованием структурных логических паттернов, таких как “Бинарное атрибутивное отношение” или “Область допустимых значений”, модуль был расширен дополнительными функциями, позволяющими работать со свойствами, описанными сложными структурными паттернами, как и со стандартными свойствами из языка *OWL*.

## 6.2 Экспериментальная проверка подсистемы пополнения онтологии

Экспериментальная проверка подсистемы автоматического пополнения онтологии была проведена на корпусе русских текстов, являющихся краткими описаниями различных методов (длиной от 1 до 5 предложений) из НПрО «Поддержка принятия решений в слабоформализованных областях». На основе онтологии данной НПрО [26] и паттерна содержания *Метод* были автоматически созданы словарь ПрО, включающий 214 терминов, размеченных с помощью 21 лексико-семантического признака, 34 Т-ЛСП для извлечения новых терминов (названий экземпляров классов и предикатных слов) и 82 И-ЛСП для извлечения экземпляров класса *Метод* и их свойств. Для генерации иерархии лексико-семантических признаков использовались метки (*rdfs:label*) атрибутов и отношений класса *Метод*, а также значения атрибутов для экземпляров этого и связанных с ним классов.

С помощью Т-ЛСП были сгенерированы и внесены в словарь термины: ‘аддитивная свертка’ (*Метод.Название*), ‘искусственный интеллект’ (*Раздел\_науки.Название*), ‘задача о ранце’ (*Задача.Название*), ‘решает’ (*Метод.решает*) и т.п.

Подсистемой генерации ЛСП были построены следующие И-ЛСП:

[Метод.Название] ⇒ create Метод (Название: arg1) (6.1)

[Задача.Название] ⇒ create Задача (Название: arg1) (6.2)

[Метод (), Метод.решает, Задача ()] ⇒ arg1::Метод (Решает: arg3) (6.3)

На рисунке 11 представлены результаты обработки следующего текста из корпуса:

“*Метод опорных векторов (Support Vector Machines) решает задачи классификации и регрессионного анализа путём построения нелинейной плоскости, разделяющей решения*”.

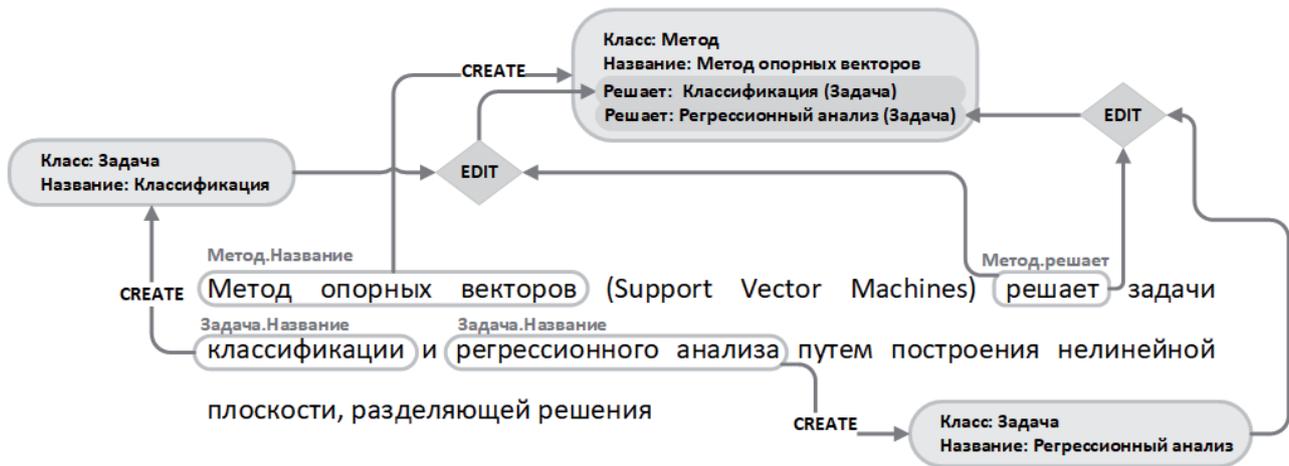


Рисунок 11 – Пример анализа текста на основе ЛСП

В процессе анализа этого текста были найдены четыре термина с лексико-семантическими признаками *Метод.Название* ('метод опорных векторов'), *Задача.Название* ('классификация' и 'регрессионный анализ') и *Метод.решает* ('решает'). Затем, в соответствии с инициализирующими И-ЛСП (6.1) и (6.2) были созданы объекты классов *Метод* и *Задача*; согласно шаблону (6.3) были порождены связи между объектом класса *Метод* и двумя объектами класса *Задача*.

## Заключение

В статье описан предложенный подход к автоматизации построения и пополнения онтологий НПрО, базирующийся на разнородных паттернах ОП, и реализующая его САПО.

Особенностью данного подхода является то, что разработка и начальное наполнение онтологии НПрО выполняется инженерами знаний и экспертами в НПрО с использованием паттернов содержания и структурных паттернов. Дальнейшее пополнение онтологии НПрО выполняется в автоматическом режиме с использованием ЛСП, построенных на основе включённых в репозиторий САПО паттернов содержания и текущей версии онтологии НПрО. Главное отличие предложенного подхода от подходов, также использующих ЛСП [16, 17, 28], заключается в том, что в нём ЛСП генерируются автоматически.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00762).

## Список источников

- [1] Загорулько, Ю.А. Методы и методологии разработки, сопровождения и реинжиниринга онтологий / Ю.А. Загорулько // Симпозиум «Онтологическое моделирование: состояние и направления исследований и применения» (Звенигород, 20-21 мая). - М.: ИПИ РАН, 2008. С.135–162.
- [2] Sattar, A. Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review / A. Sattar, E. Salwana, M. Surin, M.N. Ahmad, M. Ahmad, A.K. Mahmood // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. Vol.11(5). P.99–108.
- [3] Noy, N. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology / N. Noy, D. McGuinness // Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880, March 2001.
- [4] Brusa, G. Towards ontological engineering: a process for building a domain ontology from scratch in public administration / G. Brusa, M. L. Caliusco, and O. Chiotti // Expert Systems. 2008. Vol.25. P.484-503.

- [5] **De Nicola, A.** A Lightweight Methodology for Rapid Ontology Engineering / A. De Nicola, M. Missikoff // *Com. ACM*. 2016. Vol.59. P.79–86.
- [6] **Загорулько, Ю.А.** Технология построения онтологий для порталов научных знаний / Ю.А. Загорулько, О.И. Боровикова // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии (ISSN 1818-7900)*. 2007. Т.5, №2. С.42-52.
- [7] **Gangemi, A.** Ontology Design Patterns / A. Gangemi, V. Presutti // In: Staab S., Studer R. (eds) *Handbook on Ontologies*. IHIS. - Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. P.221–243.
- [8] **Загорулько, Ю.А.** Технология создания тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов, базирующаяся на онтологии / Ю.А. Загорулько, Г.Б. Загорулько, О.И. Боровикова // *Программная инженерия*. – 2016. Т.7. №2. С.51-60.
- [9] **Asim, M.-N.** A survey of ontology learning techniques and applications / M.-N. Asim, M. Wasim, M.U.G. Khan et al. // *Database: The Journal of Biological Databases and Curation*. 2018. Vol.2018. doi:10.1093/database/bay101.
- [10] **Blomqvist, E.** Engineering Ontologies with Patterns: The eXtreme Design Methodology / E. Blomqvist, K. Hammar, V. Presutti // In: Hitzler, P., Gangemi, A., Janowicz, K., Krisnadhi, A., Presutti, V. (eds.) *Ontology Engineering with Ontology Design Patterns. Studies on the Semantic Web*. Vol.25. Amsterdam, IOS Press, 2016. P.23–50.
- [11] **Ломов, П.А.** Применение паттернов онтологического проектирования для создания и использования онтологий в рамках интегрированного пространства знаний / П.А. Ломов // *Онтология проектирования*. 2015. Т.5. №2(16). С.233-245.
- [12] **Загорулько, Ю.А.** Применение паттернов онтологического проектирования при разработке онтологий научных предметных областей / Ю.А. Загорулько, О.И. Боровикова, Г.Б. Загорулько // *Selected Papers of the 19th International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, DAMDID/RCDL 2017*. Vol.2022. P.258-265. *CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)*, 2017.
- [13] **Zagorulko, Yu.** Pattern-Based Methodology for Building the Ontologies of Scientific Subject Domains / Yu. Zagorulko, O. Borovikova, G. Zagorulko // In: *New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques. Proceedings of the 17th International Conference SoMeT\_18*. H. Fujita and E. Herrera-Viedma (Eds.). Series: *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. Vol. 303. Amsterdam: IOS Press, 2018. P.529-542.
- [14] **Petasis, G.** Ontology Population and Enrichment: State of the Art / Petasis, G., Karkaletsis, V., Paliouras, G., Krithara, A., Zavitsanos, E. // In: Paliouras, G., Spyropoulos, C.D., Tsatsaronis, G. (eds) *Knowledge-Driven Multimedia Information Extraction and Ontology Evolution*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6050. - Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. P.134–166.
- [15] **Ganino, G.** Ontology population for open-source intelligence: a GATE-based solution / G. Ganino, D. Lembo, M. Mecella, F. Scafoglieri // *Software: Practice and Experience*. 2018. Vol.48(12).
- [16] **Maynard, D.** Using Lexico-Syntactic Ontology Design Patterns for Ontology Creation and Population / D. Maynard, A. Funk, W. Peters // In: *Proc. Workshop on Ontology Patterns (WOP 2009), collocated with the 8th Int. Semantic Web Conf. (ISWC-2009)*. Vol.516. P.39–52. *CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)*, 2009.
- [17] **Ijntema, W.** A lexico-semantic pattern language for learning ontology instances from text / W. Ijntema, J. Sangers, F. Hogenboom, F. Frasincar // *Journal of Web Semantics*. 2012. Vol.15. P.37–50.
- [18] NeOn project home. - <http://www.neon-project.org>
- [19] Association for Ontology Design & Patterns (ODPA). - <http://ontologydesignpatterns.org/wiki/ODPA>
- [20] **Karima, N.** How to Document Ontology Design Patterns / Karima, N., Hammar, K., Hitzler, P. // In: *Advances in Ontology Design and Patterns. Studies on the Semantic Web*. vol.32. P.5–27. IOS Press, Kobe, Japan (2017).
- [21] **Antoniou, G.** Web Ontology Language: OWL / G. Antoniou, F. Harmelen // In: *Handbook on Ontologies*. Staab, S. and R. Studer. (eds.) - Berlin: Springer Verlag, 2009. P.91-110.
- [22] **Сидорова, Е.А.** Подход к моделированию процесса извлечения информации из текста на основе онтологии / Е.А. Сидорова // *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №1(27). С.134-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-134-151.
- [23] **Нариньяни, А.С.** Неопределённость в системах представления и обработки знаний / А.С. Нариньяни // *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика*, 1988. №5.
- [24] **Sidorova, E.** The Software Environment for Multi-Aspect Study of Lexical Characteristics of Text / E. Sidorova, I. Akhmadeeva // In: *Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2019)*. - *CEUR Workshop Proceedings*, 2019. Vol.2523. P.306–315.
- [25] **Garanina, N.** A Multi-agent Text Analysis Based on Ontology of Subject Domain / N. Garanina, E. Sidorova, E. Bodin // In: Voronkov, A., Virbitskaite, I. (eds.) *Perspectives of System Informatics (PSI 2014)*. LNCS, vol. 8974. - Springer, Heidelberg 2015. P.102–110.
- [26] **Lamy, J.-B.** Owlready: Ontology-oriented programming in Python with automatic classification and high level constructs for biomedical ontologies / J.-B. Lamy // *Artificial Intelligence In Medicine*. 2017. Vol.80. P.11–28.
- [27] **Загорулько, Г.Б.** Разработка онтологии для интернет-ресурса поддержки принятия решений в слабоформализованных областях / Г.Б. Загорулько // *Онтология проектирования*. 2016. Т.6. №4(22). С.485-500.

- [28] *de Cea, G.A.* Using Linguistic Patterns to Enhance Ontology Development / G.A. de Cea, A. Gomez-Perez, E. Montiel-Ponsoda, M. C. Suarez-Figueroa // In: Proc. Int. Conf. on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD 2009) (Funchal - Madeira, Portugal, October 6-8, 2009). P.206–213. INSTICC Press, 2009.

## Сведения об авторах



**Загорулько Юрий Алексеевич**, 1957 г. рождения. Окончил Новочеркасский политехнический институт им. С. Орджоникидзе (1979), к.т.н. (1989). Заведующий лабораторией Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, доцент кафедры программирования и кафедры систем информатики Новосибирского государственного университета. Член Российской и Европейской ассоциаций искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 280 публикаций в области искусственного интеллекта, разработки интеллектуальных систем, инженерии знаний, онтологического моделирования и компьютерной лингвистики. ORCID: 0000-0002-7111-6524; Author ID (Scopus): 23394231500;

Researcher ID (WoS): R-1826-2016. [zagor@iis.nsk.su](mailto:zagor@iis.nsk.su).

**Сидорова Елена Анатольевна**, 1977 г. рождения. Окончила Новосибирский государственный университет в 2000 г., к.ф.-м.н. (2006). Старший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова (Новосибирск), старший преподаватель кафедры программирования Новосибирского государственного университета, член Российской и Европейской ассоциаций искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 140 работ в области компьютерной лингвистики, мультиагентных систем, представления знаний и онтологического инжиниринга. ORCID: 0000-0001-8731-3058; Author ID (Scopus): 41961707000; Researcher ID (WoS): K-2432-2018. [lsidorova@iis.nsk.su](mailto:lsidorova@iis.nsk.su).



**Загорулько Галина Борисовна**, 1963 г. рождения. Окончила Новосибирский государственный университет (1985), к.т.н. (2020). Научный сотрудник Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, старший преподаватель кафедры программирования Новосибирского государственного университета. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 120 публикаций в области искусственного интеллекта, разработки интеллектуальных систем, инженерии знаний, онтологического моделирования, поддержки принятия решений. ORCID: 0000-0003-2155-1357; Author ID (Scopus): 35249924100; Researcher ID (WoS): K-2472-2018.

[gal@iis.nsk.su](mailto:gal@iis.nsk.su).

**Ахмадеева Ирина Равильевна**, 1991 г. рождения. Окончила Новосибирский государственный университет в 2015г. Младший научный сотрудник Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, ассистент кафедры программирования Новосибирского государственного университета. В списке научных трудов более 20 работ в области искусственного интеллекта, разработки интеллектуальных систем и компьютерной лингвистики. ORCID: 0000-0002-7371-1087; Author ID (RSCI): 874172; Author ID (Scopus): 57188681471; Researcher ID (WoS): K-3145-2018. [i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su](mailto:i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su)



**Серый Алексей Сергеевич**, 1987 г. рождения. Окончил Новосибирский государственный университет в 2010 г. Младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова (Новосибирск). В списке научных трудов более 20 работ в области представления знаний и компьютерной лингвистики. ORCID: 0000-0001-8275-4700; Author ID (Scopus): 56403204900; Researcher ID (WoS): K-1557-2018. [alexey.seriy@iis.nsk.su](mailto:alexey.seriy@iis.nsk.su)

Поступила в редакцию 12.11.2021, принята к публикации 08.12.2021.

## Automation of the development of ontologies of scientific subject domains based on ontology design patterns

Yu.A. Zagorulko, E.A. Sidorova, G.B. Zagorulko, I.R. Akhmadeeva, A.S. Sery

*A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

### Abstract

At present, ontologies are recognized as the most effective means of formalizing and systematizing knowledge and data in scientific subject domains (SSDs). However, the development of an ontology is a rather complicated and time-consuming process. All indications are that when developing SSDs ontologies, it is especially effective to use ontology design patterns (ODPs). This is due to the fact that the SSD ontology, as a rule, contains a large number of typical fragments, which are well described by the ODPs. In addition, due to the fact that the use of ODPs greatly facilitates the development of an SSD ontology, it is possible to involve experts in a modeled SSD not possessing the skills of ontological modeling. To obtain an ontology that adequately describes the SSD, it is necessary to process a huge number of publications relevant to the modeled SSD. It is possible to facilitate and accelerate the process of populating the ontology with information from such sources by using the lexical and syntactic patterns of ontological design. The paper presents an approach to the automated development of SSDs ontologies based on a system of heterogeneous ODPs. This system includes both ODPs intended for ontology developers and lexical and syntactic patterns built on the basis of the above-mentioned types of the ODPs and the current version of the SSD ontology.

**Key words:** *ontology design patterns, scientific subject domains, content patterns, automatic generation of lexical and syntactic patterns, ontology population.*

**Citation:** *Zagorulko YuA, Sidorova EA, Zagorulko GB, Akhmadeeva IR, Sery AS. Automation of the development of ontologies of scientific subject domains based on ontology design patterns [In Russian]. Ontology of designing. 2021; 11(4): 500-520. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.*

**Acknowledgment:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-07-00762).

### List of figures

- Figure 1 - Fragment of the ODP ontology
- Figure 2 - ODP for representing the "Method" concept
- Figure 3 - Architecture of the system for the automated construction of ontologies
- Figure 4 - Information and analytical Internet resource
- Figure 5 - ODP for representing the attributed binary relation and an example of its specialization
- Figure 6 - the "Method" content pattern specification
- Figure 7 - Data editor
- Figure 8 - Subject-specific vocabulary
- Figure 9 - Diagram of the interconnections of the system components involved in the generation of the LSP
- Figure 10 Architecture of ontology population system
- Figure 11 An example of text analysis based on LSP

### References

- [1] *Zagorulko YuA. Methods and methodologies for the development, maintenance and reengineering of ontologies [In Russian]. Symposium "Ontological Modeling: State and Directions of Research and Application" (Zvenigorod, May 20-21). Moscow: IPI RAN, 2008: 135–162.*
- [2] *Sattar A, Salwana E, Surin M, Ahmad M, Ahmad M, Mahmood A. Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020; 11(5): 99–108.*

- [3] **Noy N, McGuinness D.** Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880, March. 2001.
- [4] **Brusa G., Caliusco ML, Chiotti O.** Towards ontological engineering: a process for building a domain ontology from scratch in public administration. *Expert Systems*. 2008; 25: 484-503.
- [5] **De Nicola A, Missikoff M.** A Lightweight Methodology for Rapid Ontology Engineering. *Com. ACM*. 2016; 59: 79–86.
- [6] **Zagorulko YuA, Borovikova OI.** Technology of development of ontology for scientific knowledge portals [In Russian]. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2007; 5(2): 42-52.
- [7] **Gangemi A, Presutti V.** Ontology Design Patterns. In: Staab S., Studer R. (eds): *Handbook on Ontologies*. IHIS. Springer, Berlin Heidelberg, 2009: 221–243.
- [8] **Zagorulko YuA, Zagorulko GB, Borovikova OI.** Technology for building subject-based intelligent scientific internet resources based on ontology [In Russian]. *Software Engineering*. 2016; 7(2): 51-60.
- [9] **Asim M-N, Wasim M, Khan MUG et al.** A survey of ontology learning techniques and applications. *Database: The Journal of Biological Databases and Curation*. 2018, vol. 2018. doi:10.1093/database/bay101
- [10] **Blomqvist E, Hammar K, Presutti V.** Engineering Ontologies with Patterns: The eXtreme Design Methodology. In: Hitzler P., Gangemi A., Janowicz K., Krisnathi A., Presutti V. (eds.): *Ontology Engineering with Ontology Design Patterns. Studies on the Semantic Web*, vol. 25. Amsterdam, IOS Press, 2016: 23–50.
- [11] **Lomov PA.** Application of ontology design patterns to development and use of ontologies in an integrated knowledge space [In Russian]. *Ontology of designing*. 2015; 2(16): 233-245.
- [12] **Zagorulko Yu, Borovikova OI, Zagorulko GB.** Application of ontology design patterns in the development of the ontologies of scientific subject domains [In Russian]. In: *Selected Papers of the 19th International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, DAMDID/RCDL 2017*. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org). 2017; 2022: 258-265.
- [13] **Zagorulko YuA, Zagorulko GB, Borovikova OI.** Pattern-Based Methodology for Building the Ontologies of Scientific Subject Domains. In: H. Fujita and E. Herrera-Viedma (Eds.): *New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques. Proceedings of the 17th International Conference SoMeT\_18*. Series: *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 303. Amsterdam: IOS Press, 2018: 529-542.
- [14] **Petasis G, Karkaletsis V, Paliouras G, Krithara A, Zavitsanos E.** Ontology Population and Enrichment: State of the Art. In: Paliouras, G., Spyropoulos, C.D., Tsatsaronis, G. (eds): *Knowledge-Driven Multimedia Information Extraction and Ontology Evolution*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6050. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 134–166.
- [15] **Ganino G, Lembo D, Mecella M, Scafoglieri F.** Ontology population for open-source intelligence: a GATE-based solution. *Software: Practice and Experience*. 2018; 48(12).
- [16] **Maynard D, Funk A, Peters W.** Using Lexico-Syntactic Ontology Design Patterns for Ontology Creation and Population. In: *Proc. Workshop on Ontology Patterns (WOP 2009), collocated with the 8th Int. Semantic Web Conf. (ISWC-2009)*. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org). 2009; 516: 39–52.
- [17] **Ijntema W, Sangers J, Hogenboom F, Frasincaar F.** A lexico-semantic pattern language for learning ontology instances from text. *Journal of Web Semantics*. 2012; 15: 37–50.
- [18] NeOn project home. <http://www.neon-project.org>
- [19] Association for Ontology Design & Patterns (ODPA). <http://ontologydesignpatterns.org/wiki/ODPA>
- [20] **Karima N, Hammar K, Hitzler P.** How to Document Ontology Design Patterns. In: *Advances in Ontology Design and Patterns. Studies on the Semantic Web*, vol. 32. IOS Press, Kobe, Japan, 2017: 15–27.
- [21] **Antoniou G, Harmelen F.** Web Ontology Language: OWL. In: Staab, S. and R. Studer. (eds.): *Handbook on Ontologies*. Berlin: Springer Verlag, 2009: 91-110.
- [22] **Sidorova EA.** Approach to modeling the process of information extracting based on the ontology [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 1(27): 134-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-134-151.
- [23] **Narinyani AS.** Uncertainty in knowledge representation and processing systems. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Tech. cybernetics*, 1988. No. 5.
- [24] **Sidorova E, Akhmadeeva I.** The Software Environment for Multi-Aspect Study of Lexical Characteristics of Text. In: *Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2019)*. CEUR Workshop Proceedings, 2019; 2523: 306–315.
- [25] **Garanina N, Sidorova E, Bodin E.** A Multi-agent Text Analysis Based on Ontology of Subject Domain. In: Voronkov A., Virbitskaite I. (eds.): *Perspectives of System Informatics (PSI 2014)*. LNCS, vol. 8974. Springer, Heidelberg, 2015: 102–110.
- [26] **Lamy J-B.** Owlready: Ontology-oriented programming in Python with automatic classification and high level constructs for biomedical ontologies. *Artificial Intelligence In Medicine*. 2017; 80: 11–28.

- [27] **Zagorulko GB**. Development of an ontology for an Internet resource for decision support in weakly formalized areas [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 4(22): 485-500.
- [28] **de Cea GA, Gomez-Perez A, Montiel-Ponsoda E, Suarez-Figueroa MC**. Using Linguistic Patterns to Enhance Ontology Development. In: *Proc. Int. Conf. on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD 2009) (Funchal - Madeira, Portugal, October 6-8, 2009)*. INSTICC Press, 2009: 206–213.
- 

## About the authors

**Yury Alekseevich Zagorulko** (b.1957) graduated from the Novocherkassk Polytechnic Institute in 1979, PhD (1989). He is a Head of Laboratory at A.P. Ershov Institute of Siberian Branch of Informatics Systems of Russian Academy of Science, Associate Professor at Novosibirsk State University. He is a member of Russian and European Associations for Artificial Intelligence. He is the author of more than peer-reviewed 270 publications in the fields of AI, Knowledge and Ontology Engineering, Intelligent System Development and Computational Linguistics. ORCID: 0000-0002-7111-6524; Author ID (Scopus): 23394231500; Researcher ID (WoS): R-1826-2016. [zagor@iis.nsk.su](mailto:zagor@iis.nsk.su)

**Elena Anatolievna Sidorova** (b. 1977) graduated from the Novosibirsk State University in 2000, PhD (2006). She is a Senior Researcher of the Laboratory of Artificial Intelligence at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems (Novosibirsk, Russia), Senior Lecturer at Novosibirsk State University. She is a member of Russian and European Associations for Artificial Intelligence. Dr. Sidorova has about 140 peer-reviewed publications in the field of NLP Systems, Multi-agent Systems, Knowledge Representation and Ontology Engineering. ORCID: 0000-0001-8731-3058; Author ID (Scopus): 41961707000; Researcher ID (WoS): K-2432-2018. [lsidorova@iis.nsk.su](mailto:lsidorova@iis.nsk.su)

**Zagorulko Galina Borisovna** (b.1963) graduated from the Novocherkassk State University in 1985, PhD (2021). She is a researcher at A.P. Ershov Institute of Siberian Branch of Informatics Systems of Russian Academy of Science (Novosibirsk city), and a senior lecturer at Novosibirsk State University (Department of Mechanics and Mathematics). She is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence. She is the author of more than 120 peer-reviewed publications in the field of AI, intelligent system development, knowledge engineering, ontological modeling and decision-making support. ORCID: 0000-0003-2155-1357; Author ID (Scopus): 35249924100; Researcher ID (WoS): K-2472-2018. [gal@iis.nsk.su](mailto:gal@iis.nsk.su)

**Irina Ravilevna Akhmadeeva** (b.1991) graduated from the Novosibirsk State University in 2015. She is a Junior Researcher at A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of Siberian Branch of Russian Academy of Science, Assistant Lecturer at Novosibirsk State University. She is the author of more than 20 peer-reviewed publications in the fields of AI, Intelligent System Development and NLP. ORCID: 0000-0002-7371-1087; Author ID (RSCI): 874172; Author ID (Scopus): 57188681471; Researcher ID (WoS): K-3145-2018. [i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su](mailto:i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su)

**Alexey Sergeevich Sery** (b.1987) holds a master's degree in mathematics from Novosibirsk State University (2010) and a position of junior research at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems. He is the author of more than 20 peer-reviewed papers in the fields of NLP systems and Knowledge Representation. ORCID: 0000-0001-8275-4700; Author ID (Scopus): 56403204900; Researcher ID (WoS): K-1557-2018. [alexey.seryj@iis.nsk.su](mailto:alexey.seryj@iis.nsk.su)

---

*Received November 12, 2021. Accepted December 08, 2021.*

---

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.89, 004.832

DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-521-532

**Интеграция методов поиска в ширину и логического вывода для удовлетворения табличных ограничений****А.А. Зуенко**

*Институт информатики и математического моделирования – обособленное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук» (ИИММ КНЦ РАН), Апатиты, Мурманской обл., Россия*

**Аннотация**

В рамках технологии программирования в ограничениях широко применяются табличные ограничения: обычные таблицы, *compressed*-таблицы, *smart*-таблицы, сегментированные таблицы и т.п. С их помощью могут быть представлены любые другие виды ограничений, а алгоритмы распространения табличных ограничений (логического вывода на табличных ограничениях) позволяют отфильтровывать «лишние» значения из доменов переменных, обладая при этом низкой вычислительной сложностью. В предыдущих исследованиях автора было предложено *smart*-таблицы подразделять на структуры *C*- и *D*-типов. Общепринятая методология решения задач удовлетворения ограничений заключается в совместном применении методов распространения ограничений и методов поиска в глубину с возвратами. В настоящем исследовании предлагается интегрировать методы поиска в ширину с авторским методом распространения табличных ограничений. *Smart*-таблицы *D*-типа предлагается представлять как соединение нескольких ортогонализированных *smart*-таблиц *C*-типа. Шаг поиска заключается в выборе пары *smart*-таблиц *C*-типа для соединения и последующем распространении ограничений. Для определения порядка соединения ортогонализированных *smart*-таблиц на каждом шаге поиска используется специализированная эвристика, которая обеспечивает сокращение пространства поиска с учётом дальнейших вычислений. При распространении ограничений ускорение процесса вычислений достигается за счёт применения разработанных правил редукции для случая *smart*-таблиц *C*-типа. Разработанный гибридный метод позволяет отыскивать все решения задач удовлетворения ограничений, моделируемых с помощью одной или нескольких *smart*-таблиц *D*-типа, без разложения табличных ограничений в элементарные кортежи.

**Ключевые слова:** программирование в ограничениях, *smart*-таблицы, поиск в ширину, распространение ограничений, задача удовлетворения ограничений.

**Цитирование:** Зуенко, А.А. Интеграция методов поиска в ширину и логического вывода для удовлетворения табличных ограничений / А.А. Зуенко // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.521-532. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-521-532.

**Введение**

Во многих системах искусственного интеллекта (ИИ) применяются методы логического анализа. Они активно развиваются в рамках такого направления ИИ, как программирование в ограничениях, которое основывается на декларативной парадигме представления знаний в форме задачи удовлетворения ограничений [1].

*Задача удовлетворения ограничений* описывается множеством переменных  $X_1, X_2, \dots, X_n$  и множеством ограничений  $C_1, C_2, \dots, C_m$  [2, 3]. Каждая переменная  $X_i$  имеет непустую область определения  $D_i$ . Каждое ограничение  $C_i$  на некотором подмножестве переменных задаёт допустимые комбинации значений для этого подмножества. Решением задачи является полное

присваивание значений всем переменным  $\{X_1 = v_1, \dots, X_n = v_n\}$ , которое удовлетворяет всем ограничениям.

В настоящей работе рассматриваются задачи программирования в ограничениях, где переменные дискретны и определены на конечных множествах значений. Статья посвящена вопросам обработки табличных ограничений [4-14]. Простейшим примером табличных ограничений являются реляционные таблицы. В виде реляционных таблиц, содержащих множество выполняющих подстановок, может быть представлен любой конечный предикат. Такое эксплицитное представление для многих отношений нецелесообразно, поскольку приводит к экспоненциальному росту сложности процедур удовлетворения ограничений. Поэтому предпринимаются попытки разработать более компактное табличное представление качественных зависимостей, в частности были предложены такие виды табличных ограничений как *compressed*-таблицы (*compressed tables*) и *smart*-таблицы (*smart tables*) [8-14].

Изучение прототипов показало, что известные типы табличных ограничений ориентированы на моделирование дизъюнктивных нормальных форм конечных предикатов и недостаточно хорошо подходят для моделирования конъюнктивных нормальных форм логических формул.

Некоторые исследования автора, посвящённые обработке табличных ограничений, описаны в [15, 16], подробный анализ приведён в [17].

В рамках программирования в ограничениях общепринятая методология поиска заключается в совместном применении методов распространения ограничений с методами поиска в глубину с возвратами, при этом используются специализированные эвристики для выбора переменной и её значения, а также стратегии возврата к состоянию, явившемуся причиной возникновения недопустимого присваивания. Особенность методов поиска в глубину с возвратами заключается в том, чтобы пошагово расширять частичное допустимое решение до полного. Если частичное решение недопустимо, то осуществляется возврат и предыдущее частичное решение расширяется в альтернативном направлении.

В настоящей работе предлагается метод, сочетающий стратегию поиска в ширину и авторский метод распространения табличных ограничений. Метод предназначен для решения задач удовлетворения ограничений, представленных с помощью *smart* таблиц *D*-типа.

## 1 Табличные ограничения для представления знаний

В работе [17] предложено рассматривать следующие виды табличных ограничений: обычная реляционная таблица, *compressed* таблица, *basic smart* таблица, *smart* таблица. *Smart* таблицы являются обобщением всех названных типов табличных ограничений. *Smart* таблицы предложено подразделять на структуры *C*- и *D*-типа. *Smart*-таблицы могут в своей схеме содержать не только простые, но и составные атрибуты, значениями которых являются отношения из предопределённого множества. *Smart*-таблицы *C*-типа соответствуют дизъюнктивным нормальным формам логических формул с элементарными одно и двуместными предикатами, а *smart*-таблицы *D*-типа соответствуют конъюнктивным нормальным формам таких формул.

В настоящей работе при записи содержимого *smart*-таблиц используются две фиктивные компоненты: полная компонента (обозначается «\*») – это множество, равное домену соответствующего (по месту её расположения в кортеже) атрибута; пустое множество –  $\emptyset$ .

*Smart*-таблица *C*-типа записывается в виде матрицы, ограниченной прямыми скобками.

**Пример 1.** Рассматривается ограничение, которое описывает вариативные условия формирования цены на товар при решении задачи планирования закупок для некоторой компании. На естественном языке это ограничение может быть записано так: либо цена товара 1

составляет 35 долларов, при этом должно быть закуплено больше 15 единиц товара 1 и столько же единиц товара 2, либо цена товара 1 равняется 50 долларам, в противном случае.

На языке логических формул это ограничение можно выразить следующим образом:

$$(X_1 \geq 15) \wedge (X_1 = X_2) \wedge (C = 35) \vee (X_1 < 15) \wedge (C = 50) \vee (X_1 \neq X_2) \wedge (C = 50),$$

где  $X_1$  – количество закупаемого товара 1,  $X_1 \in [0, 111]$ ;  $X_2$  – количество закупаемого товара 2,  $X_2 \in [0, 250]$ ;  $C$  – цена товара,  $C \in \{35, 50\}$ .

Данное ограничение в виде *smart*-таблицы *C*-типа запишется так:

$$T[X_1, X_2, C, X_1X_2] = \begin{bmatrix} \geq 15 & * & \{35\} & = \\ < 15 & * & \{50\} & * \\ * & * & \{50\} & \neq \end{bmatrix}.$$

Каждая строка этой *smart*-таблицы соответствует некоторому дизъюнкту приведённой логической формулы. Данная *smart*-таблица содержит в описании своей схемы составной атрибут  $X_1X_2$ , доменом которого является множество бинарных отношений  $\{=, \neq\}$ .

Как видно из примера 1, с помощью *smart*-таблиц *C*-типа удобно представлять дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ) конечных предикатов.

С помощью *smart*-таблиц *D*-типа моделируются конъюнктивные нормальные формы (КНФ) конечных предикатов. Содержимое *smart*-таблицы *D*-типа заключается в перевёрнутые прямые скобки. *Smart*-таблицы *D*-типа позволяют легко вычислять дополнение *smart*-таблиц *C*-типа относительно заданного универсума: требуется взять дополнение каждой компоненты *smart*-таблицы. Например, дополнением *smart*-таблицы  $T[X_1, X_2, C, X_1X_2]$  является *smart*-таблица *D*-типа:

$$\bar{T}[X_1, X_2, C, X_1X_2] = \begin{bmatrix} < 15 & \emptyset & \{50\} & \neq \\ \geq 15 & \emptyset & \{35\} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \{35\} & = \end{bmatrix}.$$

*Smart*-таблицу *D*-типа  $\bar{T}$  можно представить в виде:

$$[(X_1 < 15) \wedge (X_1 \neq X_2) \wedge (C = 50)] \vee [(X_1 \geq 15) \wedge (C = 35)] \vee [(X_1 = X_2) \wedge (C = 35)],$$

Поскольку *smart*-таблицы являются «сжатым» представлением многоместных отношений (обычных таблиц), то к ним могут быть применены все операции реляционной алгебры. Стоит подчеркнуть, что при выполнении операций дополнения и соединения не требуется раскладывать *smart*-таблицы в совокупность элементарных кортежей.

Любую *smart*-таблицу *D*-типа можно представить как соединение (обозначено символом  $\bowtie$ ) нескольких диагональных *smart*-таблиц *C*-типа, каждая из которых соответствует некоторой строке исходной *smart*-таблицы *D*-типа. Например:

$$\begin{aligned} \bar{T}[X_1, X_2, C, X_1X_2] &= \begin{bmatrix} < 15 & \emptyset & \{50\} & \neq \\ \geq 15 & \emptyset & \{35\} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \{35\} & = \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} < 15 & * & * & * \\ * & * & \{50\} & * \\ * & * & * & \neq \end{bmatrix} \bowtie \begin{bmatrix} \geq 15 & * & * & * \\ * & * & \{35\} & * \end{bmatrix} \bowtie \begin{bmatrix} * & * & \{35\} & * \\ * & * & * & = \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} < 15 & * & \{35\} & * \\ \geq 15 & * & \{50\} & = \\ * & * & \{35\} & \neq \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{1}$$

Диагональной называется квадратная *smart*-таблица, в которой только на главной диагонали могут находиться нефиктивные компоненты. В приведённом выражении из диагональных *smart*-таблиц *C*-типа исключены строки, содержащие пустые компоненты.

Результирующая *smart*-таблица *C*-типа «сжато» описывает множество всех выполняющих подстановок КНФ, которая представлена исходной *smart*-таблицей *D*-типа. Элементарные подстановки легко получить, рассматривая в отдельности каждую строку *smart*-таблицы *C*-типа. Поскольку рассматриваемая *smart*-таблица является дополнением *smart*-таблицы *T*, то она описывает запрещённые комбинации количества товаров и цен. В частности, из первой строки результирующей *smart*-таблицы *C*-типа следует, что товар 1 не может быть закуплен по цене 35 долларов, если его количество меньше 15 штук.

Иллюстрацией того, как выполняется соединение *smart*-таблиц *C*-типа, может служить соединение второй и третьей таблиц в приведённом выражении (1):

$$\begin{bmatrix} \geq 15 & * & * & * \\ * & * & \{35\} & * \end{bmatrix} \bowtie \begin{bmatrix} * & * & \{35\} & * \\ * & * & * & = \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \geq 15 & * & \{35\} & * \\ \geq 15 & * & * & = \\ * & * & \{35\} & * \\ * & * & \{35\} & = \end{bmatrix}.$$

При соединении двух *smart*-таблиц *C*-типа выполняется соединение каждой строки первого операнда с каждой строкой второго операнда. При соединении строк для компонент, соответствующих общим атрибутам обоих операндов, выполняется операция пересечения множеств.

Так решается задача нахождения множества всех выполняющих подстановок КНФ конечного предиката. В таком виде решение задачи оказывается слишком трудоёмким.

Одним из методов ускорения вычислений может служить ортогонализация, основанная на известном соотношении Порецкого:  $A \vee B = A \vee \overline{AB}$  [3].

В частности, справедливы соотношения:

$$\begin{bmatrix} \geq 15 & * & * & * \\ * & * & \{35\} & * \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \geq 15 & * & * & * \\ < 15 & * & \{35\} & * \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} * & * & \{35\} & * \\ * & * & * & = \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * & * & \{35\} & * \\ * & * & \{50\} & = \end{bmatrix}.$$

Соединение этих двух ортогонализированных *smart*-таблиц *C*-типа имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \geq 15 & * & * & * \\ < 15 & * & \{35\} & * \end{bmatrix} \bowtie \begin{bmatrix} * & * & \{35\} & * \\ * & * & \{50\} & = \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \geq 15 & * & \{35\} & * \\ \geq 15 & * & \{50\} & = \\ < 15 & * & \{35\} & * \end{bmatrix}.$$

В результате такого соединения получено меньшее количество строк результирующей таблицы, чем при их соединении без предварительной ортогонализации.

В общем случае порядок соединения диагональных *smart*-таблиц *C*-типа оказывает существенное влияние на скорость процесса вычислений.

Следует отметить, что:

$$\begin{bmatrix} \geq 15 & * & \{35\} & * \\ \geq 15 & * & * & = \\ * & * & \{35\} & * \\ * & * & \{35\} & = \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \geq 15 & * & \{35\} & * \\ \geq 15 & * & \{50\} & = \\ < 15 & * & \{35\} & * \end{bmatrix}.$$

Данные *smart*-таблицы моделируют одно и то же множество элементарных кортежей и в этом смысле являются эквивалентными: одно и то же множество элементарных кортежей может моделироваться *smart*-таблицами *C*-типа, которые внешне могут выглядеть по-

разному. Две эквивалентные *smart*-таблицы *C*-типа могут быть получены одна из другой в результате эквивалентных преобразований. Часть из этих преобразований лежит в основе предлагаемого метода вывода на *smart*-таблицах *C*-типа (метод распространения для случая *smart*-таблиц *C*-типа), целью которого является редукция пространства поиска за полиномиальное время.

Установлены следующие правила редукции для случая *smart*-таблиц *C*-типа, позволяющие удалять отдельные «лишние» значения из доменов атрибутов, компонент *smart*-таблицы, а также исключать из рассмотрения целые строки и столбцы.

*Утверждение 1 (У1)*. Если все строки *smart*-таблицы *C*-типа пусты, то есть содержат хотя бы по одной пустой компоненте каждая, то *smart*-таблица пуста.

*Утверждение 2 (У2)*. Если все компоненты некоторого атрибута (столбца *smart*-таблицы *C*-типа) являются полными, то данный атрибут можно удалить из *smart*-таблицы *C*-типа (удаляются все компоненты, стоящие в соответствующем столбце), а пара «удаляемый атрибут – его домен» сохраняется в векторе частичного решения.

*Утверждение 3 (У3)*. Если домен некоторого атрибута *smart*-таблицы *C*-типа содержит значения, не встречающиеся в соответствующем столбце, то эти значения удаляются из данного домена.

*Утверждение 4 (У4)*. Если строка *smart*-таблицы *C*-типа содержит хотя бы одну пустую компоненту (строка пуста), то строка удаляется.

*Утверждение 5 (У5)*. Если компонента некоторого атрибута *smart*-таблицы *C*-типа содержит значение, не принадлежащее соответствующему домену, то это значение удаляется из компоненты.

*Утверждение 6 (У6)*. Если в строке *smart*-таблицы *C*-типа усечена компонента, соответствующая простому атрибуту, который формирует некоторый составной атрибут, то в этой строке компонента, соответствующая упомянутому составному атрибуту, должна быть изменена с учётом нового значения компоненты простого атрибута.

*Утверждение 7 (У7)*. Если в строке *smart*-таблицы *C*-типа усечена компонента, соответствующая составному атрибуту, то в этой строке должны быть изменены компоненты соответствующих простых атрибутов с учётом вновь выведенной компоненты.

*Утверждение 8 (У8)*. Если в *smart*-таблице *C*-типа усечён домен простого атрибута, который входит в некоторый составной атрибут, то домен составного атрибута должен быть изменён с учётом нового домена простого атрибута.

*Утверждение 9 (У9)*. Если усечён домен составного атрибута, то должны быть изменены и домены соответствующих простых атрибутов с учётом вновь выведенного домена составного атрибута.

Аналогичные правила редукции для случая *smart*-таблиц *D*-типа приведены в [17].

## 2 Предлагаемый метод

В задачах удовлетворения ограничений, где требуется нахождение всех решений, представляется целесообразным совместно использовать стратегию поиска в ширину и авторские методы распространения нечисловых ограничений. В настоящем исследовании рассматривается случай, когда задача удовлетворения ограничений представляется в виде единственной или нескольких *smart*-таблиц *D*-типа. Предлагаемый гибридный метод основан на представлении *smart*-таблиц *D*-типа в виде соединения нескольких ортогонализированных *smart*-таблиц *C*-типа. *Ортогонализированной* называется *smart*-таблица *C*-типа, все кортежи (строки) которой попарно ортогональны. Метод позволяет определять такую очерёдность пересечения ортогонализированных *smart*-таблиц, которая бы способствовала сокращению вычислений.

На каждом шаге поиска предлагается выбирать пару *smart*-таблиц *C*-типа таким образом, чтобы максимально сократить область поиска. При выборе *smart*-таблиц для соединения используется следующая эвристика, заимствованная из работы [18]:

$$J(K[S], T[R]) = |K[S]| \times |T[R]| \times |S \setminus R| \times |R \setminus S|,$$

где  $K[S]$  – первая из пары выбираемых *smart*-таблиц,  $T[R]$  – вторая из пары *smart*-таблиц, выбираемых на текущем шаге поиска,  $S$  – схема (набор атрибутов) *smart*-таблицы  $K$ ,  $R$  – схема (набор атрибутов) *smart*-таблицы  $T$ . Запись  $|K[S]|$  обозначает число (элементарных) кортежей данной *smart*-таблицы *C*-типа.

После соединения пары *smart*-таблиц *C*-типа может оказаться, что в каком-либо из столбцов *smart*-таблицы *C*-типа, содержащей результат соединения, отсутствуют некоторые значения соответствующей переменной. Поэтому, после каждого соединения требуется осуществлять процесс распространения ограничений с применением утверждений У1-У8. При исключении «лишних» значений все *smart*-таблицы по-прежнему остаются ортогонализированными.

Значения функции  $J(K[S], T[R])$  могут значительно отличаться в зависимости от трактовки понятия «кортеж *smart*-таблицы *C*-типа». Можно в качестве кортежей *smart*-таблицы *C*-типа рассматривать: а) *smart*-кортежи (строки *smart*-таблицы); б) элементарные кортежи, получающиеся при преобразовании *smart*-таблицы в обычную таблицу.

При рассмотрении альтернативы (б) следует иметь ввиду, что, если диагональная *smart*-таблица *C*-типа ортогонализирована, то по её виду легко вычислить мощность множества элементарных кортежей данной *smart*-таблицы без разложения её в обычную реляционную таблицу. Для этого нужно перемножить мощности всех непустых компонент, стоящих в одной строке, а результаты перемножений, полученных для каждой из строк, сложить.

Чтобы оценить, какая из трактовок понятия «кортеж *smart*-таблицы *C*-типа» позволяет лучше осуществлять выбор пары соединяемых *smart*-таблиц на шаге поиска, рассмотрен пример.

**Пример 2.** Пусть имеется *smart*-таблица, заданная в  $S = X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ :

1	{2,3}	∅	{1,2,3}	∅
2	{2}	{1,2,5}	{4}	∅
3	∅	{1,2,4}	{3,4}	{3,5}
4	{1,2}	{3,4,5}	∅	{3}
5	∅	∅	{1,5}	{4}
6	∅	{2,3}	{1,2,3}	{1}
7	{2,4,5}	∅	{3,5}	{3,5}
8	{5}	∅	{2,3,4}	{1,3,4}
9	{1,3}	∅	{4,5}	∅

Данная *smart*-таблица *D*-типа может быть представлена как соединение следующих *smart*-таблиц *C*-типа:

$$K_1[X_1 X_3] \bowtie K_2[X_1 X_2 X_3] \bowtie K_3[X_2 X_3 X_4] \bowtie K_4[X_1 X_2 X_4] \bowtie K_5[X_3 X_4] \bowtie K_6[X_2 X_3 X_4] \bowtie K_7[X_1 X_3 X_4] \bowtie K_8[X_1 X_3 X_4] \bowtie K_9[X_1 X_3],$$

где

$$K_1[X_1 X_3] = \begin{bmatrix} \{2,3\} & * \\ \{1,4,5\} & \{1,2,3\} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 K_2[X_1 X_2 X_3] &= \begin{bmatrix} \{2\} & * & * \\ \{1,3,4,5\} & \{1,2,5\} & * \\ \{1,3,4,5\} & \{3,4\} & \{4\} \end{bmatrix}, K_3[X_2 X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{1,2,4\} & * & * \\ \{3,5\} & \{3,4\} & * \\ \{3,5\} & \{1,2,5\} & \{3,5\} \end{bmatrix}, \\
 K_4[X_1 X_2 X_4] &= \begin{bmatrix} \{1,2\} & * & * \\ \{3,4,5\} & \{3,4,5\} & * \\ \{3,4,5\} & \{1,2\} & \{3\} \end{bmatrix}, K_5[X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{1,5\} & * \\ \{2,3,4\} & \{4\} \end{bmatrix}, \\
 K_6[X_2 X_3 X_4] &= \begin{bmatrix} \{2,3\} & * & * \\ \{1,4,5\} & \{1,2,3\} & * \\ \{1,4,5\} & \{4,5\} & \{1\} \end{bmatrix}, K_7[X_1 X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{2,4,5\} & * & * \\ \{1,3\} & \{3,5\} & * \\ \{1,3\} & \{2,4,5\} & \{3,5\} \end{bmatrix}, \\
 K_8[X_1 X_3 X_4] &= \begin{bmatrix} \{5\} & * & * \\ \{1,2,3,4\} & \{2,3,4\} & * \\ \{1,2,3,4\} & \{1,5\} & \{1,3,4\} \end{bmatrix}, K_9[X_1 X_3] = \begin{bmatrix} \{1,3\} & * \\ \{2,4,5\} & \{4,5\} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

В данном случае произведена ортогонализация, целью которой является подсчёт элементарных кортежей в каждой из перечисленных *smart*-таблиц *C*-типа.

Элементарный шаг поиска заключается в том, что сначала выполняется соединение двух *smart*-таблиц *C*-типа, выбор которых осуществляется согласно приведённой выше эвристике, а затем выполняется процедура распространения ограничений.

Для двух упомянутых интерпретаций понятия «кортеж *smart*-таблицы *C*-типа» значения эвристической функции для каждой пары соединяемых на первом шаге поиска *smart*-таблиц представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Оценка размерности результирующего отношения после выполнения первого шага поиска для варианта с элементарными кортежами

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
$K_1$									
$K_2$	0								
$K_3$	4066	9951							
$K_4$	3838	9393	10807						
$K_5$	247	2418	0	2626					
$K_6$	3838	9393	0	10201	0				
$K_7$	0	9951	11449	10807	0	10807			
$K_8$	0	10137	11663	11009	0	11009	0		
$K_9$	0	0	3424	3232	208	3232	0	0	

Таблица 2 – Оценка размерности результирующего отношения после выполнения первого шага поиска для варианта со *smart*-кортежами

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
$K_1$									
$K_2$	0								
$K_3$	12	9							
$K_4$	12	9	9						
$K_5$	4	12	0	12					
$K_6$	12	9	0	9	0				
$K_7$	0	9	9	9	0	9			
$K_8$	0	9	9	9	0	9	0		
$K_9$	0	0	12	12	4	12	0	0	

Фактическая размерность результирующего отношения, которое получается при соединении пары *smart*-таблиц, приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Фактическая размерность результирующего отношения после соединения пары *smart*-таблиц на первом шаге поиска

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
$K_1$									
$K_2$	207								
$K_3$	2056	1644							
$K_4$	1076	1380	1660						
$K_5$	141	916	153	1036					
$K_6$	2404	1444	255	1612	150				
$K_7$	234	1596	1876	1732	165	1660			
$K_8$	249	1696	1964	1764	147	1796	279		
$K_9$	20	180	1384	1312	132	1120	186	204	

Из анализа таблицы 1 и 2 следует, что при обеих интерпретациях понятия «кортеж *smart*-таблицы  $C$ » значение «ноль» эвристической функции соответствует одним и тем же парам соединяемых *smart*-таблиц. Для вычисления таблицы 1 требуется гораздо больше арифметических операций. Основанием для использования в качестве мощности *smart*-таблицы количества её *smart*-кортежей, а не элементарных кортежей, состоит в том, что минимальному (максимальному) значению в таблице 2 соответствует минимальное (максимальное) значение в таблице 3.

С применением предложенной эвристики выбраны для соединения *smart*-таблицы, имеющие одинаковые схемы:  $K_1[X_1 X_3]$  и  $K_9[X_1 X_3]$ . Результат их соединения представлен так:

$$K_1[X_1 X_3] \bowtie K_9[X_1 X_3] = \begin{bmatrix} \{2,3\} & * \\ \{1,4,5\} & \{1,2,3\} \end{bmatrix} \bowtie \begin{bmatrix} \{1,3\} & * \\ \{2,4,5\} & \{4,5\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{3\} & * \\ \{2\} & \{4,5\} \\ \{1\} & \{1,2,3\} \end{bmatrix}.$$

Согласно утверждениям У1-У8 можно «сузить» домен переменной  $X_1$  до множества  $\{1, 2, 3\}$ , «просуммировав» значения первого столбца *smart*-таблицы  $K_1[X_1 X_3] \bowtie K_9[X_1 X_3]$ .

Теперь следует произвести «настройку» остальных *smart*-таблиц  $C$ -типа ( $K_1 - K_8$ ) на новый домен переменной  $X_1$ . На текущем шаге поиска получаются следующие домены переменных и набор *smart*-таблиц.

Домены:  $X_1 - \{1, 2, 3\}$ ,  $X_2 - \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,  $X_3 - \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,  $X_4 - \{1, 2, 3, 4, 5\}$ .

Ограничения:

$$K_1[X_1 X_3] \bowtie K_9[X_1 X_3] = \begin{bmatrix} \{1,3\} & \{1,2,3\} \\ \{2,3\} & \{4,5\} \end{bmatrix},$$

$$K_2[X_1 X_2 X_3] = \begin{bmatrix} \{2\} & * & * \\ \{1,3\} & \{1,2,5\} & * \\ \{1,3\} & \{3,4\} & \{4\} \end{bmatrix}, K_3[X_2 X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{1,2\} & * & * \\ \{3\} & \{3,4\} & * \\ \{3\} & \{1,2,5\} & \{3,5\} \end{bmatrix},$$

$$K_4[X_1 X_2 X_4] = \begin{bmatrix} \{1,2\} & * & * \\ \{3\} & \{3,4,5\} & * \\ \{3\} & \{1,2\} & \{3\} \end{bmatrix}, K_5[X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{1\} & * \\ \{2,3\} & \{4\} \end{bmatrix},$$

$$K_6[X_2 X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{2,3\} & * & * \\ \{1\} & \{1,2,3\} & * \\ \{1\} & \{4,5\} & \{1\} \end{bmatrix},$$

$$K_7[X_1 X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{2\} & * & * \\ \{1,3\} & \{3,5\} & * \\ \{1,3\} & \{2,4,5\} & \{3,5\} \end{bmatrix},$$

$$K_8[X_1 X_3 X_4] = \begin{bmatrix} \{1,2,3\} & \{2,3,4\} & * \\ \{1,2,3\} & \{1,5\} & \{1,3,4\} \end{bmatrix}.$$

В *smart*-таблицах  $K_2$ - $K_7$  были откорректированы первые столбцы, в *smart*-таблице  $K_8$  удалена первая строка. Дальнейшие шаги процесса поиска выполняются по аналогии.

## Заключение

В работе предложен поиск всех решений задачи удовлетворения ограничений, представленной с использованием *smart*-таблиц  $D$ -типа, и сводится к определению порядка соединения нескольких ортогонализированных *smart*-таблиц  $C$ -типа. Использована эвристика для выбора на каждом шаге поиска пары соединяемых *smart*-таблиц  $C$ -типа. Рассмотрены два варианта использования данной эвристики. Показано, что при определении размерности *smart*-таблицы целесообразно использовать количество её *smart*-кортежей, а не количество элементарных кортежей отношения. Предложены правила редукции для случая *smart*-таблиц  $C$ -типа.

В случае алгоритмов поиска в глубину с возвратами их временная сложность оценивается как произведение доменов всех переменных. Временная сложность предложенного метода оценивается как произведение, в котором каждый множитель равен количеству непустых компонент соответствующей строки исходной *smart*-таблицы  $D$ -типа. Предложенный метод даёт значительный выигрыш при большом количестве переменных, высокой размерности их доменов и сравнительно малом количестве строк *smart*-таблицы  $D$ -типа.

Разработанный метод позволяет эффективно находить все решения задач удовлетворения ограничений без разложения табличных ограничений в элементарные кортежи и легко адаптируется для решения оптимизационных задач. Предложенный метод ориентирован на применение в интеллектуальных системах, предназначенных для слабо формализованных предметных областей.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-07-00708-а, 19-07-00359-а.

## Список источников

- [1] **Russel, S.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd edition / S. Russel, P. Norvig. – Prentice Hall, 2010. – 1132 p.
- [2] **Mackworth, A.** Consistency in networks of relations / A. Mackworth // Artificial Intelligence. – 1977. – 8(1). – P. 99-118. DOI: 10.1016/0004-3702(77)90007-8.
- [3] **Bartak, R.** Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail / R. Bartak // Proceedings of the Week of Doctoral Students (WDS99), Part IV. – Prague: MatFyzPress, 1999. P.555–564.

- [4] **Charlier, B.** Automatic Synthesis of Smart Table Constraints by Abstraction of Table Constraints / B. Charlier, M. Khong, C. Lecoutre, Y. Deville // Proceedings of IJCAI 2017. 2017. P. 681-687. DOI: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/95>.
- [5] **Audemard, G.** Segmented Tables: An Efficient Modeling Tool for Constraint Reasoning / G. Audemard, C. Lecoutre, M. Maamar // Proceedings of ECAI 2020. 2020. P.315-322.
- [6] **Yap, R.** Generalized Arc Consistency Algorithms for Table Constraints: A Summary of Algorithmic Ideas / R. Yap, W. Wang // Proceedings of AAAI 2020. 2020. P.13590-13597. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7086>.
- [7] **Perez, G.** Improving GAC-4 for table and MDD constraints / G. Perez, J.C. Regin // CP 2014. LNCS. 2014. 8656. P.606-621. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10428-7\\_44](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10428-7_44).
- [8] **Verhaeghe, H.** Extending compact-table to negative and short tables / H. Verhaeghe, C. Lecoutre, P. Schaus // Proceedings of AAAI 17. 2017. P.3951-3957. DOI: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3298023.3298142>.
- [9] **Ingmar, L.** Making Compact-Table Compact / L. Ingmar, C. Schulte // Proceedings of CP 2018, Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol.11008. P.210-218. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9_14).
- [10] **Cheng, K.** An MDD-based generalized arc consistency algorithm for positive and negative table constraints and some global constraints / K. Cheng, R. Yap // Constraints. 2010. 15(2). P.265-304. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10601-009-9087-y>.
- [11] **Jefferson, C.** Extending simple tabular reduction with short supports / C. Jefferson, P. Nightingale // Proceedings of IJCAI 2013, 2013. P.573-579.
- [12] **Mairy, J.** The Smart Table Constraint / J. Mairy, Y. Deville, C. Lecoutre // In: Michel, L. (eds.) Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming. CPAIOR 2015. Lecture Notes in Computer Science. – Springer. Cham, 2015. Vol.9075. P.271-287.
- [13] **Verhaeghe, H.** Extending Compact-Table to Basic Smart Tables. Principles and Practice of Constraint Programming / H. Verhaeghe, C. Lecoutre, Y. Deville, P. Schaus // CP 2017, Lecture Notes in Computer Science. 2017. 10416. P.297-307. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2\\_19](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2_19).
- [14] **Schneider, A.** PW-CT: Extending Compact-Table to Enforce Pairwise Consistency on Table Constraints / A. Schneider, B. Choueiry // CP 2018, Lecture Notes in Computer Science. 2018. 11008. P.345-361. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9_23).
- [15] **Zuenko, A.** Development of n-tuple algebra for logical analysis of databases with the use of two-place predicates / A. Zuenko, A. Fridman // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2009. Vol.48(2). P.254-261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230709020099>.
- [16] **Zuenko, A.** Local Search in Solution of Constraint Satisfaction Problems Represented by Non-Numerical Matrices / A. Zuenko // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering (CSAE '18) 2018. 45. DOI: 10.1145/3207677.3277959.
- [17] **Зуенко А.А.** Компактное представление ограничений на основе новой интерпретации понятия «кортеж многоместного отношения» / А.А. Зуенко // Онтология проектирования. 2020. Т.10. №4(38). С.503-515. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-503-515.
- [18] **Møller, G.** On the Technology of Array-Based Logic. / G. Møller // Ph. D. thesis. – 1995. – <http://www.arraytechnology.com/documents/lic.pdf>.

---

## Сведения об авторе



**Зуенко Александр Анатольевич**, 1983 г.р., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института информатики и математического моделирования – обособленного подразделения ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук». Области научных интересов: программирование в ограничениях; моделирование слабо формализованных предметных областей. Author ID (RSCI): 528493; Author ID (Scopus): 26536974000; Researcher ID (WoS): E-7944-2017. [zuenko@iimm.ru](mailto:zuenko@iimm.ru).

---

Поступила в редакцию 08.12.2021, после рецензирования 17.12.2021. Принята к публикации 22.12.2021.

---

## Breadth First Search and Inference Methods Integration to satisfy table constraints

**A.A. Zuenko**

*Institute for Informatics and Mathematical Modeling – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia*

### Abstract

Within the Constraint Programming technology, so-called table constraints such as typical tables, compressed tables, smart tables, segmented tables, etc, are widely used. They can be used to represent any other types of constraints, and algorithms of the table constraint propagation (logical inference on constraints) allow eliminating a lot of "redundant" values from the domains of variables, while having low computational complexity. In the previous studies, the author proposed to divide smart tables into structures of *C*- and *D*-types. The generally accepted methodology for solving constraint satisfaction problems is the combined application of constraint propagation methods and backtracking depth-first search methods. In the study, it is proposed to integrate breadth-first search methods and author's method of table constraint propagation. *D*-type smart tables are proposed to be represented as a join of several orthogonalized *C*-type smart tables. The search step is to select a pair of *C*-type smart tables to be joined and then propagate the restrictions. To determine the order of joining orthogonalized smart tables at each step of the search, a specialized heuristic is used, which reduces the search space, taking into account further calculations. When the restrictions are extended, the acceleration of the computation process is achieved by applying the developed reduction rules for the case of *C*-type smart tables. The developed hybrid method allows one to find all solutions to the problems of satisfying constraints modeled using one or several *D*-type smart tables, without decomposing tabular constraints into elementary tuples.

**Key words:** *constraint programming, smart tables, breadth first search, constraint propagation, constraint satisfaction problem.*

**Citation:** *Zuenko AA. Breadth First Search and Inference Methods Integration to satisfy table constraints [In Russian]. Ontology of designing. 2021; 11(4): 521-532. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-521-532.*

**Acknowledgment:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project numbers 20-07-00708-a, 19-07-00359-a.

### List of tables

Table 1 – The estimation of the size of the resulting relation after the first step of the search for the case of elementary tuples

Table 2 – The estimation of the size of the resulting relation after the first step of the search for the case of smart tuples

Table 3 - The actual size of the resulting relation after joining a pair of smart tables at the first step of the search

### References

- [1] *Russel S, Norvig P.* Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Prentice Hall, 2010. 1132 p.
- [2] *Mackworth A.* Consistency in networks of relations. Artificial Intelligence. 1977; 8(1): 99-118. DOI: 10.1016/0004-3702(77)90007-8.
- [3] *Bartak R.* Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail. Proc. of the Week of Doctoral Students (WDS99), Part IV. Prague: MatFyzPress, 1999: 555–564.
- [4] *Charlier B, Khong M, Lecoutre C, Deville Y.* Automatic Synthesis of Smart Table Constraints by Abstraction of Table Constraints. Proc. of IJCAI 2017, 2017: 681-687. DOI: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/95>.
- [5] *Audemard G, Lecoutre C, Maamar M.* Segmented Tables: An Efficient Modeling Tool for Constraint Reasoning. Proc. of the ECAI 2020, 2020: 315-322.
- [6] *Yap R, Wang W.* Generalized Arc Consistency Algorithms for Table Constraints: A Summary of Algorithmic Ideas. Proc. of the AAAI 2020, 2020: 13590-13597. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7086>.
- [7] *Perez G, Regin JC.* Improving GAC-4 for table and MDD constraints. CP 2014. LNCS, 2014; 8656: 606-621. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10428-7\\_44](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10428-7_44).

- [8] **Verhaeghe H, Lecoutre C, Schaus P.** Extending compact-table to negative and short tables. Proc. of AAAI 17, 2017: 3951-3957. DOI: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3298023.3298142>.
- [9] **Ingmar L, Schulte C.** Making Compact-Table Compact. CP 2018, LNCS, 2018; 11008: 210-218. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9_14).
- [10] **Cheng K, Yap R.** An MDD-based generalized arc consistency algorithm for positive and negative table constraints and some global constraints. Constraints, 2010; 15(2): 265-304. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10601-009-9087-y>.
- [11] **Jefferson C, Nightingale P.** Extending simple tabular reduction with short supports. Proc. of IJCAI 2013. 2013: 573-579.
- [12] **Mairy J, Deville Y, Lecoutre C.** The Smart Table Constraint. Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming. CPAIOR 2015. LNCS, 2015; 9075: 271-287.
- [13] **Verhaeghe H, Lecoutre C, Deville Y, Schaus P.** Extending Compact-Table to Basic Smart Tables. Principles and Practice of Constraint Programming. CP 2017. LNCS, 2017; 10416: 297-307. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2\\_19](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2_19).
- [14] **Schneider A, Choueiry B.** PW-CT: Extending Compact-Table to Enforce Pairwise Consistency on Table Constraints. CP 2018. LNCS, 2018; 11008: 345-361. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9_23).
- [15] **Zuenko A, Fridman A.** Development of n-tuple algebra for logical analysis of databases with the use of two-place predicates. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2009; 48(2): 254-261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230709020099>.
- [16] **Zuenko A.** Local Search in Solution of Constraint Satisfaction Problems Represented by Non-Numerical Matrices. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Computer Science and Application Engineering (CSAE '18), 2018: 45. DOI: [10.1145/3207677.3277959](https://doi.org/10.1145/3207677.3277959).
- [17] **Zuenko A.A.** Compact representation of constraints based on a new interpretation of the concept “tuple of a multi-place relation” [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(4): 503-515. DOI: [10.18287/2223-9537-2020-10-4-503-515](https://doi.org/10.18287/2223-9537-2020-10-4-503-515).
- [18] **Moller G.** On the Technology of Array-Based Logic. Ph. D. thesis, 1995; <http://www.arraytechnology.com/documents/lic.pdf>.

## About the author

**Alexander Anatolievich Zuenko**, (b. 1983) PhD, a leading researcher of Institute for Informatics and Mathematical Modeling – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”. Research interests: constraint programming; poorly formalized subject domains modeling. Author ID (RSCI): 528493; Author ID (Scopus): 26536974000; Researcher ID (WoS): E-7944-2017. [zuenko@iimm.ru](mailto:zuenko@iimm.ru).

---

*Received December 08, 2021. Revised December 17, 2021. Accepted December 22, 2021.*

---

# Онтологический Саммит 2021. Коммюнике: генерация и гармонизация онтологий Ontology Summit 2021. Communique: «Ontology Generation and Harmonization»<sup>1</sup>

Ноябрь 2021

**Кен Баклавски**, Северо-Восточный университет, Бостон, Массачусетс, США ([kenbaclawski@gmail.com](mailto:kenbaclawski@gmail.com))  
**Майкл Беннет**, Hypercube Limited, Лондон, Великобритания ([mbennett@hypercube.co.uk](mailto:mbennett@hypercube.co.uk))  
**Гэри Берг-Кросс**, соруководитель ESIP по семантической гармонизации ([gbergcross@gmail.com](mailto:gbergcross@gmail.com))  
**Лея Дикерсон**, Счётная палата правительства, Вашингтон, округ Колумбия, США ([ldickers@gmail.com](mailto:ldickers@gmail.com));  
**Тодд Шнайдер**, инженерная семантика, Фэрфакс, Вирджиния, США ([tschneider@engineeringsemantics.com](mailto:tschneider@engineeringsemantics.com));  
**Селья Сеппала**, Университетский колледж Корка, Ирландия ([selja.seppala@ucc.ie](mailto:selja.seppala@ucc.ie));  
**Рави Шарма**, старший архитектор предприятия, Elk Grove, Калифорния, США ([dravisharma@gmail.com](mailto:dravisharma@gmail.com))  
**Рам Д. Шрирам**, Национальный институт стандартов и технологий, Мэриленд, США ([sriram@nist.gov](mailto:sriram@nist.gov))  
**Андреа Вестеринен**, OntoInsights LLC, Элтон, Мэриленд, США ([arwesterinen@gmail.com](mailto:arwesterinen@gmail.com))

## Аннотация

Достижения в области машинного обучения и разработки больших графов знаний сопровождали распространение онтологий многих типов и для многих целей. Эти онтологии обычно разрабатываются независимо, и в результате может быть трудно обмениваться информацией о них и между ними. Для решения этой проблемы коммуникации онтологи должны договориться о том, как их терминология и формализация соотносятся друг с другом. Процесс достижения договорённости и согласия называется «гармонизацией». На Саммите Онтологий 2021 был рассмотрен общий ландшафт онтологий, многие виды генерации и гармонизации онтологий, а также устойчивость онтологий. В коммюнике обобщаются и резюмируются выводы саммита, а также предыдущих саммитов по смежным вопросам. Одним из основных препятствий на пути к гармонизации является относительно низкое качество определений на естественном языке во многих онтологиях. На саммите было рассмотрено состояние дел в разработке определений естественного языка, основанное на лексикографических принципах, а также примеры текущих проектов, которые связаны с гармонизацией и устойчивостью.

**Ключевые слова:** онтология, машинное обучение, определения, устойчивость, гармонизация.

**Цитирование:** Баклавски, К. Онтологический Саммит 2021. Коммюнике: генерация и гармонизация онтологий / К. Баклавски, М. Беннет, Г. Берг-Кросс, Т. Шнайдер, С. Сеппала, Р. Шарма, Р. Д. Шрирам, А. Вестеринен. Перевод с англ. Д. Боргест // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). - С.533-548. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-533-548.

## 1 Введение

Онтологии быстро распространяются, создавая сложный ландшафт многих типов, ролей и использования для многих целей [Hitzler, 2021b], таких как интеграция данных, приложения семантической сети, бизнес-отчёты и искусственный интеллект (ИИ). Онтологии можно извлекать, изучать, модулировать, связывать, преобразовывать, анализировать и согласовывать, а также разрабатывать в рамках формального процесса, который может быть ручным или автоматическим.

В настоящее время существует множество способов взаимодействия онтологий с другими технологиями, включая, помимо прочего, статистические и лингвистические методы, создание инструментов машинного обучения, служащих основой для машинного обучения

<sup>1</sup> Перевод финальной версии Коммюнике Онтологического Саммита за 2021 год, опубликованного в ноябре 2021 года. - <https://ontologforum.s3.amazonaws.com/OntologySummit2021/Communique/Ontology+Summit+2021+Communique.pdf>. Предварительная краткая информация о Саммите представлена во 2-ом номере 11-го тома журнала. - [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021\\_2\(40\)/Ontology\\_Of\\_Designing\\_2\\_2021\\_12\\_Ontology\\_Summit\\_2021\\_251-252.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021_2(40)/Ontology_Of_Designing_2_2021_12_Ontology_Summit_2021_251-252.pdf).

(МО) с целью повышения качества и объяснимости его результатов, и интеграция в архитектуры МО [Gaur, Faldu, and Sheth, 2021]. К сожалению, обычно онтологии строятся независимо. Хотя такие онтологии могут очень хорошо служить своим целям, очень сложно согласовать онтологии, которые были разработаны для перекрывающихся предметных областей (ПрО). Более того, онтологии, созданные с использованием автоматизированных методов, людям трудно понять. Растёт понимание необходимости гармонизации и лучшего определения терминов в онтологиях, а также передовых практик для их обеспечения.

На Саммите Онтологий 2021 года был изучен ландшафт генерации и гармонизации онтологий с использованием серии виртуальных презентаций и сессий, проведённых с февраля по май 2021 года. В этом коммюнике обобщаются и резюмируются результаты этой серии встреч. Основываясь на интересах сообщества, Саммит Онтологий 2021 был разбит на четыре трека, и в Коммюнике отражены подтемы этих треков. В треке «Онтологический ландшафт» (раздел 2) представлена общая основа для различных видов онтологии и для остальных треков саммита. В разделе 2.2 представлена одна из целей онтологий - коммуникация и показано, что могут возникнуть неправильные интерпретации, если термины не определены должным образом. Во избежание неправильного толкования в контексте данного Коммюнике термин следует понимать как имеющий определение на естественном языке, если только термин не имеет префикса пространства имён. Если важный термин естественного языка неоднозначен, то предполагаемое определение или определения будут уточнены. Например, в разделе 3.1 используется слово «аннотация» и указывается предполагаемое определение из словаря. Именно это понятие аннотации используется в Коммюнике, а не, например, *owl: AnnotationProperty*. В качестве другого примера в Коммюнике используется понятие «определение». Различные понятия определения приведены в начале раздела 3. В Коммюнике используются эти понятия определения, а не *rdfs: isDefinedBy*.

Определения естественного языка, особенно определения ПрО, являются важной частью онтологий; но с онтологической точки зрения они часто плохо написаны либо из-за недостатка опыта написания определений, нехватки ресурсов, либо из-за отсутствия акцента на правильном определении терминов в процессе разработки онтологии. Подробности о понятии семантически адекватного определения естественного языка и его роли в развитии и гармонизации онтологии представлены в разделе 3.

Недавние разработки более эффективных методов МО позволяют извлекать онтологическую информацию из исходных документов. Хотя такие методы эффективны для конкретных задач, в настоящее время они, как правило, непрозрачны и трудно поддаются пониманию и объяснению. Проблема объяснимости рассматривалась на предыдущем саммите онтологов [Waclawski et al., 2020a]. Один из способов сделать методы МО более объяснимыми - это интегрировать МО с онтологиями [Waclawski et al., 2018b; Гаур, Фалду и Шет, 2021].

Архитектуры, которые были разработаны для интеграции онтологий с МО и, в более общем плане, интеграции символьных (включая графы знаний и онтологии) и субсимвольных (таких как МО) методов, представлены в разделе 4.

Недостаточно создавать онтологии с хорошо разработанными определениями и документацией, они должны поддерживаться в течение долгого времени. Устойчивость онтологий - это гораздо больше, чем просто обеспечение постоянным финансированием. Результаты трека «Устойчивость онтологий» представлены в разделе 5.

Раздел 6 – выводы и заключение по проблемам, поднятым Саммитом Онтологий.

## 2 Онтологический ландшафт

Онтологии имеют множество аспектов и целей. В результате растущая классификация онтологий многомерна и образует богатый ландшафт, а не простой линейный «спектр».

Различия между типами онтологий изучались и анализировались на первых двух Саммитах Онтологий в 2006 и 2007 годах. Первым был саммит верхних онтологий [Cassidy, Obrst, Ray, Soergel, and Yim, 2006], а вторым - «Онтология, Таксономия, Фольксномия: понимание различий» [Obrst et al., 2007]. На этих двух встречах на высшем уровне был определён ряд онтологий, и некоторые из наиболее известных онтологий того времени были классифицированы [Baclawski 2007a, 2007b; Baclawski & Duggar, 2007]. Наиболее распространенная классификация онтологий - по уровню их общности, а в разделе 2.1 обсуждаются типы онтологий, различающиеся по степени их общего применения.

Одна из основных целей онтологий - коммуникация, и в разделе 2.2 рассматриваются типы онтологий с точки зрения различных коммуникационных требований. В разделе 2.3 обсуждаются различные подходы к тому, что должны представлять объекты онтологий. В разделах 2.4 и 2.5 рассматриваются отношение к реализму и представление неопределённости. Раздел 2 заканчивается кратким обсуждением результатов.

### 2.1 Общность

Онтологии чаще всего классифицируют по уровню их общности. Наиболее общие или абстрактные онтологии называются базовыми онтологиями, общими онтологиями и онтологиями верхнего уровня [Ontology Term List, 2020]. Наиболее специфические онтологии называются прикладными онтологиями, потому что они обычно связаны с конкретным приложением или узким диапазоном приложений. Между этими двумя крайностями находятся справочные онтологии и онтологии ПрО. Справочные онтологии более специфичны, чем базовые онтологии, но не ограничиваются определённой областью. Онтологии ПрО ограничены одной ПрО, но ПрО могут образовывать иерархии с множеством уровней общности, а онтологии ПрО также могут иметь много уровней общности [Schneider, 2021]. Были предложены другие понятия общности онтологий, такие как эталонные онтологии верхнего уровня, которые обеспечивают спецификации требований, функций, дизайна или стандартов для конкретного приложения [Chen, Ludwig, Ma, and Walther, 2019].

### 2.2 Коммуникация

Одна из целей онтологии - улучшить коммуникацию. Общение может происходить между людьми, между людьми и машинами, а также между машинами. Машины работают и взаимодействуют лучше всего, когда элементы онтологии определены точно и логически, так что они могут быть обработаны (например, выводы могут быть вычислены) и их неоднозначность сведена к минимуму. Человеческий язык, для сравнения, гораздо богаче большим количеством типов речи и присущими ему двусмысленностями [Hanks, Jezek, 2008; Baclawski, 2021]. Это богатство далеко не недостаток человеческого языка, а его сила. Люди справляются с двусмысленностью языка через контекст диалога, манеру общения (например, интонацию и жесты) и способность просить разъяснений [Sowa, 2021].

Онтология и её документация должны распознавать различия между потребностями людей и машин. Одним из средств достижения этого является наличие «языкового интерфейса», который является посредником между человеческой и машинной терминологией. Языковой интерфейс - важная особенность современных процессов разработки программного обеспечения, и разработка онтологий также может извлечь выгоду из этих практик [Bennett, 2021; Woods & Low, 2021].

Одной из функций определения является уточнение умозаключений читателей или систем, то есть того, что читатели или системы делают, когда сталкиваются с определённым термином [Seppala, Ruttenberg, Schreiber, and Smith, 2016]. Теоретическое объяснение функций определений естественного языка в онтологиях, подкреплённое эмпирическими нейропсихологическими исследованиями, см. в [Seppala, Ruttenberg, and Smith, 2016].

Другим эффективным средством коммуникации является построение онтологии на событиях и состояниях, представляющих интерес в ПрО, а также на аргументах (субъекты, объекты и т.д.) этих событий (согласно нео-Дэвидсоновской семантике). Основание онтологии на событиях и состояниях позволяет онтологии быть глубоко информированным нарративом и лингвистической теорией событий [Westerinen, 2021].

Для онтологии, использующей OWL, Common Logic или другие языки представления онтологий на основе логики, идентификаторы (для элементов онтологии) фактически являются символами логического языка. Однако люди уже знакомые с такими терминами или фразами естественного языка, иногда воспринимают их эмоционально и предвзято. В результате люди могут легко забыть или проигнорировать, что идентификаторы должны рассматриваться как символы, интерпретация которых продиктована формализацией, используемой для определения идентификаторов. Неправильная интерпретация ещё более вероятна, когда элемент онтологии не определён должным образом, чтобы соответствовать предполагаемым интерпретациям. Неадекватные определения возникают по многим причинам. Одна из причин, по которой определение естественного языка может быть неадекватным, - это неявная уверенность разработчиков-онтологов в том, что пользователь элемента «поймёт», как этот элемент должен быть интерпретирован. Разработчики онтологий могут иметь определённое понимание термина или фразы на естественном языке, не осознавая, что некоторые пользователи онтологии имеют другое понимание [Schneider, 2021].

Чётко определённые концепции являются важным компонентом коммуникации и играют центральную роль в семантическом взаимодействии. Как коммуникация, так и функциональная совместимость основаны на общем понимании концепций, услуг, информации и данных. На Саммите Онтологий 2007 обсуждался спектр полезных семантических артефактов, начиная с неявного предпочтения строгих формальностей в онтологиях [Obrst et al, 2008]. Существует ряд ресурсов, таких как фолксонии (например, простые определяемые пользователем списки ключевых слов, полезные для аннотирования ресурсов в Интернете), а также таксономии, концептуальные модели и контролируемые словари (например, медицинские предметные рубрики, *MeSH*). Контролируемый словарь отражает ассоциацию терминов и является частью использования языка в ПрО, которая, подобно модели, налагает некоторую упрощающую, ограничивающую и организующую форму на изменяющуюся ПрО. Стимулом контролируемых словарей является формализация понятий на логическом языке, позволяющая в некоторой степени автоматизировать обработку данных. На Саммите Онтологий 2007 было меньше внимания уделено стандартизации других форм семантических ресурсов на этапах преформализации. В последнее время стали широко признаваться и цениться как онтологии, так и стандартные словари для поддержки коммуникации, совместного использования данных и взаимодействия.

## 2.3 Различия онтологий

Онтологии могут использоваться для ряда целей, таких как интеграция данных, приложения семантической паутины, бизнес-отчёты и ИИ. Различные варианты использования лучше всего поддерживаются разными, а иногда и противоположными стилями моделирования. Ключевым отличием онтологий, как и любой модели, является вопрос о том, какого рода вещи представлены элементами этой модели (например, классы, отношения, свойства и т.д.). Онтология - это модель, которая представляет вещи и отношения между ними, актуальные для определённой цели. Многие онтологии предназначены для контекстуализации данных конкретной ПрО.

Онтологии определяют классы с точки зрения необходимых и достаточных характеристик, которые делают что-то членом этого класса. Большинство этих различий не выражаются в виде данных. Например, юридический или финансовый инструмент будет определяться с точки зрения юридических или финансовых характеристик [«Social Constructs» in Searle, 2010]; недвижимость, улицы и острова - это физические вещи в мире; и т.д. Между тем, приложения будут использовать данные, которые были определены как наиболее полно отражающие эти вещи в мире. Например, ваша дата рождения может быть представлена как тип «Событие» с датой (рождения), в которой произошло событие, и эта дата может быть представлена данными под названием «*dateOfBirth*» с типом данных «*date*».

Один из видов онтологии, часто называемый онтологией «концепций», будет содержать логические утверждения, сформулированные в терминах атрибутов ПрО и того, как они определяют значения вещей в этой ПрО [Bennett, 2021]. Эти логические утверждения могут использоваться людьми для понимания вещей в ПрО, например, в деловых целях. Другой вид онтологии используется для моделирования данных, связанных с предметами в ПрО.

Выбор данных для представления этих вещей является проектным решением, даже если во многих случаях выбор решения очевиден. Их часто называют «операционными» или «прикладными» онтологиями.

Дальнейший анализ показывает, что могут существовать разные стили онтологий, которые имеют дело с операционными данными. Онтология для интеграции нескольких источников данных может нуждаться в семантически более детальных различиях, чтобы иметь дело с различными способами, которыми эти источники данных отражают концептуализацию мира. В то время как онтология для обоснования данными (например, в графе знаний) была бы проще.

Другие различия отражают выбор операционной онтологии. Например, операционная онтология не обязательно должна использовать полную базовую онтологию для разделения своего мира. Как правило, у него будет меньше связей с минимальным использованием ограничений, таких как области свойств и диапазоны.

Напротив, онтология понятий будет иметь более богатый набор отношений, например, для различных типов отношений целого и частичного, и будет отражать множество ограничений, которые применяются к отношениям и свойствам.

При выводе операционной онтологии из онтологии понятий необходимо несколько этапов проектирования: выравнивание иерархии классов, извлечение понятий, относящихся к варианту использования приложения, выборочное удаление классов, которые отражают некоторые разделы онтологии верхнего уровня, такие как «вещи в ролях» и сокращение соответствующих путей собственности, так что, например, концептуальное различие между ссудой - заёмщиком (как сторона в роли) - лицом, становится простым отношением «ссуда - лицо». Каждый вариант использования приложения, будучи отдельным бизнес-контекстом, повлечёт за собой извлечение различного материала из онтологии понятий. В этом отношении проектирование операционных онтологий следует по пути, аналогичному развитию любой другой технологии, с концепцией онтологии, играющей роль «вычислительно независимой модели» в процессе разработки.

Чтобы онтология, особенно очень большая, была непротиворечивой в более широком смысле этого термина, она должна быть не только логически и концептуально последовательной, но и иметь единый стиль повсюду. Последовательность в этом более широком смысле требует соответствия руководящим принципам стиля, таким как соглашения об именах и процедуры управления изменениями [Uschold, 2021]. Последовательность также является необходимой частью устойчивости, что более подробно обсуждается в разделе 5.

## 2.4 Реализм

Другая сторона онтологии - степень «реализма». Философский реализм - это тезис о том, что существует реальность, существующая независимо от людей. Известно много понятий реализма, которые были предложены и изучены в философии. Онтология является реалистической по отношению к определённому понятию реализма, если она основана на тезисе философского реализма. Ни философские, ни вычислительные онтологии не требуют реализма; действительно, компьютерные учёные обычно более плюралистичны в отношении того, какие объекты могут иметь значение, являются ли они онтологическими (в философском смысле), концептуальными, когнитивными, гипотетическими и т.д. Более плюралистический подход имеет преимущества при работе с естественным языком, здравым смыслом и другими человеческими способностями. Ещё одним следствием плюралистического отношения является то, что оно допускает понятия «истины», которые лежат в основе различных механизмов рассуждения (то есть логики) и зависят от контекста и ситуации [Masolo, 2021]. Различные формы логики являются частой темой более ранних онтологических саммитов, в том числе в 2007 г. [Obrst et al, 2008], в 2010 г. «Создание онтологов будущего» [Neuhaus et al, 2010] и в 2017 г. «ИИ, обучение, рассуждение и онтологии» [Baclawski et al, 2018b].

## 2.5 Неопределённость

Человеческое понимание обычно вероятностное. Чтобы отразить лучшее понимание мира, онтологии для некоторых ситуаций или приложений должны поддерживать спецификацию неопределённости и рассуждения. Однако не существует общепринятого способа определения неопределённости в онтологии. Например, вероятность того, что конкретный оператор *RDF* будет истинным, может быть определён просто как добавление предиката: вероятность в качестве границы *RDF\** или как повторение оператора *RDF* [Westerinen, 2021]; или можно было бы аннотировать утверждение с помощью предиката *strength* [Sharma, 2021]. Некоторые из предложений по учёту неопределённости в онтологии включают *PR-OWL* [Carvalho, Laskey, and Costa, 2017] и байесовский язык онтологий *BEL* [Ceylon and Penaloza, 2017]. Но, возможно, наличие гибкости в определении онтологических вероятностей является преимуществом. Возможно, понятие неопределённости, как и другие аспекты онтологии, будет зависеть от ПрО, сообщества и цели. Вместо того, чтобы пытаться создать единую эталонную онтологию неопределённости, должна быть мета-теория неопределённости, которая была бы модульной и настраиваемой для конкретной задачи и цели [Breiner, 2021].

## 2.6 Онтологические обязательства

Разработка онтологий и их устойчивость - это процессы, в ходе которых необходимо принять множество проектных решений. Эти решения различаются в зависимости от того, какая часть онтологии будет затронута. Более того, разные методологии разработки онтологий различаются в зависимости от того, какие решения принимаются, кто принимает решения, а также когда и как принимаются решения (т.е. от управления). Хотя модульность может помочь ограничить объём решения, тем не менее будут решения, имеющие серьёзные последствия для процесса и разрабатываемых артефактов. Проектные решения также влияют на то, насколько хорошо онтология может адаптироваться к будущим требованиям. Решения, принятые во время разработки онтологии,

обычно называют «онтологическими обязательствами». При использовании этого термина в контексте развития онтологии следует быть осторожным, чтобы не путать его с философским понятием онтологической приверженности, таким как критерий Куайна (Стэнфордская энциклопедия философии).

## 2.7 Понимание и анализ

Понимание и определение понятий, которые должны быть представлены в онтологии, являются фундаментальными проблемами в разработке онтологии, которые отличают её от разработки программного обеспечения или даже систем. В разработке онтологии есть как минимум две фазы для представления понятия или объекта. Во-первых, это понимание того, что такое понятие или сущность. Во-вторых, это этап анализа, на котором понятие или сущность представляется или моделируется с использованием выбранных или доступных конструкций. Например, кто-то может выбрать *OWL* в качестве языка онтологии или работать в контексте базовой, справочной или предметной онтологии.

На этапе «понимания» разработчику необходимо изучить соответствующие ссылки, начиная с «общего» словаря (например, Оксфордского или Кембриджского) и переходя к более конкретным ссылкам на ПрО (например, спецификациям *ISO*), если они существуют. Использование диапазона ссылок может обеспечить контраст между различными способами понимания понятия или объекта, а также контекстами, в которых возникает понятие или объект. Эти контрасты в значительной степени помогут в «понимании» понятия или объекта и того, что может потребоваться для представления удовлетворения заявленных потребностей разрабатываемой онтологии. В идеале фаза понимания должна привести к полезному определению на естественном языке, критическому элементу в представлении понятия или объекта для интерпретации человеком.

Следующий этап - процесс онтологического анализа. Этапы понимания и анализа обычно выполняются параллельно, а не последовательно. Подспорьем в онтологическом анализе может быть хорошо сконструированная базовая онтология (например, *DOLCE*, *BFO*, *UFO*, *GFO*), поскольку такая онтология уже включала онтологический анализ во время своего создания. Одна из распространенных ошибок на этапе анализа - это «соблазнение таксономии», которое представляет собой тенденцию помещать объект в таксономию без завершения понимания или анализа. Преждевременная «классификация» понятия или объекта может исказить все усилия по разработке и/или потребовать доработки [Schneider, 2021].

## 3 Определения и гармонизация

Есть много понятий определения. Здесь даётся краткое изложение некоторых из них. Для более полного обсуждения различных понятий определения см. Стэнфордскую энциклопедию философии. Одно из основных различий связано с тем, насколько точно и полно определение раскрывает термин.

Самая сильная форма - это *преднамеренное (intentional) определение*, которое даёт необходимые и достаточные условия для членства в расширении определённого термина. Более слабая форма - это *расширенное (экстенциональное) определение*, в котором явно перечислены все примеры. Расширенное определение может оказаться невозможным или выполнимым, и могут быть другие примеры, которые впоследствии необходимо будет добавить. Самая слабая форма - это *явное (ostensive) определение*, которое часто невербально и сопровождается жестом, указывающим на пример.

Другое различие связано с соответствием реальности. *Настоящее определение* пытается соответствовать действительности, в то время как *номинальное определение* касается только использования термина на практике. Номинальные определения различаются в зависимости от того, насколько точно они отражают существующее использование: *описательное определение* нацелено на совместимость со всеми существующими обычаями, в то время как *условное определение* вводится либо на временной основе, либо в конкретном контексте и не обязательно должно быть совместимо с каким-либо другим употреблением этого термина.

Один из аспектов определения состоит в том, что должны быть термины, такие как термин «объект» (или «сущность»), которые явно не определены. В противном случае определения неизбежно будут циклическими.

Определения могут служить связями между людьми, между человеческими сообществами, между людьми и онтологиями, а также между различными онтологиями. Исторически пытаются стандартизировать термины, включая создание основных моделей метаданных и общих концептуальных моделей для объединения данных в единое представление [Silva, Perez, and Kofuji, 2019]. Например, простая система организации знаний (*Simple Knowledge Organization System, SKOS*) является основным стандартом модели метаданных для Интернета [SKOS, 2009]. Однако эти попытки стандартизации в значительной степени не были приняты из-за ошибочной концептуализации, отсутствия согласия сообщества и неадекватного представительства; и, таким образом, привели к разобщённости.

В последнее время достигнут значительный прогресс в использовании передовых практик, включая использование онтологического анализа и проектирования. На Саммите Онтологий 2021 были рассмотрены различные понятия и уровни формальности определений с акцентом на практические методы согласования различных семантических ресурсов, и в этом разделе приводится краткое изложение этого обзора.

Словари ПрО значительно различаются по качеству и объёму, часто с альтернативными определениями одного и того же термина и определениями, имеющими разную степень формальности. Эта проблема признана давно. Когда Конфуция спросили, что он сделал бы, будь он правителем, он ответил, что «исправит имена», чтобы слова соответствовали действительности. Стандартизация значений терминов остаётся сложной задачей, поскольку существует множество противоречивых и пересекающихся глоссариев и несовместимых моделей данных, которые определяют термины ПрО своеобразными, специфичными для ПрО или приложения способами. Полное «исправление имён», как попытка разработать единую онтологию для всего, может быть слишком амбициозной целью, но гармонизация может быть достигнута, хотя и с некоторыми усилиями. Гармонизация терминологии ведётся в некоторых областях, таких как криосфера, которая представляет собой замороженную водную часть системы Земли, связанную с ледяными полями и ледниками [ESIP, 2021], а также в областях, связанных с правительством, таких как Национальная модель обмена информацией [NIEM, 2017].

Написать адекватное определение, будь то с точки зрения человека или компьютера, не просто. Одна из основных проблем при разработке определений на естественном языке для онтологий - это предположение, что каждый может писать определения и тогда они будут гармоничными. Опыт проектирования онтологий, а также эксперименты показали, что даже для хорошо изученных ПрО результаты ручной классификации, выполняемой экспертами в ПрО, очень противоречивы [Westerinen, 2021]. Итак, первый шаг в написании определений - признать, что это трудная задача. Существует множество принципов написания определений и руководств по лексикографии, терминологии и логике, которые можно использовать для написания определений [Seppala, Ruttenberg, and Smith, 2017].

### 3.1 Определения и гармонизация в экологических науках

В этом разделе подробно представлен конкретный пример ПрО, который направлен на определение и семантическую гармонизацию. ПрО - науки об окружающей среде, а онтология - онтология окружающей среды (*EnvO, EnvO Ontology*). *EnvO* - это семантический ресурс для семантически контролируемых описаний объектов окружающей среды. Например, глоссарий *Darwin Core* использует *EnvO* в своих описаниях среды обитания и был разработан путём применения методов интеллектуального анализа текста для извлечения информации о среде обитания из энциклопедии жизни и автоматического создания экспериментальных классов среды обитания в *EnvO*.

Пример определения на естественном языке *EnvO*: среда обитания - это «экологическая система, которая может поддерживать и обеспечивать рост экологической популяции».

Первоначально *EnvO* предназначена для представления биомов, характеристик окружающей среды и материалов окружающей среды, а первоначальной целью были исследования, связанные с геномом и микробиомом. Однако потребность в семантике среды присуща множеству полей, и объём *EnvO* неуклонно растёт с момента его первоначального описания. По мере расширения области применения онтология была расширена и обобщена для поддержки её всё более разнообразных приложений (таких как Кριο (*Cryo*, ледники и ледяные поля) и Морской (океанический) мир), которые теперь рассматриваются более подробно.

Глобальная служба криосферы (*Global Cryosphere Watch, GCW*) спонсировала усилия по согласованию определений терминов, которые уже используются в области Кριο. Иногда один термин может иметь десятки различных определений, например, термин «снежный покров». Согласованное определение *GCW* выглядит следующим образом: «Плотность площади, присущая снегу, распределённому по площади суши или другого субстрата».

Дополнительная информация об этом термине содержится в аннотациях. Аннотация - это пояснение или комментарий, добавленный к данным или метаданным. Определения - это аннотации, но есть и другие виды аннотаций, которые существенно влияют на понимание как людьми, так и машинами. Например, аннотации могут использоваться для объяснений [Baclawski et al, 2020a] и для определения контекста и происхождения информации [Baclawski et al, 2018a]. Пример аннотации для *GCW*, которая не является частью определения термина, утверждает, что, в общем, снежный покров - это слой снега на поверхности земли, и его можно сравнить с соответствующими терминами снежное поле и снежное покрытие.

Определения естественного языка *EnvO* соответствуют руководящим принципам «Минимум информации для отчётности онтологии» (*MIRO*) [Matentzoglou, Malone, Mungall et al, 2018].

Усилия по гармонизации *EnvO* привели к ряду достижений [Berg-Cross, 2021].

- Результаты анализа глоссария *GCW* были согласованы с *EnvO* и согласованы с соответствующими терминами в онтологии Семантической паутины для технологий Земли и окружающей среды (*Semantic Web for Earth and Environment Technology, SWEET*).
- Согласование со *SWEET* улучшило определения терминов *SWEET*.
- Термины *EnvO* и *SWEET* согласованы с другими терминами онтологии *OBO Foundry* [Ontology Tools and Resources, 2021].
- Специальное *envoPolar* подмножество *EnvO* было создано с соответствующими терминами и аксиомами.
- Приписывание всех обновлений было документально подтверждено людьми или группами, ответственными за эти изменения.
- Были внедрены передовые методы для документации, включая аннотирование времени добавления определения, *orcid.org* человека, создавшего обновление, и информацию о происхождении определений от *EnvO* до *SWEET*.
- Для ускорения создания классов использовались методы создания шаблонов, а для обновления онтологий с помощью определений использовались электронные таблицы. В частности, инструмент *OBO Robot* использовался для облегчения сотрудничества с *EnvO*. Инструмент *Robot* направляет пользователей в процессе создания новых терминов и предназначен для использования не онтологами. Робот организует запросы новых терминов в стандартизированном шаблоне таблицы *Google*, и пользователи могут следовать пошаговому процессу, чтобы заполнить соответствующие столбцы таблицы.

### 3.2 Извлечённые уроки и передовой опыт

В этом разделе представлены некоторые из лучших практик по гармонизации определений. Общие советы по разработке определений естественного языка см. в Руководстве по написанию определений в онтологиях [Seppala et al, 2017]. Рекомендации включают в себя такие советы, как: будьте краткими, согласовывайте, повторно используйте, расширяйте и пересматривайте семантические ресурсы. Следующие пункты объединяют и расширяют рекомендации, добавляя передовой опыт и советы [Berg-Cross, 2021b].

- Организуйте термины в систему понятий (сеть понятий) и укажите положение каждого термина в системе понятий. В некоторой степени неформальные концептуальные модели могут помочь организовать сети на ранних этапах разработки онтологии.
- Чтобы определения были краткими, поместите другую, более энциклопедическую информацию в примечания к аннотациям.
- Для структурирования таксономий используйте ближайшую общую концепцию высшего уровня, добавив одну или несколько ограничивающих характеристик.
- Рассмотрите возможность согласования роли лексических модификаторов, а также существительных и глаголов. Например, такие слова, как «альпийский» или «жидкий».
- Повторно используйте существующие словари, такие как *Schema.org*, *DCAT2*, *VIVO*, *DDI* и т.д. Однако это обычно требует специализации более общих терминов.
- Уменьшите (концептуальную) двусмысленность, явно показывая отношения между терминами. Неоднозначность уменьшается по семантическому спектру несколькими способами. Для людей неоднозначность термина уменьшается за счёт хорошего определения или включения в глоссарий связанных терминов. Дополнительная структура добавляется путём определения принадлежности к классу отношений подтипов. Использование логического языка для представления определений может уменьшить двусмысленность автоматизированных цифровых систем. Некоторые термины, описанные как «похожие» друг на друга, несут некоторую двусмысленность в том, насколько они похожи. Это можно уменьшить, указав более точные отношения. Например, вместо описания ледника как подобного ледяной массе можно указать, что «ледник - это тип ледяной массы».
- Будьте внимательны к вопросам детализации. Метонимия - это наименование вещи чем-то связанным с ней. Например, использование имени целого для части или наоборот. Такие речевые образы, как метонимия, настолько обычны, что можно вообще не осознавать, что они используют речевые образы.
- Избегайте расплывчатых сравнений, например, использования слова «похожий» в определении. Обычно существует много похожих терминов и терминов с перекрывающимися значениями. Выполните семантический анализ, чтобы различать похожие термины. Семантический анализ включает в себя установление отношений между терминами там, где это уместно, таких как подтипы, отношения части и целого, роли, влияния, отношения производства (выхода) и т.д.
- Интерфейс между деловым (естественным) языком и техническим языком (например, логикой описания или логикой первого порядка) помогает человеко-машинному общению, делая язык более точным и менее двусмысленным [Seppala, 2021; Woods & Low, 2021]. Влияние различий между текстовыми и логическими определениями в онтологиях исследовалось в [Seppala et al, 2016]. Однако, общаясь с естественным языком, нужно знать, как люди классифицируют мир. В отличие от классов и свойств онтологий, человеческие категории «мерцают» [Hanks, Jezek, 2008; Waclawski, 2021].
- Термины могут быть стандартизированы, но значения или их ожидаемые толкования должны быть такими же.

- Определения будут варьироваться в зависимости от контекста использования и целевой аудитории.

Эти уроки сообщества *EnvO* могут быть полезны другим сообществам.

#### 4 Нейросимвольные онтологии обучения

Символьное мышление имеет долгую историю и продолжает оставаться активной областью исследований. МО, известное как субсимвольные методы, также является очень активной областью исследований. Хотя оба метода являются частью ИИ, эти две области были разработаны на разных технических основах и отдельными исследовательскими сообществами. Эти две области имеют взаимодополняющие сильные и слабые стороны. В результате поиск способов преодоления разрыва между символьным и субсимвольным подходами к ИИ является давней нерешённой проблемой, и интеграция этих двух областей в настоящее время является предметом растущего исследовательского интереса к ИИ. Устранение этого разрыва было рассмотрено на Саммите Онтологий 2017 [Baclawski et al, 2018b], но с тех пор были разработаны новые методы ИИ, особенно в МО, поэтому пересмотр этой темы, безусловно, своевременен.

Нейросимвольное обучение направлено на интеграцию нейронного обучения с символьными подходами, обычно используемыми в вычислительной логике и представлении знаний в ИИ. Одним из преимуществ такой интеграции является разработка эффективных методов извлечения знаний для объяснимого ИИ [Gaur, Faldu, and Sheth, 2021; Lamb, 2021; Sheth, 2021], но есть много других преимуществ [Sriram, 2021]. Хотя есть значительные преимущества более тесной интеграции нейронной и символьной парадигм, неизвестно, как лучше всего их интегрировать, и было предложено множество архитектур интеграции. Символьные модели могут быть результатом или основой различных стадий нейронного процесса. Некоторые архитектурные приёмы, объединяющие символьные и субсимвольные методы, приведены в [Kautz, 2021]:

1. Самая простая и наиболее распространённая архитектура - это архитектура, в которой символьные данные (например, документы) обрабатываются с помощью символьных методов для создания векторов, которые вводятся в подсимвольный модуль (например, нейронную сеть). Затем векторный вывод субсимвольного модуля интерпретируется в символьной форме с использованием символьных методов.

2. Другая архитектура - это символьная система, которая может вызывать субсимвольные подмодули. Что касается символьной системы, то подмодули - это просто подпрограммы, как и любые другие. В самоходном транспорте обычно используют эту архитектуру.

3. В принципе, можно было бы поменять местами символьное и субсимвольное в вышеупомянутой архитектуре (2), чтобы получить архитектуру, в которой именно субсимвольная система вызывает символьную. Преимущество инверсии ролей символьного и субсимвольного в том, что это позволяет принимать очень сложные решения, поскольку символьные рассуждения могут выполнять комбинаторные рассуждения гораздо более масштабно и эффективно, чем субсимвольные системы.

4. Архитектуры (1), (2) и (3) не включают обучение во время нормальной обработки. Символьный и субсимвольный модули уже запрограммированы и обучены соответственно. Некоторые недавно разработанные архитектуры включают символьное мышление в субсимвольную систему, организуя субсимвольную систему в соответствии с символьными правилами. Примерами таких архитектур являются представления тензорных произведений и логические тензорные сети, которые могут находить обобщения и иерархии части-целого. Другими словами, эти недавно разработанные архитектуры могут генерировать онтологии или,

по крайней мере, некоторые аспекты онтологий. Формы рассуждений включают временную логику, логику описания и логику предикатов первого порядка [Hitzler, 2021].

5. Другая архитектура обучения - ввод экземпляров логических выводов, выраженных в виде пар ввода-вывода, для обучения субсимвольной модели. Тренировка с примерами логического вывода в первую очередь полезна для математических задач, и она на удивление эффективна, хотя иногда допускает ошибки [Karanipathi, 2021].

6. Другая архитектура использует субсимвольные методы, такие как обратное распространение, для обучения символьной системы. Обратное распространение вызывается всякий раз, когда система делает ошибку. Тренировка символьной системы может быть полезна для вопрос-ответных систем.

Ещё одна причина, по которой субсимвольные методы нуждаются в методах, основанных на знаниях, - это интуиция, основанная на человеческом поведении, что интеллект обязательно включает обучение, знания на основе опыта и рассуждения, которые можно выразить следующим уравнением:

*Интеллект = обучение на основе данных + знания / опыт + рассуждения,*

которое было использовано в качестве основы для обучения, основанного на знаниях (*Knowledge-Infused Learning, KIL*) [Sheth, Gaur, Kursuncu, and Wickramarachchi, 2019]. Понятие KIL - это набор архитектур, которые варьируются от поверхностных до глубоких, основанных на знаниях, позволяющих согласовать архитектуру с конкретным приложением. KIL может оказать влияние на робототехнику, когнитивную науку, автономные транспортные средства и личных помощников [Sheth, 2021].

Ещё одна архитектура должна начинаться с «начальной» онтологии и постепенно увеличивать её, используя методы обработки сигналов из графов знаний, извлечённых из различных источников, таких как документы.

Обработка сигналов - это очень высокоразвитая и активная область с большим сообществом, и эта связь между этим сообществом и сообществом онтологов может иметь много преимуществ [Majumdar, 2021; Sowa, 2021; Bacławski et al, 2020b].

## 5 Устойчивость онтологий

Многие организации, включая правительственные агентства, органы по стандартизации и коммерческие фирмы, используют онтологии и разработали инструменты для различных онтологических операций, таких как создание, развитие, отображение и другие формы гармонизации.

Устойчивость предполагает решение гораздо большего, чем просто обеспечение достаточного финансирования. Для достижения устойчивости необходимо строить прочный фундамент. Наиболее важными аспектами такого фундамента являются следующие три «столпа» [Dickerson, 2021].

1. *Экономическая жизнеспособность.* Необходимо обеспечить достаточное финансирование для поддержки онтологии до тех пор, пока её цель остаётся актуальной. Способ распределения и мониторинга ресурсов определяет, будет ли достигнута экономическая жизнеспособность. Без надлежащего надзора невозможно сохранить экономическую жизнеспособность.

2. *Социальная справедливость.* Онтологии могут иметь предубеждения, в том числе онтологии, созданные с помощью МО. Данные неизменно имеют в большей или меньшей степени предвзятость, и методы МО не могут найти или исправить их самостоятельно [Suresh and Guttag, 2019]. Хотя сочетание символьных знаний с МО может помочь обнаружить и

смягчить её, важно признать, что устранение предвзятости остаётся жизненно важной частью разработки и сопровождения онтологий.

Использование стандартов и строгой методологии также может помочь в обеспечении надлежащего решения вопросов социальной справедливости. Стандарты обеспечивают основу для вовлечённых сторон, поэтому более широкая группа людей может в полной мере участвовать в разработке. Тщательный подход помогает установить качество, что также способствует беспристрастному подходу [Dickerson, 2021].

3. *Охрана окружающей среды.* Термин «среда» в этом столпе относится к среде человека, которая окружает конкретное сообщество, разработавшее онтологию. Важно понимать, что сообщества и их онтологии не существуют изолированно. Необходимо поддерживать возможности общения и сотрудничества с соседними и другими родственными сообществами.

Хорошо продуманные определения, документация и согласование, обсуждаемые в разделах 3 и 4, могут способствовать как социальному равенству, так и защите окружающей среды.

Столпы устойчивости показывают, что разработка онтологии - это гораздо больше, чем просто создание онтологии. Первый этап разработки онтологии - это только начало; нужно запустить её в производство.

Во-первых, для выполнения релизации необходимо планирование. Необходимо планировать инфраструктурные проблемы, участие заинтересованных сторон и планирование связанных задач [Franch and Ruhe, 2016]. После того, как онтология выпущена и активно используется теми, кто не входит в группу разработки, возникает необходимость в пересмотрах. Команда разработчиков может предвидеть не так много потенциальных проблем; реализация также содержит базовый уровень содержания [Kotis, Vouros, and Spiliotopoulos, 2020]. Этими проблемами необходимо управлять надлежащим образом, иначе жизнеспособность онтологии после выпуска окажется под угрозой.

Должны быть реализованы механизмы, облегчающие пересмотр и, при необходимости, расширение исходной модели. Хорошо спроектированные каналы обратной связи и редактирования, включая шаблоны, способствуют развитию активной среды для совершенствования онтологии [Blasko, Kremen, and Kouba, 2015]. Заинтересованные стороны могут быть ресурсами для редактирования содержания онтологии, а также для обеспечения справедливости путём продвижения стандартов.

Поддержка технической инфраструктуры способствует развитию интеллектуальной и совместной инфраструктуры, необходимой для поддержки онтологий в долгосрочной перспективе. Постоянно меняющиеся форматы, языки, платформы и инструменты также затрудняют поддержку репозитория онтологий, что было темой Саммита Онтологий 2008 [Obrst et al., 2008].

Пример *EnvO* в разделах 3.1 и 3.2 показывает, как сообщество решает проблему устойчивости своей онтологии. Результаты анализа глоссария *GCW* были согласованы с *EnvO* и с соответствующими терминами в онтологии *SWEET*. *SWEET* - это лёгкая онтология с широким охватом, но с отдельными определениями, которые исторически служили отправной точкой для концепций в науках о Земле. Для определённых ПрО часто добавлялась более богатая семантика и создавались побочные продукты от *SWEET*. По сравнению с концепциями *EnvO*, концепции *SWEET* менее аксиоматизированы и меньше терминов имеют определения. Многие устаревшие термины, используемые в *SWEET*, были взяты из онлайн-источников, таких как Википедия, и не подвергались анализу экспертами в ПрО. Недавно части *SWEET* были обновлены новым выпуском в 2021 году. Уроки, извлечённые сообществом *EnvO*, ценны для других сообществ.

По мере того, как методология и область исследования расширялись с развитием технологий, управление онтологиями и другими связанными семантическими ресурсами стало критически важным компонентом жизненного цикла (ЖЦ) онтологии. Масштаб и разнообразие новых семантических ресурсов, таких как графы знаний, нейросимвольные генерируемые продукты и словари ПрО, требуют пересмотра практик онтологической инженерии и различных ролей онтологий в общем семантическом исследовательском предприятии.

## 6 Выводы и заключение

Распространение онтологий самых разных типов, целей и ролей создало острую потребность в гармонизации онтологий для улучшения коммуникации между людьми, между людьми и машинами, а также между машинами. В этом коммюнике рассмотрены вопросы генерации и гармонизации онтологий. Поскольку существует множество заинтересованных сторон, которые оказывают влияние на эти проблемы, ниже следующие выводы сформулированы для различных заинтересованных сторон.

Заинтересованные стороны на самом высоком уровне - это сообщества и организации, которые спонсируют проекты разработки онтологий либо самостоятельно, либо как часть других проектов. На этом уровне важно убедиться, что все три столпа устойчивости хорошо обоснованы. Для расширений и исправлений онтологий необходимо согласие сообщества. Важны хорошие механизмы для обсуждения в сообществе, а также партнерские соглашения с группами, владеющими словарями ПрО. Для координации и согласования используются различные инструменты, такие как *Slack* и *Github*, но члены сообщества не обязательно обладают навыками использования этих инструментов.

Руководители проекта, включающего разработку онтологий, являются важными заинтересованными сторонами для создания и гармонизации онтологий. Усилия по контролю значения терминов в словарях требуют собственного ЖЦ, которым нужно управлять, как и другими ЖЦ цифровых данных. Руководители проектов несут ответственность за выбор и соблюдение соответствующих руководящих принципов стиля в целом и руководящих принципов стиля для определений в частности, таких как Руководство по написанию определений в онтологиях и рекомендации *MIRO*. Другая задача управления - поддержание доступа к словарю для повторного использования или согласования с онтологиями.

Руководители проектов и разработчики должны сотрудничать, чтобы принимать важные высокоуровневые решения в процессе разработки онтологии. Хорошо построенная базовая онтология может помочь в онтологическом анализе, но также может повлиять на другие решения и процесс разработки. Итак, выбор базовой онтологии должен выполняться очень тщательно. Ещё одно важное решение - нейросимвольная архитектура, которая будет использоваться для включения символьных рассуждений в субсимвольную систему. Хорошая интуиция относительно решения нейросимвольной архитектуры - это уравнение:

*Интеллект = Обучение на основе данных + Знание / Опыт + Рассуждение.*

Термины в словаре ПрО должны включать не только существительные и глаголы, но также лексические модификаторы, такие как прилагательные и наречия. Все термины словаря должны быть организованы в систему понятий, которая не обязательно должна быть иерархией.

Конечные пользователи онтологий и систем на основе онтологий являются заинтересованными сторонами, и разработчики онтологий должны сотрудничать с конечными пользователями, чтобы гарантировать соответствие технического языка разработчика естественному языку конечного пользователя. Использование естественного языка для символов онтологии может привести к путанице из-за существующих значений, которые люди имеют для

символов. Соответственно, онтологии должны распознавать различия между потребностями людей и машин. Одна из функций определения заключается в корректировке выводимых компетенций читателей или систем, то есть того, что они делают, когда сталкиваются с определённым термином. Одним из эффективных средств коммуникации является использование теории нарратива и событийной лингвистики. Логика, лежащая в основе онтологии, должна выбираться в соответствии с требованиями пользователей онтологии. Особенно важно включить соответствующее понятие неопределённости.

Есть заинтересованные стороны другого типа, которые лишь косвенно участвуют в разработке онтологии, но оказывают значительное влияние; а именно - исследователь онтологий. Гармонизация онтологий может занять очень много времени, поэтому инструменты важны для упрощения требуемых усилий, а также для управления усилиями с течением времени. Задача состоит в том, чтобы разработать более совершенные инструменты для гармонизации. Масштаб и разнообразие новых семантических ресурсов, таких как графы знаний, нейросимвольные генерируемые продукты и словари ПрО, требуют пересмотра практик онтологической инженерии. Изучение и обучение этим новым семантическим ресурсам, а также их использование в практике оперативной онтологии, очень важно. Были созданы некоторые предварительные механизмы для поддержания доступа к словарям для повторного использования или для согласования с онтологиями, но необходимы более совершенные механизмы. Ещё одна задача - разработать более совершенные инструменты и методы для эффективного достижения соглашения с разнообразным сообществом.

Разработчики онтологий несут важные обязанности по обеспечению правильного понимания и документирования ПрО онтологии. Одним из важных предварительных условий для понимания ПрО является изучение всех существующих релевантных ссылок. Собрав соответствующую терминологию, разработчик должен избегать соблазна таксономии, т.е. преждевременного помещения сущностей в таксономию. Важно помнить, что термины могут быть стандартизированы, но значение должно быть то же. Написание хороших определений необходимо для стандартизации смысла, но первый шаг в написании определений - это признать, что человек не знает, как это делать. Следующий шаг - научиться тому, как это делать. Теперь есть отличные рекомендации по написанию определений. Некоторые другие проблемы при разработке определений включают избежание нечётких сравнений и чувствительность к уровням детализации.

## 7 Благодарности

В документе описаны некоторые коммерческие программные системы. Такая идентификация не подразумевает рекомендации или одобрения Национальным институтом стандартов и технологий (*NIST*) или организациями авторов или сторонников этого коммюнике; это также не означает, что идентифицированные продукты обязательно являются лучшими из имеющихся для этой цели. Любые мнения, выводы или рекомендации, выраженные в этом материале, принадлежат авторам и не обязательно отражают точку зрения *NIST* или любых других поддерживающих правительства США или Европы или корпоративных организаций.

Доктор Селья Сеппала является научным сотрудником программы Марии Склодовской-Кюри *Career-FIT* под номером MF20180003. Она благодарна за финансирование, полученное в рамках грантового соглашения Европейского Союза № 713654 имени Марии Склодовской-Кюри.

Мы хотим поблагодарить сообщество онтологов за поддержку, особенно приглашённых докладчиков и участников, которые внесли свой вклад в саммит онтологий. Полный список сессий, докладчиков и ссылки на слайды презентаций и видеозаписи доступны по адресу <https://bit.ly/3gKukvC>.

## References

- Baclawski, K. (2007a). Ontology Summit 2007 Survey Response Analysis. (Retrieved 9 June 2021 from <http://bit.ly/2DmZn0i>)
- Baclawski, K. (2007b). Ontology Summit 2007 Survey Response - Issues. (Retrieved 9 June 2021 from <http://bit.ly/2DoEa6i>)

- Baclawski, K.* (2021). Shimmering Semantics: Some Insights for Ontologies from Lexicography. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/32WdO51>)
- Baclawski, K., Bennett, M., Berg-Cross, G., Casanave, C., Fritzsche, D., Ring, J., Schneider, T., Sharma, R., Singer, J., Sowa, J., Sriram, R.D., Westerinen, A., Whitten* (2018a). Ontology Summit 2018 Communique: Contexts in Context. *Applied Ontology*, 13 (3): IOS Press, 181-200. (DOI: 10.3233/AO-180200 Retrieved 25 May 2020 <https://bit.ly/2LYPsz1>)
- Baclawski, K., Bennett, M., Berg-Cross, G., Fritzsche, D., Schneider, T., Sharma, R., Sriram, R.D., Westerinen, A.* (2018b). Ontology Summit 2017 Communique: AI, Learning, Reasoning and Ontologies. *Applied Ontology*, 13 (1), 3–18. (DOI: 10.3233/AO-170191 Retrieved 9 September 2021 from <https://bit.ly/2PWRTrO>)
- Baclawski, K., Bennett, M., Berg-Cross, G., Fritzsche, D., Sharma, R., Singer, J., Singer, J., Sowa, J., Sriram, R.D., Underwood, M., Whitten, D.* (2020a). Ontology Summit 2019 Communique: Explanation. *Applied Ontology*. (DOI: 10.3233/AO-200226 Retrieved 9 September 2021 from <http://bit.ly/2TDDyTG>)
- Baclawski, K., Bennett, M., Berg-Cross, G., Fritzsche, D., Sharma, R., Singer, J., Sowa, J., Sriram, R.D., Whitten, D.* (2020b, April). Ontology Summit 2020 Communique: Knowledge Graphs. *Applied Ontology*, 16 (2), 229–247.
- Baclawski, K., & Duggar, V.* (2007). Ontology Summit 2007 Assessment Report. (Retrieved 9 June 2021 from <http://bit.ly/2KTTD2J>)
- Bennett, M.* (2021). The Landscape of Ontology Purpose. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3r1s4K4>)
- Berg-Cross, G.* (2021a). Introduction to Harmonizing Definitions and the EnvO Ontology. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3pnkwdG>)
- Berg-Cross, G.* (2021b). Semantic harmonizations of concepts revisited: work in the context of the ontology development landscape. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3vsfJuY>)
- Blasko, M., Kremen, P., & Kouba, Z.* (2015). Ontology evolution using ontology templates. *Open Journal of Semantic Web (OJSW)*, 2 (1), 16–29.
- Breiner, S.* (2021). Ontology and the Bayesian Brain. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3o0UOfV>)
- Carvalho, R., Laskey, K., & Costa, P.* (2017). PR-OWL – a language for defining probabilistic ontologies. *International Journal of Approximate Reasoning*, 91, 56–79.
- Cassidy, P., Obrst, L., Ray, S., Soergel, D., & Yim, P.* (2006). Ontology Summit 2006: Upper Ontology Summit. (Retrieved 9 September 2021 from <http://bit.ly/2fQ6XWh>)
- Ceylan, I., & Penaloza, R.* (2017). The Bayesian Ontology Language BEL. *Journal of Automated Reasoning*, 58, 67–95.
- Chen, J., Ludwig, M., Ma, Y., & Walther, D.* (2019). Computing minimal projection modules of description logic terminologies. In *Proceedings of Logics in Artificial Intelligence - 16th European Conference, JELIA (Vol. 11468, pp. 355–370)*. Rende, Italy: Springer. ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-19570-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19570-0_23))
- Dickerson, L.* (2021). Integrating Sustainability into Ontology Development: The Case of GAO’s Fraud Ontology. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3x3XrBX>)
- EnvO GitHub Site. (n.d.). (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/2TqP6sq>)
- ESIP 2021 Advances in Semantic Harmonization: from the Cryosphere, to the Earth System. (2021). (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3wQbHgx>)
- Franch, X., & Ruhe, G.* (2016). Software release planning. In *2016 IEEE/ACM 38th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE-C)* (pp. 894–895).
- Gaur, M., Faldu, K., & Sheth, A.* (2021). Semantics of the black-box: Can knowledge graphs help make deep learning systems more interpretable and explainable? *IEEE Internet Computing*, 25 (1).
- Hanks, P., & Jezek, E.* (2008). Shimmering lexical sets. In *Euralex XIII Proceedings*.
- Hitzler, P.* (2021a). Neural-Symbolic Integration and Ontologies. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/2ZPKRk>)
- Hitzler, P.* (2021b). A review of the semantic web field. *Communications of the ACM*, 64 (2), 76–83.
- Kapanipathi, P.* (2021). Getting AI to Reason: Using NeuroSymbolic AI for Knowledge-based Question Answering. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3f2PDba>)
- Kautz, H.* (2021). Toward a Taxonomy of Neuro-Symbolic Systems.
- Kotis, K., Vouros, G., & Spiliotopoulos, D.* (2020). Ontology engineering methodologies for the evolution of living and reused ontologies: status, trends, findings and recommendations. *The Knowledge Engineering Review*, 35.
- Lamb, L.* (2021). Neural-symbolic AI: From Turing to Deep Learning. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/2OGesXT>)
- Majumdar, A.* (2021). Ontology from Graph Signal Processing. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3tS4T0w>)
- Masolo, C.* (2021). Experiences in developing with DOLCE. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/2OGusCt>)

- Matentzoglou, N., Malone, J., Mungall, C., et al. (2018). MIRO: guidelines for minimum information for the reporting of an ontology. *J Biomed Semant*, 9 (6).
- Neuhaus, F., Smith, B., Florescu, E., Galton, A., Gruninger, M., Guarino, N., Obrst, L., Sanchez, A., Vizedom, A., Yim, P. (2010). *Ontology Summit 2010 Communiqué: Creating the Ontologists of the Future*. (Retrieved 9 June 2021 from <http://bit.ly/2fOGuIO>)
- NIEM website. (2017). National Information Exchange Model of the Office of the Director of National Intelligence. (Retrieved 2 June 2018 from <http://bit.ly/2Lcm1re>)
- Obrst, L., Cassidy, P., Ray, S., Smith, B., Soergel, D., West, M., & Yim, P. (2006). The 2006 Upper Ontology Summit Joint Communiqué. *J. Appl. Formal Ontology*, 1 (2), 203–211.
- Obrst, L., Musen, M., Smith, B., Neuhaus, F., Olken, F., Gruninger, M., Raymond, M., Hayes, P., Sharma, R. (2008). *Ontology Summit 2008 Communiqué: Towards an Open Ontology Repository*. *Ontolog Forum*. (Retrieved 9 June 2021 from <http://bit.ly/2fOGs3E>)
- Ontological commitment. (2014). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. (Retrieved 15 June 2021 from <https://stanford.io/2SssY0V>)
- Ontology Term List. (2020). (Retrieved 30 June 2021 from <https://bit.ly/3AoAPxE>)
- Ontology Tools and Resources. (2021). (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/2UdoSKC>)
- Schneider, T. (2021). *Ontology Landscape: One View*. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3cYRKxw>)
- Searle, J. (2010). *Making the social world: The structure of human civilization*. Oxford: Oxford University Press.
- Seppala, S. (2021). *Systematizing definitions in ontologies*. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3eUnHrQ>)
- Seppala, S., Ruttenberg, A., Schreiber, Y., & Smith, B. (2016). *Definitions in Ontologies*. *Cahiers de lexicologie*, 2 (109), 173–206. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3g4QWXN>)
- Seppala, S., Ruttenberg, A., & Smith, B. (2016, July). *The Functions of Definitions in Ontologies*. In R. Ferrario & W. Kuhn (Eds.), *Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference (FOIS 2016)* (Vol. 283, pp. 37–50). Annecy, France: IOS Press (Frontiers in Artificial Intelligence and Applications). (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3yTPsYZ>)
- Seppala, S., Ruttenberg, A., & Smith, B. (2017). *Guidelines for Writing Definitions in Ontologies*. *Ciencia da Informacao (Information Science Journal)*, 46 (1), 73–88. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3c9G5dL>)
- Sharma, R. (2021). *Ontology Generation and Harmonization*. (Retrieved 15 June 2021 from <https://bit.ly/2YX3qsh>)
- Sheth, A. (2021). *Semantics of the Black-Box: Can knowledge graphs help make deep learning systems more interpretable and explainable?* (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3wG36Oc>)
- Sheth, A., Gaur, M., Kursuncu, U., & Wickramarachchi, R. (2019). *Shades of knowledge-infused learning for enhancing deep learning*. *IEEE Internet Computing*, 23 (6), 54–63. (doi: 10.1109/MIC.2019.2960071)
- Silva, A., Perez-Alcazar, J., & Kofuji, S. (2019). *Interoperability in semantic web of things: Design issues and solutions*. *International Journal of Communication Systems*, 32 (6).
- SKOS (2009). *SKOS Simple Knowledge Organization System Reference*. World Wide Web Consortium. (Retrieved 8 September 2021 from <http://www.w3.org/TR/skos-reference>)
- Sowa, J. (2021). *Automated and semi-automated methods for developing and using ontologies*. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/2P3ciLB>)
- Sriram, R. (2021). *Neuro-Symbolic Learning Technologies*. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3kh3Aog>)
- Suresh, H., & Guttag, J. (2019). *A framework for understanding unintended consequences of machine learning*. (arXiv preprint arXiv:1901.10002)
- Uschold, M. (2021). *Commercial Ontology Development*. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3dHXfAJ>)
- Westerinen, A. (2021). *Experiences with Foundational, Domain and Application Ontologies in OWL2*. (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3bSRbEu>)
- Woods, C., & Low, E. (2021). *Representing ontologies in Natural Language and First-Order Logic: Why do we need both?* (Retrieved 1 June 2021 from <https://bit.ly/3vKPfG2>)

## The Global AI Index

### Глобальный индекс искусственного интеллекта (ИИ)

*Первый индекс сравнения стран по уровню инвестиций, инноваций и внедрения ИИ*

В Глобальном индексе ИИ за 2021 год представлен анализ ИИ в 62 странах мира с помощью трёх столпов анализа: *инвестиции, инновации и внедрение*.

Глобальный индекс ИИ основан на 143 показателях, разделённых на семь групп: таланты, инфраструктура, операционная среда, исследования, разработки, государственная стратегия и коммерция. Важность каждого показателя оценивалась после консультации с экспертами в данной области.

**Талант.** В этой группе показателей сделан упор на наличие квалифицированных специалистов в области ИИ.

**Инфраструктура.** В этой группе показателей основное внимание уделено надёжности и масштабу инфраструктуры доступа, от электричества и Интернета до суперкомпьютерных возможностей.

**Рабочая среда.** В этой группе показателей основное внимание уделено нормативно-правовому контексту и общественному мнению в отношении ИИ.

**Исследовательская работа.** Эта группа показателей ориентировалась на объём специализированных исследований и исследователей, на изучение количества публикаций и цитирований в авторитетных академических журналах.

Объём исследований в области ИИ тесно связан с готовностью страны адаптироваться к ИИ. В условиях растущего сотрудничества государственного и частного секторов объём опубликованных исследований в области ИИ может указывать как на уровень образования страны, так и на развитие ИИ в частном секторе.

В этой группе в качестве показателей применялись: совокупное количество исследовательских статей и работ по ИИ в каждой стране; количество цитирований исследовательских статей и статей по теме ИИ; количество университетов, предлагающих ИИ или тесно связанные курсы (например, магистратура и аспирантура в области компьютерных наук, машинного обучения, глубокого обучения и т.д.) и др.

**Разработка.** Эта группа показателей сосредоточена на разработке фундаментальных платформ и алгоритмов на основе инновационных проектов ИИ.

**Правительственная стратегия.** В этой группе показателей сделан упор на приверженность национального правительства ИИ, на изучение национальных стратегий и обязательств по расходам.

**Коммерческий.** Эта группа показателей ориентировалась на уровень стартапов, инвестиций и бизнес-инициатив на основе ИИ.

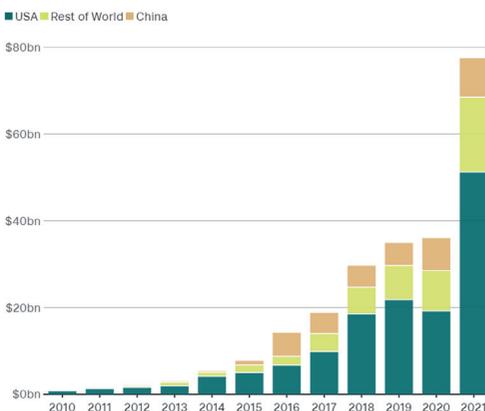
**The Global AI Index.** The first index to benchmark nations on their level of *investment, innovation and implementation* of artificial intelligence. <https://www.tortoisemedia.com/intelligence/global-ai/>.

Country	Implementation			Innovation		Investment		Total rank
	Talent	Infrastructure	Operating Environment	Research	Development	Government Strategy	Commercial	
United States of America	1	4	35	1	1	17	1	1
China	24	1	6	2	2	2	2	2
United Kingdom	3	23	24	5	11	11	4	3
Canada	7	15	5	10	10	1	6	4
Israel	5	29	14	7	9	45	3	5
Singapore	4	8	55	4	14	15	5	6
South Korea	28	6	32	12	3	7	15	7
The Netherlands	6	9	10	15	8	33	18	8
Germany	11	13	30	6	12	10	8	9
France	9	14	17	16	15	5	10	10
Italy	37	33	13	22	24	34	31	31
Russia	34	41	51	30	15	6	39	32
Malta	25	30	28	40	28	23	23	33
United Arab Emirates	58	10	27	42	23	13	27	34

### Мировые инвестиции в ИИ достигли рекордного уровня

Global investment in AI jumps to record high

AI Boom Time. Thursday 2 December 2021. <https://www.tortoisemedia.com/2021/12/02/ai-boom-time/>.



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